

## **Vorwort**

Mit diesem Dokument wird die Praxis der hydraulischen Bohrlochbehandlung für konventionelle Speichergesteine beschrieben. Sie spiegelt den neuesten Stand einer mehr als 50-jährigen Entwicklung wider, in denen diese Bohrlochbehandlungen – auch als Fracking bekannt – in Deutschland durchgeführt werden.

Das Dokument dient als Referenz für die Planung und Durchführung dieser Vorhaben und als Basis für die Kommunikation mit den direkt und indirekt Beteiligten. Durch die transparente Darstellung werden die geübten Praktiken von Beginn der ersten Planungsarbeiten bis zum Abschluss einer Behandlung für jedermann nachvollziehbar dargestellt. Die Dokumentation enthält ebenso Maßnahmen, mit denen mögliche Risiken faktenbasiert abgeschätzt, bewertet und minimiert werden können.

WEG-Richtlinie	„Praxis der hydraulischen Bohrlochbehandlung für konventionelle Speichergesteine“	Stand: 06/2014 Seite 2 von 67
	VORWORT	1
1.	EINLEITUNG	3
2.	GRUNDSÄTZE	4
3.	ERKUNDUNG DES GEOLOGISCHEN UNTERGRUNDES	5
3.1.	Grundwasser	5
3.2.	Deckgebirge und Barriere-Schichten	7
3.3.	Lagerstätten	10
4.	BOHRUNGsherSTELLUNG	15
4.1.	Bohrungsplanung	15
4.2.	Bohrplatz-Planung	16
4.3.	Bohrungsherstellung	20
4.4.	Verrohrung	22
4.5.	Zementation	26
4.6.	Integrität und Kontrolle	28
5.	BOHRUNGSKOMPLETTIERUNG	29
5.1.	Untertageausrüstung	29
6.	HYDRAULISCHE BOHRLOCHBEHANDLUNG	31
6.1.	Planung von hydraulischen Bohrlochbehandlungen	32
6.2.	Bohrlochbehandlungs-Fluide	35
6.2.1.	Wasser	37
6.2.2.	Einsatzstoffe und Inhaltsstoffe	37
6.3.	Durchführung von hydraulischen Bohrlochbehandlungen	39
6.4.	Datensammlung, Analyse, Monitoring	42
6.4.1.	Referenzzustandsbestimmung	43
6.4.2.	Prozess-Monitoring während der hydraulischen Bohrlochbehandlung	43
6.4.3.	Mikro-seismisches und Mikro-Deformations-Monitoring	44
6.4.4.	Seismisches Monitoring	46
6.4.5.	Post Behandlungs-Monitoring	47
6.4.6.	Post-Komplettierungsmonitoring	48
6.5.	Initiale Rückförderphase	49
7.	LITERATURVERZEICHNIS	52
8.	ANHANG: ERLÄUTERUNG VON FACHBEGRIFFEN	56

## 1. Einleitung

Seit ihrem ersten Einsatz in den 40-er Jahren des vergangenen Jahrhunderts hat sich die Technologie der hydraulischen Bohrlochbehandlung zu einer Schlüsseltechnologie bei der Gewinnung aus den zunehmend schwierigeren Öl und Gas Lagerstätten entwickelt. Inzwischen ist die Technologie weltweit in ca. 2 Million Bohrungen zum Einsatz gekommen. Jährlich kommen allein in den USA zurzeit ca. 35.000 behandelte Bohrungen dazu. Mit dem Rückgang der weltweiten Produktion aus konventionellen Vorkommen, definiert als Vorkommen in Speichergesteinen wie Sandsteinen und Karbonaten (inkl. Tight Gas) und der zunehmenden Inanspruchnahme unkonventioneller Ressourcen, definiert als Vorkommen in Muttergesteinen wie Schiefer und Kohle, steigt die Bedeutung dieser Technologie.

In Deutschland wird die Technologie der hydraulischen Bohrlochbehandlung seit den 60-er Jahren des vergangenen Jahrhunderts eingesetzt, um weniger ergiebige konventionelle Lagerstätten zu stimulieren, damit auch diese wirtschaftlich produziert werden können. Seitdem wurden im Aufsichtsbereich des Landesamtes für Bergbau, Energie und Geologie (LBEG) in Erdgasbohrungen mehr als 300<sup>1</sup> hydraulische Bohrlochbehandlungen durchgeführt.

Die Dokumentation der Vorgehensweise in Deutschland bei der hydraulischen Bohrlochbehandlung in konventionellen Lagerstätten, aufbauend auf dem derzeitigen Stand bei

- Auswahl, Genehmigung und Herstellung eines Bohrplatzes
- Planung, Genehmigung und Herstellung einer Bohrung
- Planung, Genehmigung und Durchführung einer hydraulischen Bohrlochbehandlung

ist Ziel dieses Dokumentes. Es schafft eine Referenz für Planung und Durchführung von Vorhaben und die Kommunikation mit den direkt und indirekt Beteiligten.

Der Schwerpunkt der Beschreibungen liegt auf den geübten Praktiken für Bohrungen und hydraulische Bohrlochbehandlungen in konventionellen Lagerstätten, unabhängig davon ob die Bohrungen senkrecht, oder ggf. bis in die Horizontale gerichtet sind und ob es sich bei den Behandlungen um Einfach- oder Mehrfach-Behandlungen handelt. Für diese liegen in Deutschland jahrzehntelange Erfahrungen vor. Als konventionell gelten auch Tight Gas Lagerstätten. Ziel der Praktiken ist es, die geologischen und technischen Herausforderungen zu beherrschen, schädliche Umweltauswirkungen zu vermeiden und Beeinträchtigungen des Umfeldes zu minimieren, die mit den vorgenannten Aktivitäten einhergehen. Dies gilt insbesondere für den Schutz der nutzbaren Grundwasservorkommen. Da Behandlungen von Bohrungen aus durchgeführt werden, sind sie relevant für die Beurteilung der Umweltverträglichkeit von hydraulischen Bohrlochbehandlungen und nehmen den entsprechenden Raum ein. So wie in Abschnitt 4. Bohrerstellung und 5. Komplettierung beschrieben, wird unterstellt, dass die Bohrungen für eine nach Fertigstellung durchzuführende hydraulische Bohrlochbehandlung neu hergestellt werden.

<sup>1</sup> 325 hydraulische Behandlungen in 141 Erdgasbohrungen, darin enthalten 69 Bohrungen in denen mehrfach Behandlungen durchgeführt wurden, zum Teil auch als Wiederholungsbehandlung, Auskunft des LBEG vom 08.10.2013

Eine Ausführung unter Anwendung der in Abschnitt 4. beschriebenen Praktiken erfordert dann keinen weiteren Eignungsnachweis für eine sich an die Herstellung der Bohrung anschließende hydraulische Behandlung. Werden Behandlungen in bereits existierenden älteren Bohrungen durchgeführt, die nicht nach dem in Abschnitt 4. beschriebenen Standard hergestellt wurden, ist separat nachzuweisen, dass Bohrung und Komplettierung den während der Behandlungen herrschenden Beanspruchungen standhalten, ggf. unter Einbeziehung weiterer Schutzmaßnahmen.

Der Aufbau der mit „3. Erkundung des geologischen Untergrundes“ beginnenden Abschnitte ist von der Struktur her weitgehend identisch. Einer Beschreibung des Ziels der im Abschnitt beschriebenen Praktiken folgt die Auflistung „Wichtige gesetzliche Vorgaben“ und „Wichtige technische Empfehlungen“. Den Praktiken vorangestellt sind Erläuterungen, um die Praktiken im Kontext zu verstehen.

## **2. Grundsätze**

Oberstes Gebot bei der Durchführung aller Aktivitäten zur Aufsuchung und Gewinnung von Öl und Gas ist es, Risiken für die menschliche Gesundheit sowie schädliche Umweltauswirkungen sicher zu verhindern und Beeinträchtigungen des Umfeldes zu minimieren. Besonderes Augenmerk gilt dabei der Vermeidung von Gesundheits- und Personenschäden sowie der Vermeidung von Verunreinigungen des Bodens sowie des Grundwassers im Allgemeinen und genutzter/nutzbarer Grundwasservorkommen im Besonderen. Dies ist das Ziel einer Vielzahl von Gesetzen, Verordnungen und Verfügungen, mit denen die Aktivitäten der Industrie geregelt werden, und der unternehmensinternen Management-Systeme, die diese Vorgaben umsetzen, ergänzen und weiter konkretisieren. Wichtige Beispiele sind: Bundesberggesetz (BBergG), Bundes-Bodenschutzgesetz (BBodSchG), Wasserhaushaltsgesetz (WHG), Bergverordnung für Tiefbohrungen (BVOT), Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung (BBodSchV), Verordnung über Anlagen zum Umgang mit wassergefährdenden Stoffen und über Fachbetriebe (VAwS) und die LBEG Rundverfügung: „Mindestanforderungen an Betriebspläne, Prüfkriterien und Genehmigungsablauf für hydraulische Bohrlochbehandlungen in Erdöl- und Erdgaslagerstätten in Niedersachsen“.

In Bezug auf die Anwendung der Technologie der hydraulischen Bohrlochbehandlung bedeutet die Umsetzung des Gebotes der Vermeidung von Risiken für die menschliche Gesundheit sowie von schädlichen Umweltauswirkungen die Vermeidung des Eintrages von Schadstoffen von der Erdoberfläche in das Grundwasser, die Sicherheit in der Prognose dichter Deckgebirge, die Gewährleistung integerer Bohrungen, die Sicherheit in der Prognose und Steuerung der Ausbreitung hydraulischer Riss-Systeme, die sichere Entsorgung der initialen Rückförderung sowie die Vermeidung spürbarer, ausgelöster seismischer Erschütterungen. Hierbei spielen Referenzbohrungen eine wichtige Rolle. In der Kohlenwasserstoff-Bohrungsdatenbank (KW-DB) des Landesamtes für Bergbau, Energie und Geologie (LBEG) gab es mit Stand 2012

mehr als 16.000 Einträge für Bohrungen (ca. 8.400 Bohrungen tiefer als 800 m), die allein in Niedersachsen abgeteuft worden sind und die die relevanten Gebiete weitgehend überdecken, Tran Viet (2013). Mit diesen Einträgen steht eine Fülle relevanter Information zur Verfügung, die für Bewertungen genutzt werden kann.

Bei Herstellung und Betrieb von Bohrungen ist es bewährte Praxis in der Öl- und Gasindustrie, die Fluide der Formationen gegenüber Mensch und Umwelt zu jeder Zeit mit mindestens zwei unabhängigen, technischen Barrieren abzusichern (doppeltes Barriere-Prinzip, siehe auch Norsok (2013)). Die primäre Barriere (z.B. Produktionsrohrtour/Produktionsrohrtourzement/Casing/Packer/Komplettierungsstrang/Untertagesicherheitsventil) verhindert, dass die Fluide unkontrolliert aus den Formationen entweichen können. Die sekundäre Barriere (z.B. Ankerrohrtourzement/Ankerrohrtour/Bohrlochkopf) operiert unabhängig von der primären und dient als Rückfallposition zu dieser. Als Barrieren sind sowohl mechanische als auch fluide Maßnahmen möglich. Dieses Prinzip wird auch bei der Durchführung von hydraulischen Bohrlochbehandlungen sowie bei der Produktion von Bohrungen gewahrt.

### **3. Erkundung des geologischen Untergrundes**

#### **3.1. Grundwasser**

Ziele: Schaffung einer Informationsbasis über die im Umfeld zu behandelnder Bohrungen vorhandenen Grundwasserkörper, deren Nutzungen bzw. Nutzungsmöglichkeiten und ihren Schutzbedarf.

Wichtige gesetzliche Vorgaben:

- Bundesgesetz (1980): „Bundesberggesetz (BBergG)“
- Bundesgesetz (2009): „Wasserhaushaltsgesetz (WHG)“
- Bundesgesetz (1998): „Bundes-Bodenschutzgesetz (BBodSchG)“
- Bundesrechtsverordnung (2010): „Verordnung zum Schutz des Grundwassers (Grundwasserverordnung - GrwV)“
- Bundesrechtsverordnung (1999): „Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung (BBodSchV)“
- Ländergesetz (2010): „Niedersächsisches Wassergesetz (NWG)“
- Länderverordnung (2006): „Bergverordnung für Tiefbohrungen, Untergrundspeicher und für die Gewinnung von Bodenschätzen durch Bohrungen (BVOT)“
- Länderverordnung (2009): „Verordnung über Schutzbestimmungen in Wasserschutzgebieten (SchuVO)“
- LBEG (2012): „Rundverfügung: Mindestanforderungen an Betriebspläne, Prüfkriterien und Genehmigungsablauf für hydraulische Bohrlochbehandlungen“

Das Grundwasser als Teil des natürlichen Wasserkreislaufes ist der größte und wichtigste Süßwasserspeicher, d.h. die wichtigste Trinkwasserressource in Deutschland. Aus diesem Grund muss es vor Verunreinigungen und Schadstoffeinträgen geschützt werden und in seiner natürlichen Reinheit erhalten bleiben. Grundwasser bildet sich durch in den Boden einsickernde Niederschlagswässer, aber auch durch versickerndes Wasser aus Vorflutern und Oberflächengewässern. Dieses Wasser ist Verunreinigungen durch Luftschadstoffe oder Belastungen durch die Flächennutzungen wie Siedlung, Gewerbe, Verkehr, Rohstoffgewinnung und Landwirtschaft etc. ausgesetzt. Bei der Versickerung, d.h. der Bewegung des Wassers durch die Bodenzone finden Reinigungs- und Rückhalteprozesse statt. Die verschiedenen Bodenschichten wirken dabei als Filter und bieten so dem Grundwasser einen natürlichen Schutz vor schädlichen Einwirkungen. Um dieses natürliche Schutzpotential zu erhalten ist es wichtig, Bodeneingriffe und die Gefahr von Schadstoffbelastungen der ungesättigten Zone zu begrenzen.

Aufgrund der lithologischen Ausbildung der in Norddeutschland vorhandenen Formationen reichen die nutzbaren, d.h. nicht versalzten Grundwasserressourcen in der Regel bis in Teufen von 200 m (Neutraler Expertenkreis, 2012). In tieferen Bereichen kommt das Grundwasser insbesondere an Salzstöcken und Salzrücken in Kontakt mit aufgestiegenen Gesteinen des Zechsteines, wobei es zur Befruchtung des Grundwassers mit z.T. erheblichen Salzlasten kommt. Im Bereich des norddeutschen Beckens sind die nutzbaren Grundwasserressourcen in der Regel durch praktisch undurchlässige Schichten von den „salzigen“ Wässern des tiefen geologischen Untergrundes getrennt. Dies verhindert eine Vermischung der oberflächennahen „süßen“ Grundwasserressourcen mit den salzhaltigen Tiefenwässern. Wo dies nicht der Fall ist können lokal Grundwasserversalzungen auftreten, die z.B. als Heilquellen genutzt werden. Die Tiefenwässer sind häufig bis zur Sättigungsgrenze mit Salzen beladen, d.h. die Salzgehalte liegen bei bis zu 250 g/l und mehr (RWE, 2013).

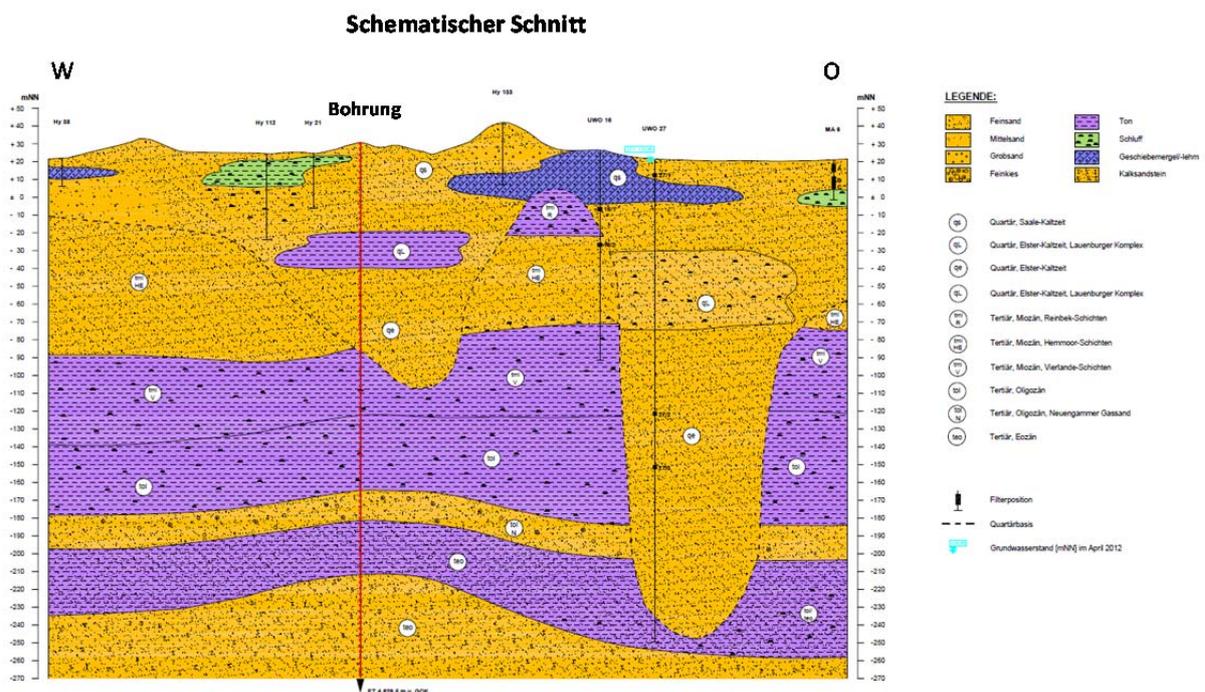
Zur hydrogeologischen Charakterisierung von Untersuchungsgebieten bzw. deren potentieller Gefährdung sind folgende Praktiken üblich:

**PRAKTIKEN: CHARAKTERISIERUNG VON NUTZWASSERHORIZONTEN**

- Ermittlung relevanter Vorfluter, Oberflächengewässer, Grundwasserkörper und Wasserscheiden
- Datenrecherche/Stichtagsmessung zur Darstellung der Standrohrspiegelhöhen des Grundwassers oder Hydroisohypsen in einem Hydroisohypsenplan (Gleichenplan)
- Bestimmung des Grundwasserflurabstandes/Lage des Flächenelementes, das sich zwischen den Hydroisohypsen aufspannt, der Mächtigkeit des Grundwasserkörpers/ Grundwasserleiters sowie der Grundwasserfließrichtung
- Bestimmung der Geometrie des Grundwasserkörpers (Störungen, Rinnen, Fließbarrieren)
- Ermittlung der hydraulischen Parameter des Grundwasserleiters (Gebirgsdurchlässigkeit, Fließgeschwindigkeit des Grundwassers etc.)

- Bestimmung von Mächtigkeit und Verbreitung vorhandener Grundwasserhemmer bzw. hydrogeologischer Fenster zwischen vorhandenen Grundwasserstockwerken
- Bestimmung der Schutzwirkung der überlagernden Deckschichten/der ungesättigten Zone (Mächtigkeit, Zusammensetzung)
- Feststellung der Grundwasserqualität (siehe auch 6.4.1.: Referenzzustandsbestimmung) unter Beachtung vorhandener anthropogener Eintragspfade
- Feststellung von Schutzgebieten (Trinkwasser, Heilquellen, Mineralwasservorkommen etc.) und vorhandener Grundwassernutzungen.

Ein Beispiel für die Dokumentation einer Charakterisierung von oberflächennahen Grundwasserleitern ist in den Abbildungen 1 wiedergegeben.



**Abb. 1: Charakterisierung der oberen Grundwasserleiter**

Zur Charakterisierung werden insbesondere die Geometrie der Grundwasserleiter, ihre hydraulischen Eigenschaften, der Flurabstand der Grundwasseroberfläche und die Grundwasserfließrichtung bestimmt sowie die Grundwasserqualität festgestellt.

### 3.2. Deckgebirge und Barriere-Schichten

Ziele: Charakterisierung des Untergrundes im Hinblick auf seine Barriere-Eigenschaften für den Aufstieg von Fluiden und für das Höhenwachstum von künstlich erzeugten Rissen.

Wichtige gesetzliche Vorgaben:

- LBEG (2012): „Rundverfügung: Mindestanforderungen an Betriebspläne, Prüfkriterien und Genehmigungsablauf für hydraulische Bohrlochbehandlungen“

Der geologische Untergrund besteht üblicherweise aus einer Wechsellagerung unterschiedlicher geologischer Schichten mit unterschiedlichen hydraulischen und mechanischen Eigenschaften. Viele dieser Schichten bestehen aus Materialien mit Barriere-Eigenschaften. Sind diese Schichten ausreichend mächtig, können sie als abdichtende Deckschichten für den Aufstieg von Gasen und Flüssigkeiten angesehen werden, wenn sie frei sind von offenen Rissnetzwerken, z.B. entlang von Störungsbahnen und Salzstockflanken.

Die Existenz von offenen Rissnetzwerken kann für plastische Materialien ausgeschlossen werden. Für plastische Materialien sind Selbstheilungseffekte bekannt und in der Literatur beschrieben, Williams et al. (2009), Reinicke et al. (2011), Hou et al. (2012). Von plastischem Verhalten kann grundsätzlich für die unverfestigten Tone des Tertiärs (z.B. Rupelton, Chatt) sowie für Salzschiefer (z.B. im Muschelkalk, im Buntsandstein und insbesondere im Zechstein) ausgegangen werden.

Für die Ton(stein)formationen unterhalb des Tertiärs kann die Existenz von Rissnetzwerken, insbesondere entlang von Störungszonen, nicht grundsätzlich ausgeschlossen werden. Sie ist abhängig von der tektonischen Situation am Standort. Häufig sind die in obertägigen Aufschlüssen nachgewiesenen Klüfte im untertägigen System verheilt und somit nicht migrationsrelevant. In karbonatischer Fazies können darüber hinaus Verkarstungen existieren. Zur Klärung können standortbezogene Untersuchungen durchgeführt werden, z.B. des Verlust-/Zufluss-Verhaltens beim Durchbohren der Rissysteme, der Riss-Genese, des Schichtmaterials und möglicher post-Genese Mineralisierungsprozesse.

Die Fluide im Porenraum der geologischen Schichten stehen unter Druck, dem sogenannten Porendruck. Bei einer Wasserführung des Porenraumes sind hydrostatische Verhältnisse üblich, d.h. der Porendruck in einer bestimmten Teufe entspricht in etwa dem Druck einer für dieses Gebiet repräsentativen Wassersäule (bezogen auf die Dichte) von dieser Teufe bis zur Oberfläche. In tiefer liegenden, älteren Formationen, insbesondere der Trias Nord- und Nordwestdeutschlands, werden dagegen häufig überhydrostatische Verhältnisse beobachtet. Sie belegen, dass für bestimmte Formationen auch bei Wasserführung Druckgefälle Richtung Biosphäre möglich sind, sie belegen aber auch die Geschlossenheit der „aufgeladenen“ Formationen.

Die Bewertung des Deckgebirges zwischen einem Kohlenwasserstoffvorkommen und den oberflächennahen Nutzwasserhorizonten im Hinblick auf seine Barriere-Eigenschaften für den Aufstieg von Fluiden und für das Höhenwachstum von Rissen erfordert die Charakterisierung dieser Schichten. Dabei erfordert der Nachweis dichter Deckgebirge die lithologische und hydraulische Charakterisierung, d.h. den Nachweis von undurchlässigen Barrierschichten und den Ausschluss relevanter Wirkungspfade (keine offenen Wegsamkeiten)

und/ oder keine Druckgradienten Richtung Biosphäre) durch ansonsten dichte Barriere-Schichten hindurch. Der Nachweis wirksamer Barrieren zur Begrenzung von Riss-Höhenwachstum erfordert eine geomechanische Charakterisierung, insbesondere bis zur ersten Deckschicht inklusive der minimalen Horizontalspannungen in diesen Schichten.

Für die Tone des Tertiär sowie die Salzsichten, z.B. des Malm, Muschelkalk, Buntsandstein und insbesondere des Zechstein, kann Barriere-Verhalten für den Aufstieg von Fluiden und für das Höhenwachstum von Rissen unterstellt werden.

### **PRAKTIKEN: UNTERGRUND-CHARAKTERISIERUNG**

Im Rahmen der Planung

- Beschreibung des strukturellen Aufbaus des Untergrundes unter Zuhilfenahme von z.B. 2D und/oder 3D-Seismik in Kombination mit Bohrungsdaten
- Identifikation potentieller Barriere-Schichten und Bewertung ihrer Durchlässigkeiten sowie Identifikation und Bewertung von Rissnetzwerken und Verkarstungen auf der Grundlage von Informationen aus Referenzbohrungen z.B.
  - Schichtenverzeichnisse und Bohrberichte
  - Bohrlochmessungen zur Lithologie
  - Spülproben
  - Spülungsverlust- und Zufluss-Verhalten (gesamte Bohrstrecke)
  - u.U. Image-Logs sowie Mikrowiderstandsmessungen, die Aufschluss über Klüftigkeit geben (in der Regel nur für Reservoir-nahe Bereiche vorhanden)
  - Hinzuziehung von Informationen über potentiell klüftige Zonen
- Identifikation und Bewertung geologischer Störungen aufgrund von z.B.
  - Eventuell vorhandener 2D und/oder 3D-Seismik und/oder Bohrungsdaten und/oder Produktionsdaten, die dynamische Fließbarrieren anzeigen
  - Analyse des Zufluss-Abflussverhaltens beim Durchbohren von Störungen
  - Mögliche Analyse der Störungsgenese (Weitungsvorgänge bzw. Einengungsvorgänge)
  - Mögliche Analyse des Materials entlang der Störungen (z.B. wassergesättigte Tone, Salze)
  - Bohrlochmessungen (z.B. Messungen, um Mikrorisse in der Bohrlochwand sichtbar zu machen)
  - Ggf. Untersuchungen zu postgenese Prozessen (Mineralisierung)
- Geophysikalische Messungen
- Identifikation und Bewertung von verfüllten Altbohrungen (Verfüllungsberichte und -bilder)
- Mögliche Quantifizierung des Porendruckes über die gesamte Bohrstrecke auf der Grundlage von Informationen aus Referenzbohrungen zur Feststellung von Potentialdifferenzen zwischen den geologischen Schichten (s.a. 4.3.)

- Mögliche Beschreibung der geochemischen Verhältnisse im Zielbereich auf der Grundlage von Informationen aus Referenzbohrungen.

Im Rahmen der Bohrungsherstellung (s. auch 4.3.)

- Überwachung des Bohrprozesses, insbesondere des Zufluss-Abflussverhaltens und Sampling
- Ggf. Durchführung von Testen/Messungen zur Bestimmung von Porendruck Gebirgsspannung und ggf. Richtung der maximalen Horizontalspannung
- Durchführung von Bohrlochmessungen zur Bestimmung von Lithologie und ggf. Gesteinseigenschaften
- Ggf. Kernentnahme im Behandlungshorizont und im unmittelbaren Barrierehorizont zur Ermittlung der Gesteinseigenschaften
- Anfertigen von Schichtenverzeichnissen zur Dokumentation von geologischem Profil und Beschreibungen der durchteuften geologischen Schichten sowie Bohrberichten zur Aufzeichnung aller relevanten Bohreignisse.

Ein Beispiel für die Dokumentation der Charakterisierung des strukturellen Aufbaus des geologischen Untergrundes und seiner Schichten ist in den Abbildungen 2 und 3 gezeigt.

### **3.3. Lagerstätten**

Ziele: Charakterisierung der kohlenwasserstoffführenden Reservoirs im Hinblick auf ihre Speicher- und Fließigenschaften.

Wichtige gesetzliche Vorgaben:

- LBEG (2012): „Rundverfügung: Mindestanforderungen an Betriebspläne, Prüfkriterien und Genehmigungsablauf für hydraulische Bohrlochbehandlungen“

Eine wesentliche Voraussetzung für die Erschließung von Lagerstätten ist das Erreichen wirtschaftlicher Produktionsraten und Kumulativentnahmen. In den höher durchlässigen konventionellen Lagerstätten sind diese Bedingungen erreichbar mit Hilfe vertikaler Bohrungen, die nach ihrer Fertigstellung ohne größere Behandlungen in Produktion genommen werden können.





Für Durchlässigkeiten kleiner als etwa 1 milli-Darcy (Tight Gas) reichen die natürlichen Zufluss-Verhältnisse in der Regel nicht mehr aus, um eine wirtschaftliche Förderung zu ermöglichen. Um trotz ungünstiger Voraussetzungen wirtschaftliche Produktionsraten zu erzielen, werden deshalb seit den 40-er Jahren des vergangenen Jahrhunderts Bohrungen hydraulisch behandelt, bis in die 90er Jahre hinein fast ausschließlich in geringer durchlässigen konventionellen Lagerstätten in Sandstein- und Karbonat-Formationen, danach insbesondere in den USA zunehmend auch in unkonventionellen Muttergesteinsformationen. Das Produktionspotential von Gasbohrungen in unkonventionellen Vorkommen ist unbehandelt mit teilweise sehr viel weniger als  $100 \text{ m}^3(V_n)/\text{h}$  anzusetzen, im Vergleich zu mehreren  $10.000 \text{ m}^3(V_n)/\text{h}$  für höher durchlässige konventionelle Lagerstätten.

Die Unterschiede von konventionellen und unkonventionellen Lagerstätten sind in Deutschland nachfolgend beispielhaft aufgeführt:

	Konventionelle Lagerstätten (einschließlich Tight Gas)	Unkonventionelle Lagerstätten (Schiefergas und Kohleflözgas)
Trägergestein	Reservoir-Gestein (Sandstein, Karbonat)	Muttergestein (Schiefer, Kohle)
Typische Formation	Trias, Zechstein, Rotliegendes, Karbon	Kreide, Jura, Karbon
Durchlässigkeit	Mikro-Darcy Bereich und größer	Nano-Darcy Bereich
Teufe	Tiefer als ca. 2.000 m	Tiefer als ca. 1.000 m
Deckgebirge	In der Regel Ton-, Mergel- und Salzschiefer	In der Regel Ton- und Mergelschichten, vereinzelt Salzschiefer
Bohrungstyp	Vertikal-/Horizontalbohrung	Horizontalbohrungen und Multilaterale Horizontalbohrung
Erfahrungen mit hydraulischen Bohrlochbehandlungen in Deutschland	Seit den 60-er Jahren, mehr als 300 hydraulische Bohrlochbehandlungen <sup>2</sup>	Nur Bohrung Damme 3
Behandlungs-Typ	Einfach-Behandlungen, einige wenige Mehrfach-Behandlungen sowie Wiederholungsbehandlungen	In der Regel Mehrfach-Behandlungen
Typisches Flüssigkeitsvolumen pro Behandlung	Bis $500 \text{ m}^3$ /Behandlung	Planwerte für künftige Behandlungen bis $3.000 \text{ m}^3$ pro Behandlung <sup>3</sup>

<sup>2</sup> Im Aufsichtsbereich des LBEG

<sup>3</sup> In Bohrung Damme 3 maximal verpresstes Behandlungsvolumen  $4.352 \text{ m}^3$  in Behandlung 3

Für den Aufstieg von Gasen und/oder Flüssigkeiten aus Lagerstätten Richtung Biosphäre sind relevante Wirkungspfade erforderlich, d.h. offene Wegsamkeiten durch das Deckgebirge und überhydrostatische Verhältnisse in der Lagerstätte, damit ein Druckgefälle in Richtung Biosphäre gegeben ist.

Im kohlenwasserstoffführenden Bereich einer geologischen Formation mit förderbaren Kohlenwasserstoffgehalten kann es relevante Wirkungspfade, z.B. in Form von natürlich vorhandenen, leitfähigen Störungen nicht geben. Würde es sie geben, gäbe es keine Lagerstätte. Kohlenwasserstoffe sind leichter als Wasser und wären über diese Wirkungspfade aufgestiegen.

Im wasserführenden Bereich geologischer Formationen sind relevante Wirkungspfade nicht auszuschließen, setzen jedoch ein Druckgefälle in Richtung Biosphäre voraus. Sind die Aquifere hydrostatisch, liegt kein Druckgefälle Richtung Biosphäre bzw. genutztem „süßen“ Grundwasser vor. Sind sie überhydrostatisch, ist dies auch ein Beleg für die „Dichtheit“ potentieller Wegsamkeiten durch das Deckgebirge.

Aufgrund von Dichteunterschieden zwischen Gas, Öl und Wasser wird der initiale Druck in kohlenwasserstoffführenden Bereichen mit zunehmender Höhe über dem Kontakt zwischen Gas, Öl und Wasser zunehmend überhydrostatisch. Für hohe Kohlenwasserstoffsäulen kann der Porendruck Werte annehmen, die sehr deutlich über dem hydrostatischen Druck liegen. Unter diesen Bedingungen ist ein Aufstieg möglich, aber nur wenn im Rahmen von hydraulischen Bohrlochbehandlungen Wirkungspfade künstlich erzeugt werden. Mit Aufnahme der Produktion baut sich der überhydrostatische Druck ab, was eine Abnahme der Relevanz von potentiellen, künstlich erzeugten Wirkungspfaden bedeutet.

### **PRAKTIKEN: LAGERSTÄTTEN-CHARAKTERISIERUNG**

Im Rahmen der Planung

- Charakterisierung des Reservoirs und seines Inhaltes auf der Basis von seismischen Informationen und Informationen aus Referenzbohrungen zu Reservoir-, Gesteins- und Fluideigenschaften sowie Druck und Temperatur.

Im Rahmen der Bohrungsherstellung

- Feststellung der Lagerstätten-Eigenschaften, z.B. Mächtigkeit, Mineralogie, Porosität, Dichte, Sättigung und Durchlässigkeit sowie ggf. dynamischer Elastizitätsmodul, Poisson-Verhältnis, Biot-Koeffizient, horizontalem und vertikalem Spannungszustand sowie Spannungsrichtung auf der Basis von Bohrlochmessungen, Spülproben, Kernmaterial und Testen
- Feststellung des Lagerstätten-Inhaltes, z.B. Gas-, Öl- und Wasserzusammensetzung und Eigenschaften ggf. auf der Basis von Fluidproben
- Feststellung von Lagerstättendruck und Lagerstättentemperatur auf der Basis von Bohrlochmessungen und Testen
- Feststellung von Bohrungsproduktivität und Open-Flow Potential auf der Basis von Messungen, Testen und Berechnungen.

#### **4. Bohrungsherstellung**

Die Herstellung und Ausrüstung einer Erdöl- oder Erdgas-Tiefbohrung besteht aus mehreren aufeinanderfolgenden Aktivitäten:

- Herstellung des Bohrplatzes
- Aufbau von Bohranlage und zugehöriger Ausrüstung
- Herstellung der Bohrungsabschnitte und Überprüfung ihrer Integrität
- Ggf. Durchführung von Bohrlochmessungen und Testen
- Installation der Untertage- und Obertageausrüstung
- Mögliche Behandlung/Stimulation
- Abbau von Bohrturm und zugehöriger Ausrüstung
- Inbetriebnahme der Bohrung
- Betrieb der Bohrung und Überwachung ihrer Integrität
- Bohrungsverschluss, Rückbau und Rekultivierung.

##### **4.1. Bohrungsplanung**

Ziele: Planung einer Bohrung, die den Fluss von Fluiden nur innerhalb der verrohrten Bohrung zulässt und dadurch das Grundwasser schützt, den Fluidaustausch zwischen unterschiedlichen Gesteinsschichten verhindert und eine sichere Durchführung von hydraulischen Bohrlochbehandlungen ermöglicht.

Wichtige gesetzliche Vorgaben:

- Bundesgesetz (1934): „Lagerstättengesetz (LagerstG)“
- Bundesgesetz (1980): „Bundesberggesetz (BBergG)“
- Bundesgesetz (2009): „Wasserhaushaltsgesetz (WHG)“
- Bundesgesetz (1998): „Bundes-Bodenschutzgesetz (BBodSchG)“
- Bundesrechtsverordnung (1990): „Verordnung über die Umweltverträglichkeitsprüfung bergbaulicher Vorhaben (UVP-V Bergbau)“
- Bundesrechtsverordnung (1995): „Bergverordnung für alle bergbaulichen Bereiche (ABBergV)“
- Bundesrechtsverordnung (1999): „Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung (BBodSchV)“
- Ländergesetz (2010): „Niedersächsisches Wassergesetz (NWG)“
- Länderverordnung (2006): „Bergverordnung für Tiefbohrungen, Untergrundspeicher und für die Gewinnung von Bodenschätzen durch Bohrungen (BVOT)“

Wichtige technische Empfehlungen:

- API (2009): “Guidance Document HF1: Hydraulic Fracturing Operations - Well Construction and Integrity Guidelines”
- API (2010): “Isolating Potential Flow Zones During Well Construction”
- NORSOK (2013): “NORSOK Standard D-010, Well integrity in drilling and well operations”

**PRAKTIKEN: BOHRUNGSPLANUNG**

- Ggf. Durchführung einer UVP nach Maßgabe der UVP-V Bergbau
- Design einer integrieren Bohrung mit grundsätzlich mindestens doppelter Barriere zum oberflächennahen Grundwasser und zur Atmosphäre durch
  - Auslegung eines geeigneten Verrohrungs- und Zementationsprogrammes
  - Angemessene Bohrlochvorbereitung für Verrohrung und Zementation
  - Den Anforderungen entsprechende Einstellung der Bohrspülung
  - Ausreichende Zentrierung der Futterrohre bei Einbau und Zementation
  - Fachgerechtes Einbringen des Zementes in den Ringraum
- Wahl eines Bohrfades, der erkennbare Risiken vermeidet
- Berücksichtigung der mit der Bohrungsherstellung verbundenen sicherheitsrelevanten Aspekte durch z.B.
  - Bohrungsvorprogramm
  - Auslegung der Futterrohrfahrten nach den Regeln der Technik
  - Sicherer Umgang mit Gefahrstoffen
  - Einrichtungen zur Zufluss-Erkennung
  - Aufbau eines den Anforderungen angemessenen Systems von Bohrlochabsperren-  
gen.

Die Dokumentation der vorgenannten Arbeiten erfolgt in einem Betriebsplan, der der Bergbehörde im Rahmen des Betriebsplanverfahrens zur Zulassung vorgelegt wird.

**4.2. Bohrplatz-Planung**

Ziele: Gewährleistung des Umweltschutzes insbesondere von Grundwasser und Gewässern sowie Minimierung des Einflusses auf das Umfeld.

Wichtige gesetzliche Vorgaben:

- Bundesgesetz (1980): „Bundesberggesetz (BBergG)“
- Bundesgesetz (2009): „Wasserhaushaltsgesetz (WHG)“
- Ländergesetz (2010): „Niedersächsisches Wassergesetz (NWG)“
- Länderverordnung (1997): „VAWS - Verordnung über Anlagen zum Umgang mit wassergefährdenden Stoffen und über Fachbetriebe“
- Länderverordnung (2009): „Verordnung über Schutzbestimmungen in Wasserschutzgebieten (SchuVO)“

Wichtige technische Empfehlungen:

- DWA(2005): „Technische Regel wassergefährdender Stoffe (TRwS), Ausführung von Dichtflächen“
- WEG (2006): „Leitfaden Gestaltung des Bohrplatzes“
- API (2010): “Guidance Document HF2: Water Management Associated with Hydraulic Fracturing”
- API (2011): “Guidance Document HF3: Practices for Mitigating Surface Impacts Associated with Hydraulic Fracturing”

Bohrungen werden von einem Bohrplatz aus durchgeführt. Von diesem Platz (Ansatzpunkt der Bohrung) muss das geologische Ziel mit den im Untergrund vermuteten oder bereits nachgewiesenen Kohlenwasserstoffen (Landepunkt der Bohrung) technisch sicher erreicht werden können. Da der Landepunkt nicht senkrecht unter dem Ansatzpunkt liegen muss, lassen sich obertägige Restriktionen in begrenztem Umfang berücksichtigen.

#### **PRAKTIKEN: LOKATIONSFINDUNG**

- Identifizierung möglicher Bohrlokationen innerhalb eines Gebiets, das anhand von geologischen und seismischen Ergebnissen bestimmt wird
- Identifizierung bestehender Schutzgebiete (z.B. Wasserschutzgebiete, Naturschutzgebiete, Landschaftsschutzgebiete, Biotope, Archäologie)
- Identifizierung von Gewässern und Überschwemmungsgebieten
- Identifizierung bebauter Gebiete und bestehender Infrastruktur
- Identifizierung von unterirdischen Leitungen, Kabeln, Funkstrecken Luftfahrthindernissen etc.
- Geländebegehung möglicher Bohrlokationen
- Vorauswahl eines Ansatzpunktes, der den Bedürfnissen von Umweltschutz und Raumplanung gerecht wird, d.h.
  - Abstandwahrung zu schutzwürdigen Gebieten
  - Einhalten von Mindestabständen zu bewohnten Gebieten
  - Berücksichtigung bestehender Nutzungen des Umfeldes
  - Berücksichtigung der hydrogeologischen Situation, z.B. von Schutzgebieten
  - Minimierung von Verkehrsbehinderungen
- Dokumentation
- Kontaktieren von lokalen Behörden und Landeigentümern zur Klärung der Einrichtung des Platzes.

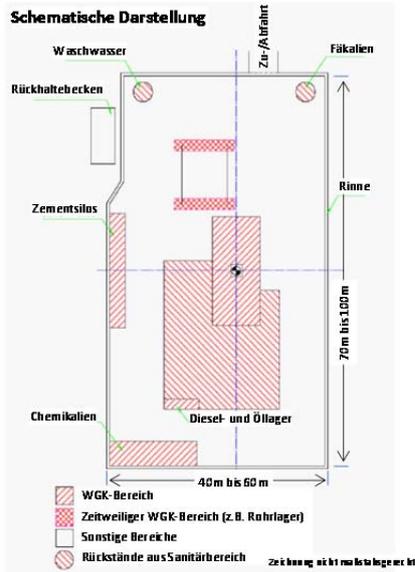
Die Dokumentation der vorgenannten Arbeiten erfolgt in einem Betriebsplan, der der Bergbehörde im Rahmen des Betriebsplanverfahrens zur Zulassung vorgelegt wird. Auf seiner Basis erfolgt die Beteiligung der lokalen Behörden und Landeigentümer.

Auf dem Platz werden die Bohranlage sowie die für ihren Betrieb notwendigen Anlagen, Materialien und das Personal untergebracht. Aus Gründen des Gewässerschutzes werden Bohrplätze so angelegt, dass keine wassergefährdenden Flüssigkeiten in den Boden oder in Gewässer gelangen können. Reichen die geplanten Abstände zur nächsten bewohnten Bebauungen nicht aus, gewährleisten gezielte Maßnahmen, z.B. Schalldämmung/Lichtemission ein Einhalten der Emissions-/Immissionsrichtwerte.

**PRAKTIKEN: BOHRPLATZ-PLANUNG**

- Untersuchung und umfassende Darstellung aller mit der Bohrplatzherstellung einhergehenden Umwelt- und Naturschutz-relevanten Aspekte, insbesondere
  - Einflüsse auf Flora, Fauna und umgebende Naturräume einschließlich der unterirdischen Schutzzonen
  - Beeinträchtigungen von Landschaftsbild, historischen Orten, archäologischen Fundstätten, Anwohnern (hier gelten insbesondere die Schutzgüter Luft, Lärm, Verkehrsbelastung)
  - Darstellung aller Baumaterialien und verwendeter Bauhilfsstoffe
- Aufteilung des Bohrplatzes entsprechend WEG Leitfaden „Gestaltung des Bohrplatzes“
- Auslegung des Wassergefährdungsklassenbereiches (WGK-Bereich) (Bohranlagenunterbau mit Bohrkeller, Maschinenstellfläche, Dieselöllager und ggf. Spülungstanks, Einrichtungen zur Feststoffkontrolle und Bohrgutbehälter), dass wassergefährdende Flüssigkeiten nicht in den Boden eindringen können
- Trennung des WGK-Bereiches von den sonstigen Bereichen durch bauliche Maßnahmen, die auch Starkregen-Niederschlagsmengen berücksichtigen; Verhindern eines Überlaufes durch infrastrukturelle Maßnahmen (z.B. Ablaufsysteme, bedarfsgerechtes Absaugen)
- Platzgestaltung, dass durch Flucht- und Rettungswege jeder Punkt auf dem Bohrplatz jederzeit zugänglich ist
- Maßnahmenplanung, dass auf dem Platz anfallendes Bohrgut, Spülrückstände, geförderte Flüssigkeiten, Abfälle und Niederschlag gesammelt und so weit wie möglich voneinander getrennt und entsorgt werden können
- Darstellung von Bohrplatzausführung und Maßnahmenplanung, speziell der technischen Einrichtungen (versiegelte Flächen, Kanalisation, usw.)
- Darstellung der eigentlichen Bohrarbeiten (technische Prozesse, Ausbau der Bohrung, Abschluss der Bohrung).

Die Mindestanforderungen an Bohrplätze in Deutschland sind im WEG-Leitfaden „Gestaltung des Bohrplatzes“ dokumentiert. Die im Leitfaden dokumentierte schematische Darstellung eines Bohrplatzes ist in Abbildung 4 wiedergegeben). Die dort dokumentierten Grundsätze für einen Ein-Bohrungsplatz gelten sinngemäß auch für Plätze von denen mehrere Bohrungen niedergebracht werden (Cluster-Plätze).



**Abb. 4: Bohrplatz für eine Erdgas-Tiefbohrung**

Der Platz für die Bohranlage sowie die für ihren Betrieb notwendigen Anlagen, Materialien und das Personal wird nach WEG Standard hergestellt. Platzausführung (versiegelte Flächen, Kanalisation, usw.) und Maßnahmenplanung zur Sammlung und Entsorgung des auf dem Platz anfallenden Bohrgutes, von Spülrückständen, geförderten Flüssigkeiten, Abfällen und Niederschlag stellen sicher, dass keine wassergefährdenden Flüssigkeiten in den Boden oder in Gewässer gelangen können. Die Größe der befestigten Bohrplatzfläche ist abhängig von der Größe und vom Typ der Bohranlage. Die Luftbildaufnahme zeigt zusätzliche Flächen am oberen Rand, zur Aufstellung von Wohncontainern bzw. für Parkplätze. Zu erkennen auch die Flächen außerhalb der Befestigung zur Lagerung des Mutterbodens.

Die Dokumentation der vorgenannten Arbeiten erfolgt in einem Betriebsplan, der der Bergbehörde im Rahmen des Betriebsplanverfahrens zur Zulassung vorgelegt wird. Liegt die Betriebsplanzulassung vor, kann der Bohrplatz gemäß genehmigtem Plan und unter Beachtung der relevanten technischen Standards errichtet werden. Dabei gelten die folgenden Grundsätze:

**PRAKTIKEN: PLATZBAU**

- Zum Schutz der Fauna in besonders sensiblen Gebieten, Verlegung von Aktivitäten auf die weniger störenden Jahreszeiten
- Im Rahmen der Herstellung des Bohrplatzes, Abschieben des Oberbodens und Lagerung für spätere landschaftspflegerische Maßnahmen bzw. die Rekultivierung im Falle von Nicht-Fündigkeit.

**Bei Fündigkeit**

- Nach Beendigung der Bohraktivitäten, ggf. Anpassung der Größe des Bohrplatzes an die Erfordernisse des Produktionsbetriebes (in der Regel Verkleinerung des Platzes)
- Ertüchtigung des Platzes zur Errichtung der Gastrocknungsanlage (GTA) nach den Vorgaben der Verordnung über Anlagen zum Umgang mit wassergefährdenden Stoffen und über Fachbetriebe (VAwS)
- Ausgleich der Eingriffe in Natur und Landschaft durch Ausgleichs- und Ersatzmaßnahmen in Absprache mit den beteiligten Behörden (z.B. Einpassung des Platzes in das Landschaftsbild).
- Bei Nicht-Fündigkeit wird eine Bohrung verfüllt, der Bohrplatz zurückgebaut und der ursprüngliche Zustand wiederhergestellt. Die Mindestanforderungen an Verfüllungen sind dokumentiert in der "Richtlinie über das Verfüllen auflässiger Bohrungen" des LBEG (1998), s. auch Tran Viet (2013).

**PRAKTIKEN: VERFÜLLUNG UND RÜCKBAU**

- Verfüllung von Bohrungen unter Beachtung der Vorgaben der „Richtlinie über das Verfüllen auflässiger Bohrungen“ des LBEG.

**4.3. Bohrungsherstellung**

Ziele: Umweltverträgliche Herstellung einer Bohrung, Gewinnung von Information zur Charakterisierung des geologischen Untergrundes und/oder zur Produktion von Kohlenwasserstoffen.

Wichtige gesetzliche Vorgaben:

- Länderverordnung (2006): „Bergverordnung für Tiefbohrungen, Untergrundspeicher und für die Gewinnung von Bodenschätzen durch Bohrungen (BVOT)“

Wichtige technische Empfehlungen:

- API (2010): "API 13A Specification for Drilling Fluids Materials"
- DVGW (1998): Technische Mitteilung Merkblatt W116 „Verwendung von Spülungsätzen in Bohrspülungen bei Bohrarbeiten im Grundwasser“

Die Herstellung des Bohrlochs erfolgt üblicherweise nach dem Rotary- oder Drehbohrverfahren mit kontinuierlichem Bohrkleinaustrag mittels umlaufender Bohrspülung. Die Herstellung einer Bohrung besteht aus mehreren Zyklen von Bohren-Verrohren-Rohre Zementieren. Mit jedem Zyklus wird der Bohrlochdurchmesser kleiner, da der neue Abschnitt aus der davor installierten Rohrtour heraus gebohrt und verrohrt werden muss. Der letzte Zyklus der Bohrungsherstellung ist die Komplettierung (Installation der für eine Produktion erforderlichen Untertage Ausrüstung).

Typische Bohrspülungen bestehen in der Regel aus Wasser, Ton, sowie Additiven zur Kontrolle von Filtratverlusten, Dichte und Viskosität. Die Spülung transportiert das Bohrklein zutage, schmiert und kühlt das Bohrwerkzeug, stabilisiert die Bohrlochwand und verhindert durch ihre Dichte Zuflüsse in das Bohrloch. Um diese Funktionen erfüllen zu können, muss die Spülflüssigkeit eine geeignete Zusammensetzung und geeignete rheologische Eigenschaften haben.

**PRAKTIKEN: BOHRSPÜLUNG**

- Für Bohrspülungen zum Durchteufen von oberflächennahen Grundwasserhorizonten werden Tonspülungen auf Süßwasserbasis mit Zusätzen wie zum Beispiel Natriumkarbonat, Stärke und Cellulose eingesetzt
- Spülungszusätze, die beim Durchteufen von Grundwasserhorizonten eingesetzt werden, sind beschränkt auf Substanzen für die Unbedenklichkeitsbescheinigungen vorliegen, z.B. durch das Hygiene Institut des Ruhrgebietes in Gelsenkirchen
- Der notwendige/zulässige Dichtebereich der Spülung wird mit Hilfe von Informationen aus Referenzbohrungen und/oder mit Prognosemethoden zur Porendruck- und Aufbrechdruck-Bestimmung ermittelt und während der Herstellung der Bohrung eventuell angepasst
- Die Spülungseigenschaften für das Bohren unterhalb der Ankerrohrtour werden auf Basis der erwarteten Litho-Stratigraphie und der Informationen aus Referenzbohrungen abgeleitet und während der Herstellung der Bohrung eventuell angepasst.

„Mud logging“ oder „Sampling“ bezeichnet den Prozess der Bewertung des zu Tage geförderten Bohrkleins und der Dokumentation der Ergebnisse zusammen mit relevanten Bohrparametern im sogenannten „Mud Log“ oder „Sampler Log“.

Nach Abschluss der Bohrarbeiten eines Bohrabschnittes wird das offene Bohrloch vor Einbau der Rohre und ihrer Zementation vermessen. Die durchgeführten Bohrlochmessungen haben unterschiedliche Ziele, darin enthalten die Identifikation und die Bewertung kohlenwasserstoffführender Formationen.

**PRAKTIKEN: SAMPLING UND LOGGING (s. auch 3.2.)**

- Überwachung des Bohrprozesses durch Probenahme und Anfertigen einer kontinuierlichen Aufzeichnung der relevanten Bohrparameter, Gas- oder Ölanzeichen und der aus dem Bohrklein abgeleiteten Lithologie sowie
  - Messung von Änderungen des Bohrspülungsvolumens
  - Registrierung von Gaszuflüssen
  - Registrierung von Änderungen der Spülungsdichte
- Im Bedarfsfall Ziehen von Kernen zur Gewinnung repräsentativer Gesteinsproben

- Durchführung von Bohrlochmessungen zur Bestimmung geophysikalischer und petrophysikalischer Gesteinseigenschaften unter anderem zur Unterstützung der Bestimmung der Lithologie
- Durchführung von Bohrlochmessungen zur Feststellung des Bohrlochverlaufes und ggf. des Bohrlochvolumens
- Ggf. Durchführung von Drucktesten zur Bestimmung von Porendrücken und/oder weiteren Drücken, die für hydraulische Behandlungen relevant sind.

#### **4.4. Verrohrung**

Ziele: Zusammen mit der Zementation, Stabilisierung des Bohrlochs und Verhinderung einer Migration von Fluiden hinter den Rohren in angrenzende geologische Schichten.

Wichtige gesetzliche Vorgaben:

- Länderverordnung (2006): „Bergverordnung für Tiefbohrungen, Untergrundspeicher und für die Gewinnung von Bodenschätzen durch Bohrungen (BVOT)“

Wichtige technische Empfehlungen:

- API (2006): “API SPEC 5CT/ISO 11960, Specification for Casing and Tubing”
- API (2009): “Guidance Document HF1: Hydraulic Fracturing Operations - Well Construction and Integrity Guidelines”
- API (2010): “API SPEC 5B, Specification for Threading, Gauging, and Thread Inspection of Casing, Tubing, and Line Pipe Threads”
- WEG (2006): „Technische Regel - Futterrohrberechnung“

Das Bohrloch wird in geplanten oder durch potentielle Bohrlochprobleme diktierten Teufen mit Stahlrohren – Futterrohre oder Casings genannt – verrohrt und zementiert. Neben der Stabilisierung des Bohrloches dient das Verbundsystem aus Stahlrohr und Zementmantel dem Schutz der oberflächennahen Grundwasserhorizonte sowie der Trennung von Horizonten mit unterschiedlichen Porendrücken, um sicher den nächsten Teufenabschnitt mit den dafür notwendigen Spülungseigenschaften erbohren zu können.

Grundsätzlich werden mehrere Rohrtouren eingebracht, um die Zielformation zu erreichen. Die Rohrtour für den ersten Bohrlochabschnitt wird Standrohr genannt. Es wird entweder gerammt oder der Bohrlochabschnitt wird für das Einbringen des Standrohres gebohrt. Diese Rohrtour hat die Aufgabe ein Unterspülen der Fundamente der Bohranlage und des Bohrplatzes zu verhindern und überdeckt oberflächennahe Grundwasserhorizonte. Die nachfolgende Ankerrohrtour soll die für eine öffentliche Nutzung vorgesehenen tieferen Grundwasserleiter als Barriere überdecken, die nachfolgenden Rohrfahrten tragen und die erste Bohrlochabsperzung aufnehmen. Falls erforderlich folgt eine Zwischenrohrtour, die rein bohrtechnische Aufgabenstellungen zu erfüllen hat. Die Produktionsrohrtour ist die letzte einzubringende Rohrtour. Sie nimmt die Komplettierung auf und wird ggf. während der hydraulischen Behandlung und der nachfolgenden Produktion belastet.

Die tieferen Rohrtouren können entweder bis an die Oberfläche geführt oder sie können im unteren Bereich der vorangegangenen Rohrtour als sogenannter Liner verankert, abgesetzt und zementiert werden.

So verrohrt befinden sich im oberen Bereich der Bohrung mehrere Rohrtouren zwischen Produktionsrohrtour und den oberflächennahen Wasserhorizonten beginnend mit dem Standrohr und der Ankerrohrtour als äußere, grundwassernächste Verrohrungen, wobei die Ankerrohrtour alle weiteren Futterrohre trägt. Auch die Absperreinrichtungen, die so genannten „Blow-Out-Preventer“ (BOP), sind mit der Ankerrohrtour direkt oder über Doppelflange verbunden. Sie dienen dazu, die Bohrung sicher abzusperrern, wenn der angetroffene Porendruck über dem hydrostatischen Druck der Spülungssäule liegt und es Anzeichen gibt, dass Formationsfluide in das Bohrloch eindringen.

**PRAKTIKEN: VERROHRUNGSSCHEMA**

- Wahl eines Verrohrungsprogramms das unter den am Standort gegebenen geologischen und technischen Bedingungen Gewähr bietet für eine sichere Herstellung der Bohrung, mögliche Behandlungen und einen sicheren Produktionsbetrieb
- Absetzen des Standrohres in einem massiven und tragfähigen Gestein oder nach Erreichen eines vorgegebenen Energiewertes zum Einrammen
- Absetzen der Ankerrohrtour unterhalb der oberflächennahen Nutzwasserhorizonte in einer standfesten, integren Formation und Zementation bis zu Tage
- Wahl der Absetzteufen der nachfolgenden Rohrtouren unter Berücksichtigung der Gebirgsfestigkeit und der zu erwartenden Drücke, die ein Aufbrechen des Gebirges in dem jeweils unverrohrten Teil des Bohrloches vermeiden, z. B. wenn ein unerwarteter Zufluss von Formationsfluiden stattfindet, der auszirkuliert werden muss
- Kontrolle und Nachweis der stratigraphischen Teufe durch die Entnahme und Untersuchung von Bohrkleinproben in vorher definierten Abständen über die gesamte Bohrstrecke.

Futterrohre und Rohrverbinder müssen auf die Belastungen, denen die Rohrtour über ihren Lebenszyklus ausgesetzt ist, ausgelegt sein. Belastungen sind insbesondere Außendruckbelastungen durch Bohrlochfluide, verbleibende Spülung hinter den Rohren oder auch plastische Gesteine (Tone, Salze), Innendruckbelastungen (z.B. Druckteste oder Stimulationsmaßnahmen) und Belastungen in axialer Richtung (z.B. Eigengewicht beim Einbau) sowie Biegebelastungen im Falle von großen Änderungen von Neigung und Richtung der Bohrung, WEG (2006).

**PRAKTIKEN: FUTTERROHR-AUSLEGUNG**

- Auslegung der Futterrohre nach WEG Regeln für die axialen Belastungen sowie Außendruck- und Innendruckbelastungen entsprechend den erwarteten Drücken bei hydraulischen Behandlungen und Belastungen während der Produktion unter

- Berücksichtigung der Festigkeitswerte, berechnet nach API Bul 5C3/ISO 10400 oder wie vom Rohrhersteller angegeben
- Quantitative Überprüfung der Rohrdimensionierungen durch Benutzung von akzeptierten und in technischen Regelwerken dokumentierten Rechenmethoden
- Berücksichtigung der Untertage-Umgebungstemperatur für die Minderung der Streckgrenze (sog. Warmstreckgrenze)
- Für abgelenkte und horizontale Bohrungen, Berücksichtigung von Biegebelastungen während des Einbaus
- Auslegung des Rohrmaterials auf eventuell auftretende korrosive Fluide.

Die eingebrachten Rohrtouren bestehen aus einzelnen Rohren, die miteinander verschraubt werden. Je nach Art der Rohrverbindung sind die einzelnen Rohre nach Hersteller-/Auftraggeber-Angaben zu verschrauben, um die nötige Tragfähigkeit im Verbinder zu erreichen und die gewünschte Dichtheit gegenüber Fluiden im erwarteten Beanspruchungsbereich zu gewährleisten.

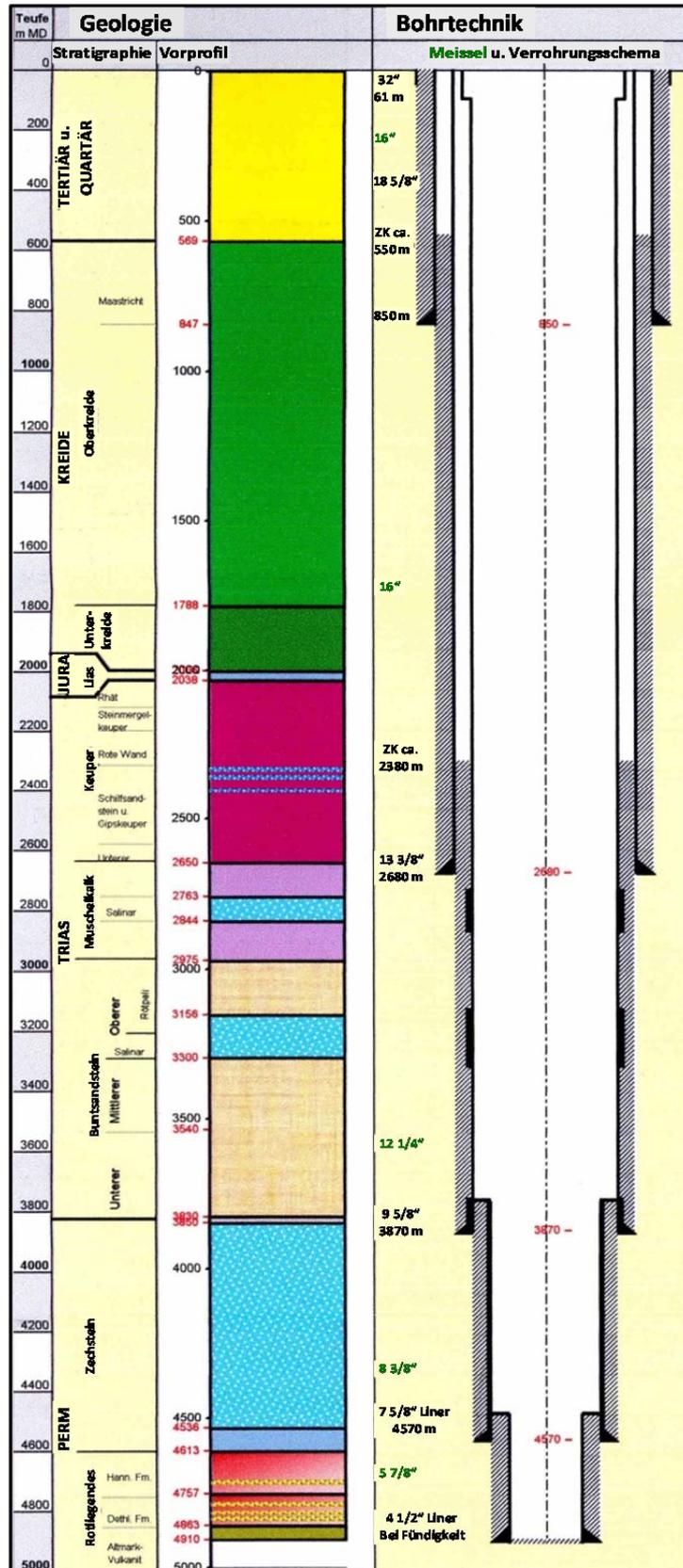
Futterrohre bestehen aus hochwertigen Vergütungsstählen und werden bereits Herstellerseitig einem technisch aufwändigen Prüfprozess unterzogen, der im Falle von Rohren für Produktionsrohrfahrten von einem vom Besteller eingesetzten Sachverständigen überwacht wird. Die Prüfung schließt einen Innendrucktest mit Wasser auf Nenndruck ein.

Die Prüfung der eingebauten Rohrtouren auf Dichtheit erfolgt im Rahmen von Innen-Drucktesten oder Innen-Druckentlastungstesten, siehe 4.6.

#### **PRAKTIKEN: FUTTERROHR-EINBAU**

- Konditionierung des Bohrloches, um die Rohrtour einbauen zu können
- Herstellen der Rohrverbindungen während des Einbaus nach den Vorgaben der Hersteller
- Bei gasdichten Verbindern mit Metall auf Metall Dichtung (sog. Premium-Verbinder): Kontrolle und Protokollierung der Verschraubung über eine computerunterstützte Drehmomentaufzeichnung mit Verschraub-Diagramm zur elektronischen und visuellen Auswertung
- Ggf. Zentrierung der Rohrtour, mit Hilfe von Zentrierkörben, für eine optimale Platzierung des Zementes

Ein Beispiel für die Auslegung einer Tiefbohrung ist in Abbildung 5 wiedergegeben.



**Abb. 5: Auslegung einer Tiefbohrung**

Bohrungen werden hergestellt als dichte Verbindung zwischen Lagerstätte und Oberfläche. Hierzu werden sektionsweise Stahlrohre in das Bohrloch eingebracht und der Ringraumes zwischen Stahlrohren und Gebirge zementiert. Die Absetzteufen der Stahlrohrtouren werden bestimmt durch die geologischen und hydrogeologischen Bedingungen am Standort. Die Auslegung der Rohrtouren und der Rohrverbinder erfolgt nach dem Regelwerk des WEG Die Integrität des geschaffenen technischen Bauwerkes wird im Rahmen der Herstellung überprüft und während des sich anschließenden Betriebes laufend kontrolliert.

#### **4.5. Zementation**

Ziele: Zusammen mit der Verrohrung, Stabilisierung des Bohrlochs und Verhinderung einer Migration von Fluiden in angrenzende geologische Schichten.

Wichtige gesetzliche Vorgaben:

- Länderverordnung (2006): „Bergverordnung für Tiefbohrungen, Untergrundspeicher und für die Gewinnung von Bodenschätzen durch Bohrungen (BVOT)“

Wichtige technische Empfehlungen:

- API (2008): “API 10TR4, Selection of Centralizers for Primary Cementing Operations”
- API (2008): “API 10TR1, Cement Sheath Evaluation”
- API (2009): “Guidance Document HF1: Hydraulic Fracturing Operations - Well Construction and Integrity Guidelines”
- API (2010): “API RP 10D-2/ISO 10427-2, Centralizer Placement and Stop Collar Testing”
- API (2010): “API SPEC 10A/ISO 10426-1, Cements and Materials for Well Cementing”
- API (2013): “API RP 10B-2/ISO 10426-2, Testing Well Cements”

Zur Zementierung der in das Bohrloch eingebrachten Rohrtouren wird eine Zement-Suspension durch die Rohrtour in das Bohrloch und um den Rohrschuh herum in den Ringraum eingepumpt. Dabei wird die im Ringraum befindliche Spülung nach oben verdrängt. Ziel ist es, diesen Ringraum bis zu Tage bzw. bis zu einer vorher definierten Höhe vollständig mit einem dichten Zementstein auszukleiden, der die Rohre allseitig umschließt.

Die Auslegung einer Zementation erfordert insbesondere die Kenntnis des erforderlichen Zementationsvolumens sowie der Dichte und Zementhöhe, die ein Aufbrechen der Formation vermeidet.

**PRAKTIKEN: ZEMENTATIONSPLANUNG**

- Untersuchung von Referenzbohrungen auf Zementationsprobleme
- Bestimmung des Bohrlochvolumens durch Kalibermessung
- Planung der Ankerrohrtour-Zementation bis zu Tage
- Beschränkung von Zusätzen für die Zementation der Ankerrohrtour auf Substanzen für die Unbedenklichkeitsbescheinigungen vorliegen
- Planung der Zementation der Zwischenrohrtour und der Produktionsrohrtour – abhängig von technischen und geologischen Gegebenheiten – bis zu einer planmäßig festgelegten Teufe
- Einsatz von Zentrierkörben und Optimierung ihrer Platzierung, um ein möglichst großes „Stand-Off-Ratio“ der eingebauten Rohre zu erhalten
- Planung von Zementgüten/-dichten auf der Basis von Poren- und Aufbrechdruck-Prognosen (siehe Abschnitt 3.2.). Sicherstellen, dass der hydrostatische Druck der Zementsäule den Formationsporendruck beherrscht ohne dass Zementverluste zu erwarten sind
- Abstimmung der Dichten und der rheologischen Eigenschaften der Spülung, der Zementbrühe und des Trennfluids zwischen Spülung und Zementbrühe, sodass eine maximale Spülungsverdrängung durch Trennfluid und Zementbrühe erreicht wird
- Für Rohrtouren, die während einer hydraulischen Behandlung belastet werden, müssen die Zementsteineigenschaften angepasst werden, um die Bildung von Rissen im Zementmantel im Zuge der Behandlung zu verhindern
- Auslegung der Abbindezeit (Versteifungszeit) der Zementbrühe unter Berücksichtigung der realen Bohrlochtemperatur.

Die Ausführung einer Zementation von hoher Qualität erfordert eine gute Zentrierung der zu zementierenden Rohrtour und eine Vermeidung größerer Vermischungszonen zwischen Zementbrühe und Bohrspülung.

**PRAKTIKEN: ZEMENTATIONSAUSFÜHRUNG**

- Labor-Untersuchung von Rezepturen der hergestellten Zementbrühe vor dem Verpumpen (z.B. Rheologie, Festigkeitsentwicklung, Freiwasser, Verträglichkeit mit Trennfluid und Bohrspülung) und ggf. Entnahme von Rückstellproben von Trockenmaterial und Zementbrühe für weitergehende Untersuchungen
- Prüfung der "Durchpumpbarkeit" des Bohrloches
- Spülungskonditionierung, um eine maximale Verdrängung durch das Trennfluid und die Zementbrühe zu erreichen

- Wenn möglich, Bewegung des Rohrstranges während der Zementation, bevorzugt drehend
- Ausreichende Wartezeit für die Zementabbindung gewährleisten.

Die Kontrolle der jeweils ausgeführten Zementation wird im Folgeabschnitt 4.6. beschrieben.

#### **4.6. Integrität und Kontrolle**

Die Prüfung der eingebauten Rohrtouren auf Dichtheit erfolgt nach deren Einbau und Zementation im Rahmen eines Innendrucktestes mit Spülung vor dem Herausbohren aus der jeweiligen Rohrtour. Der Testdruck ergibt sich aus dem höchstens zu erwartenden Druck am Rohrschuh beim Bohren, Verrohren und Zementieren des nächsten Bohrabschnitts. Die (letzte) Produktionsrohrtour bzw. -liner wird mit einem Testdruck belastet, der eine Beanspruchung erzeugt, wie sie bei einer hydraulischen Behandlung zu erwarten ist, sofern diese Rohrtour im Rahmen der Behandlung belastet wird.

Die Testdauer sollte mindestens 30 Minuten betragen. Dichtheit wird unterstellt, wenn eine Tendenz hin zu einem stabilen Druckendwert erkennbar ist, der mehr als 90% des Ausgangswertes beträgt. Der beobachtete Rückgang des Druckes spiegelt in der Regel keinen Fluidverlust durch Leckagen wider, sondern ist Ausdruck für das viskoelastische/viskoplastische Verhalten des komplexen Verbundsystems "Bohrlochkopfausrüstung, Spülung in den Rohren-Verrohrung, Zementmantel (oder Restspülung hinter den Rohren) und Gestein".

Zur Kontrolle der ausgeführten Zementation werden Bohrlochmessungen und Tests durchgeführt. Bei den Bohrlochmessungen handelt es sich um Temperaturmessungen und um akustische Messungen, mit denen unter entsprechenden Randbedingungen zementierte und nicht zementierte Intervalle erkannt werden können und je nach Messmethode unter entsprechenden Randbedingungen auch die Qualität der Zementation bestimmt werden kann. Zementkopfbestimmungen über die Temperatur sind möglich, weil die chemischen Reaktionen während der Zement-Abbindung zu einer kurzfristigen Erhöhung der Temperatur im zementierten Bereich führen (ca. 12 - 24h). Die akustischen Verfahren messen in ihrer einfachsten Form den Verlust von Energie, den ein akustisches Signal auf seinem Wege durch das System Stahlrohr-Zement-Gebirge von einem Sender zu einem Empfänger erfährt. Dieser wird dann in Relation gesetzt zu dem Anteil des Rohrumfanges, der von Zement umschlossen ist.

Bei den Testen handelt es sich um Druckteste oder auch Entlastungsteste nach Aufbohren des Zementes. Die Druckbeaufschlagung erfolgt entweder bis zum höchsten zu erwartenden Druck am Rohrschuh beim Bohren, Verrohren und Zementieren des nächsten Bohrabschnitts in einem Formation Integrity Test bzw. bis zum Leakoff in einem Leakoff Test (zur Ermittlung des Aufbrechdruckes) bzw. in einem „Extended Leakoff Test“ (zur Ermittlung des Aufbrechdruckes und der minimalen Hauptnormalspannung).

Die Durchführung der Messungen, der Druckteste wie auch die Fortführung von Bohrarbeiten erfordert ein angemessenes Abbinden des Zementes. Um Schädigungen des Zementsteines während des Abbinde-Prozesses zu vermeiden gilt als allgemeine Regel, dass Arbeiten erst nach Erreichen einer vorher festgelegten Festigkeit fortgeführt werden. Die Abbinde-Zeit bis zum Erreichen dieser Festigkeit ist abhängig von der Art des Zementes, Temperatur, Druck sowie dem Einsatz von Abbinde-Beschleunigern.

**PRAKTIKEN: INTEGRITÄT UND KONTROLLE**

- Messungen (z.B. Temperaturmessungen) zur Bestimmung des Zementkopfes
- Bei Bedarf sowie für Produktionsrohtouren, Nachweis der Qualität der Zementation durch akustische Bohrlochmessungen
- Vor Aufbohren des Zementes, Durchführung eines Drucktestes zur Dichtheitsprüfung der Bohrlochverrohrung mit einem für die jeweilige Verrohrung relevanten Druck. Bei Linern kann die Dichtheit alternativ durch einen Zuflusstest (Entlastungstest) Bohrloch nachgewiesen werden
- Nach Aufbohren des Zementes, Durchführung eines Drucktestes zur Feststellung der Integrität der Rohrschuh-Zementation sowie der Druckfestigkeit des Gebirges unterhalb des Rohrschuhes.

**5. Bohrungskomplettierung****5.1. Untertageausrüstung**

Ziele: Schutz der zementierten Verrohrung, Herstellen einer effektiven Kommunikation zum erwünschten Förderhorizont, Lösung von Produktionsproblemen.

Wichtige gesetzliche Vorgaben:

- Länderverordnung (2006): „Bergverordnung für Tiefbohrungen, Untergrundspeicher und für die Gewinnung von Bodenschätzen durch Bohrungen (BVOT)“

Wichtige technische Empfehlungen:

- API (2005): “API standard 14B, Design, Installation, Repair and Operation of Subsurface Safety Valve System”
- API (2006): “API SPEC 5CT/ISO 11960, Specification for Casing and Tubing”
- API (2009): “Guidance Document HF1: Hydraulic Fracturing Operations - Well Construction and Integrity Guidelines
- API (2010): “API SPEC 5B, Specification for Threading, Gauging, and Thread Inspection of Casing, Tubing, and Line Pipe Threads”

Zur Aufnahme der Produktion werden Bohrungen „komplettiert“. Die Komplettierung erfolgt, wenn der Bohrprozess abgeschlossen ist. Im Rahmen der Komplettierung werden in der Regel (1) die zu fördernden Horizonte durch die letzte Rohrtour verrohrt; (2) der Ringraum zwischen Stahlrohr und Bohrlochwand zementiert; (3) das Steigrohr (Tubing) in das Bohrloch

eingbracht; (3) der Bohrlochkopf mit den Vorrichtungen zum Öffnen und Schließen des Bohrloches installiert; (4) im Falle zementierter Endverrohrungen die Verrohrung im Lagerstättenbereich mit Sandstrahl-, Kugel- oder Hohlladungsperforatoren perforiert.

Alternativ zu einer auch für die Produktion geeigneten Installation kann ein ausschließlich für die hydraulische Behandlung vorgesehener Strang (als Ersatz für das oben beschriebene Tubing) eingebracht werden. Dabei kommt ein Bohrlochkopf zum Einsatz der für hydraulische Behandlungen zugelassen ist.

Alternativ zur Zementation der letzten Rohrkolonne kann, insbesondere in Horizontalbohrungen, die letzte Verrohrung auch mit unzementierten Spezial-Linern (z.B. Liner versehen mit Schiebmunnen und Außenpacker, Schlitzliner oder vorgebohrtem Liner) erfolgen, die unter anderem speziell für Mehrfach-Behandlungen entwickelt wurden.

Das Steigrohr ist ein Stahlrohr kleineren Durchmessers, das mit Hilfe eines „Packers“ (hydraulisches Dichtelement) an seinem unteren Ende im verrohrten Bohrloch verankert wird. Das Steigrohr besteht in der Regel aus ca. 9 m langen Rohren, die miteinander dicht verschraubt werden. Je nach Anforderung beinhaltet der Steigrohrstrang verschiedene Spezial-elemente wie Untertage-Sicherheitsventil, Schiebemuffe, Nippel-Profile etc.

Mit dem Steigrohr wird eine weitere Barriere zwischen Förder-/Injektionsmedien zu potentiellen Nutzwasserhorizonten geschaffen, deren Integrität durch Beobachtung des Druckes im (ersten) Ringraum zwischen Steigrohr und Produktionsrohrtour in Verbindung mit einem Produktionspacker überwacht wird.

#### **PRAKTIKEN: KOMPLETTIERUNGSPLANUNG**

- Zuverlässige Beschreibung der erwarteten Betriebszustände und Berechnung der triaxialen Belastungen des Steigrohres (Kollaps-, Berst- und Axiallast) mittels geeigneter Software
- Auslegung des Steigrohres insbesondere Material, Geometrie und Verbinder Design für die gegebenen Lagerstättenfluide und Bohrlochbedingungen unter Berücksichtigung der normativen Vorgaben wie unter 4.4 für API und Non-API Rohre und Verbinder beschrieben
- Auslegung von Packer und eingebrachten Spezialelementen für die gegebenen Lagerstättenfluid und Bohrlochbedingungen
- Planung eines Untertagesicherheitsventils für den automatischen Verschluss der Bohrung im Falle des Versagens der Obertage-Ausrüstung mindestens gemäß Vorgabe BVOT
- Auslegung des Bohrlochkopfes für die gegebenen Bedingungen
- Für zu behandelnde Bohrungen, Auslegung der Komplettierung auf die zu erwartenden Behandlungs-Drücke bzw. Planung eines speziellen Behandlungsstranges

- Erstellung einer Dokumentation zur Komplettierung inklusive unterstützender Ausarbeitungen.
- Die Dokumentation der vorgenannten Arbeiten erfolgt in einem Betriebsplan, der der Bergbehörde im Rahmen des Betriebsplanverfahrens zur Zulassung vorgelegt wird. Liegt die Betriebsplanzulassung vor, kann komplettiert werden.

**PRAKTIKEN: KOMPLETTIERUNG**

- Herstellung der Steigrohr-Verbindungen unter Beachtung der Hersteller-Vorgaben
- Computergestützte Kontrolle zum Nachweis der Verschraubqualität
- Nachweis der Dichtheit der Installation durch entsprechende Druckprüfung (Well-head , Ringraumdruckprobe, Steigrohrdruckprobe).

**6. Hydraulische Bohrlochbehandlung**

Zur Verbesserung der Zufluss-Verhältnisse in eine Bohrung werden Bohrungen hydraulisch behandelt. Der Vorgang, auch als „Hydraulic Fracturing“ oder Fracking bekannt, bezeichnet den Prozess der Erzeugung und Ausbreitung (oder auch Öffnen) eines oder mehrerer Risse in einer Gesteinsschicht. In einer Bohrung kann dieser Vorgang mehrmals wiederholt werden. Die Risse repräsentieren Wegsamkeiten, die einige zehn bis zu wenige hundert Meter weit in die Formation hineinreichen können und den Zufluss ins Bohrloch verbessern. Die Behandlung wird mit einer Flüssigkeit durchgeführt, die unter hohem Druck durch die Verrohrung einer Bohrung und durch die planmäßigen Öffnungen in der Verrohrung in die Zielformation verpumpt wird. Mit Überschreiten des Aufbrech-Druckes werden in der Zielformation Risse initiiert. Wird der Pumpvorgang fortgesetzt, wachsen die initiierten Risse tiefer ins Gebirge hinein. Wird er gestoppt, fließt die in den Rissen noch vorhandene Behandlungs-Flüssigkeit gänzlich in die Formation ab und die künstlichen Risse beginnen sich unter dem herrschenden Gebirgsdruck zu schließen. Um ein vollständiges Verschließen und Verheilen der Risse zu verhindern, werden den Behandlungs-Flüssigkeiten in der Regel Stützmittel, z.B. Sand, zugegeben, die in den Rissen verbleiben.

Die Risse wachsen in Richtung des kleinsten Widerstandes, d.h. senkrecht zur kleinsten Hauptspannung. In Teufen größer als ca. 600 m ist die vertikale Spannung die größte der Hauptspannungen. Unterhalb dieser Teufe werden üblicherweise vertikale Risse erzeugt. Für Teufen geringer als ca. 600 m ist die vertikale Spannung meist die kleinste der Hauptspannungen, was horizontale Riss-Komponenten bis hin zu horizontalen Rissen zur Folge hat. Riss-Ausdehnungen in vertikaler Richtung sind grundsätzlich geringer als die in horizontaler Richtung, weil die Wechsellagerung der geologischen Schichten mit unterschiedlichen Eigenschaften und Horizontalspannungen das Höhenwachstum beeinflusst und die Deckschichten von Lagerstätten auch Barriere-Schichten für die Ausbreitung von Rissen darstellen. Längen und Höhen (oder Weiten im Falle horizontaler Risse) sind abhängig von der verpumpten Flüssigkeitsmenge, der Rheologie der verpumpten Flüssigkeit und der Geologie, Economides und Martin (2007).

### 6.1. Planung von hydraulischen Bohrlochbehandlungen

Ziel: Optimale Auslegung und Durchführung der hydraulischen Bohrlochbehandlung, die eine Ausbreitung der erzeugten Risse in die überlagernde Barriere-Schicht begrenzt.

Wichtige gesetzliche Vorgaben:

- Bundesrechtsverordnung (1990): „Verordnung über die Umweltverträglichkeitsprüfung bergbaulicher Vorhaben (UVP-V Bergbau)“
- Länderverordnung (2006): „Bergverordnung für Tiefbohrungen, Untergundspeicher und für die Gewinnung von Bodenschätzen durch Bohrungen (BVOT)“
- LBEG (2012): „Rundverfügung: Mindestanforderungen an Betriebspläne, Prüfkriterien und Genehmigungsablauf für hydraulische Bohrlochbehandlungen“

Wichtige technische Empfehlungen:

- API (2009): “Guidance Document HF1: Hydraulic Fracturing Operations”
- API (2011): “Guidance Document HF3: Practices for Mitigating Surface Impacts Associated with Hydraulic Fracturing”

Die Planung von hydraulischen Bohrlochbehandlungen wird mit Hilfe von Computer Modellierungssoftware vorgenommen. Die Anwendung dieser Software Systeme erfordert eine gute Charakterisierung der zu behandelnden Formation und seiner Deckschichten, insbesondere ihrer geomechanischen Eigenschaften und Spannungsverteilung. Die hierzu erforderliche Information liegt meist in der gewünschten Qualität aus (vorzugsweise stimulierten) Referenzbohrungen vor, bzw. der Bohrung, in der die Maßnahme erfolgen soll.

Zur Zuverlässigkeit der Prognosen in Bezug auf die Rissgeometrie gibt es insbesondere mikro-seismische Messungen in mehreren tausend Bohrungen in den USA, die für ungestörte Formationen eine relativ gute Übereinstimmung mit den Prognosen zeigen, Fisher und Warpinski (2012). In den Messungen wurde auch die zuvor beschriebene mit abnehmender Tiefe einhergehende Zunahme der horizontalen Komponente von Rissen bestätigt, bis hin zu horizontalen Rissen in oberflächennahen Formationen.

Für Deutschland wurden erfolgreiche mikro-seismische Messungen bislang nur in der Schiefergasbohrung Damme 3 durchgeführt, die jedoch noch nicht veröffentlicht sind. Alle anderen Versuche, die Behandlungsinduzierte Seismizität aufzunehmen, scheiterten an der zu großen Distanz zwischen erzeugtem Riss Aufnahmegegeräten, siehe auch 6.4.3. Qualitative Aussagen zu den Dimensionen erzeugter Risse liegen für deutsche Tight Gas Bohrungen seit Ende der 70er Jahre vor. Sie legen nahe, dass die für die Modellierung vorgenommene Vereinfachung der Riss-Geometrie auf (nur) zwei gegenüberliegende Risse zu einer Überschätzung des Risswachstums führt, Brinkmann et al. (1980), Reinicke et al. (1983). Wie in verschiedenen mine-back Testen nachgewiesen, ist die Komplexität realer Rissysteme größer, Fisher und Warpinski (2012), was die Überschätzungen erklären kann. Für den Fall,

dass aus Referenzbohrungen die für eine Planung notwendigen Informationen in Umfang und Qualität nicht vorliegen, können der eigentlichen hydraulischen Behandlung verschiedene Vor-Injektionen vorangestellt werden, um weitere Informationen zu gewinnen, z.B.:

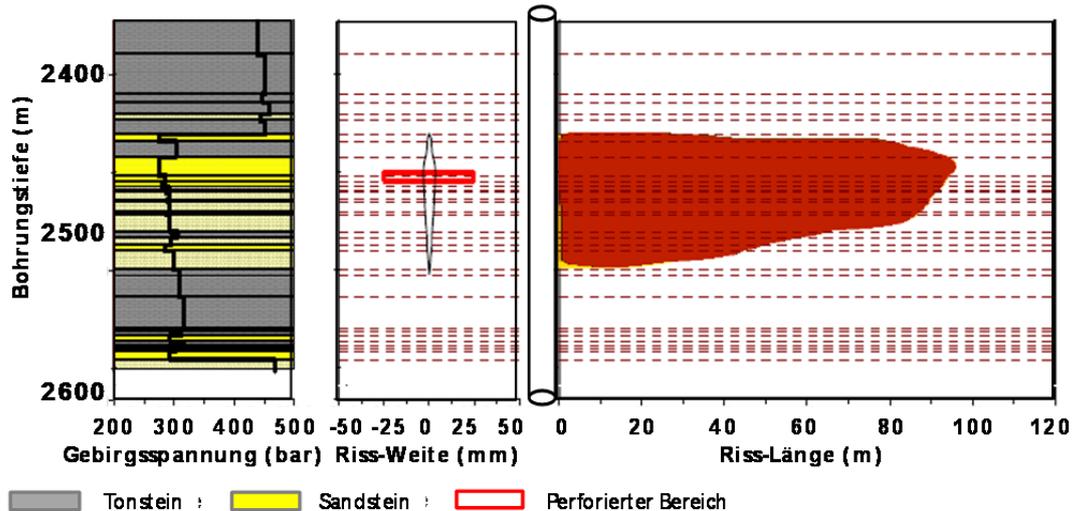
- Breakdown-Test: Flüssigkeitsinjektion zur Ermittlung von Aufbrechdruck und Aufnahmevermögen der Formation
- Stepdown-Test: Behandlungs-Fluid Injektion ohne Stützmittel mit verschiedenen Raten zur Ermittlung von Reibungsdruckverlusten und Optimierung der Behandlungsgröße
- Daten-Frack: Behandlungs-Fluid Injektion ohne bzw. mit Stützmitteln zur Gewinnung von Daten für diagnostische Studien, auf deren Basis die Kennwerte der Behandlung in sehr kurzer Zeit überprüft und endgültig festgelegt oder verfeinert werden können. Werden Stützmittel verpumpt, lassen sich dadurch auch Reibungsverluste und Aufnahmevermögen für Stützmittel während der eigentlichen Behandlung verbessern.

**PRAKTIKEN: PLANUNG EINER HYDRAULISCHEN BOHRLOCHBEHANDLUNG**

- Untergrund-Charakterisierung wie in Abschnitt 3.2 und 3.3 beschrieben
- Ggf. Durchführung von Vor-Injektionen zur Gewinnung weiterer Informationen
- Planung einer hydraulischen Behandlung mit Hilfe von allgemein anerkannten Verfahren
- Grundsätzlich Anwendung von kommerziell verfügbaren Simulatoren
- Behandlungs-Design mit einem nicht signifikanten Riss-Höhenwachstum in die überlagernde Barriere-Schicht
- Behandlungs-Design mit einem Riss-Längenwachstum, das die Einhaltung von Mindestabständen zu geologischen Störungen und benachbarten Bohrungen in der Zielformation gewährleistet
- Überprüfung von Methodik und Parametern durch einen anerkannten Experten
- Planung der Durchführung der hydraulischen Behandlung
- Für bereits existierende ältere Bohrungen ggf. zusätzliche Nachweise der Bohrungseignung durch (1) Abdrücken der Rohrtouren, die während der Behandlung direkt beansprucht werden, mit dem geplanten max. Behandlungsdruck; (2) Erneute Bohrlochmessungen und Auswertungen zur Feststellung der Zementationsqualität
- Vorsorge durch Ermittlung möglicher Zwischenfälle und ihres Ausmaßes (z.B. mögliches Austrittsvolumen) sowie darauf aufbauend Erstellen eines Gefahrenabwehrplanes, mit den für die jeweiligen Zwischenfälle vorgesehenen Maßnahmen zur Begrenzung der Folgen (Behörden, Unternehmen, Sanierungsverfahren, Material etc.)
- Erstellung eines Monitoring Konzeptes zur Überwachung von Behandlung und Behandlungsergebnis
- Erstellung eines Entsorgungs- oder Recyclingkonzeptes für rückgeführte Flüssigkeiten

- Erstellen einer Dokumentation nach den Vorgaben der „Rundverfügung: Mindestanforderungen an Betriebspläne, Prüfkriterien und Genehmigungsablauf für hydraulische Bohrlochbehandlungen“ mit den Inhalten
  - Umfang und technische Durchführung
  - Druck während der hydraulischen Behandlung
  - Bohrlochbild
  - Förderprofil und Förderprognose
  - Schutzgebiete (Naturschutzgebiete, Nationalpark, Biosphärenreservate, Landschaftsschutzgebiet, Naturpark, Naturdenkmal, geschützte Landschaftsbestandteile, Biotope, FFH-Gebiete)
  - Gewässerschutz
  - Bebauung
  - Bohrlokation und hydrogeologische Standortcharakterisierung
  - Behandlungs-Ausrüstung
  - Hydraulische Berechnungen
  - Stratigraphie/Lithologie
  - Schichtenabfolge und Gesteinsdurchlässigkeit
  - Strukturkarten und Schnitte
  - Mächtigkeitskarten für Barriere-Schichten
  - Reservoir Parameter
  - Behandlungs-Fluid Additive
  - Alarmierungsplan etc.

Das Simulationsergebnis einer hydraulischen Bohrlochbehandlung ist beispielhaft in Abbildung 6 gezeigt.



**Abb. 6: Simulationsergebnis einer hydraulischen Bohrlochbehandlung**

Die Planung von hydraulischen Bohrlochbehandlungen, insbesondere die Prognose von Lage & Ausdehnung der zu erzeugenden Risse erfolgt auf Basis anerkannter Verfahren und Einsatz kommerziell verfügbarer Simulatoren. Basis der Planung ist die Charakterisierung der zu behandelnden Formation und seiner Deckschichten, insbesondere die ihrer geomechanischen Eigenschaften und der Spannungsverteilung.

Die Dokumentation der vorgenannten Arbeiten erfolgt in einem Betriebsplan, der der Bergbehörde im Rahmen des Betriebsplanverfahrens zur Zulassung vorgelegt wird. Auf seiner Basis erfolgt die Beteiligung der lokalen Behörden.

**6.2. Bohrlochbehandlungs-Fluide**

Ziel: Erzeugung der für eine ökonomische bzw. optimierte Gewinnung von Kohlenwasserstoffen notwendigen Rissysteme ohne unzulässige Veränderung der nutzbaren Grundwasserhorizonte.

Wichtige gesetzliche Vorgaben:

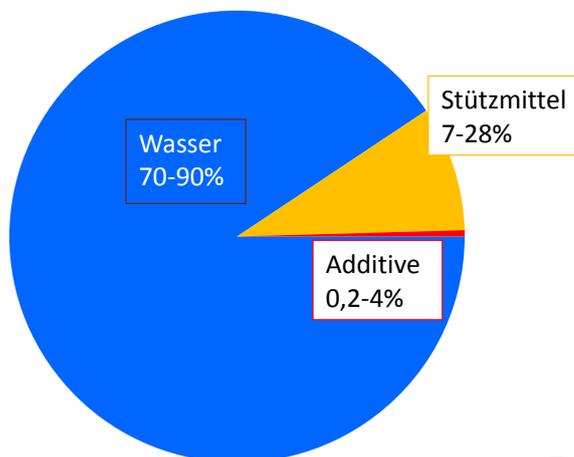
- Bundesgesetz (2009): „Wasserhaushaltsgesetz (WHG)“
- Bundesgesetz (1998): „Bundes-Bodenschutzgesetz (BBodSchG)“
- Bundesrechtsverordnung (2010): „Gefahrstoffverordnung (GefStoffV)“
- Bundesrechtsverordnung (1999): „Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung (BBodSchV)“
- EU-Verordnung (2006): „Registrierung, Bewertung, Zulassung und Beschränkung chemischer Stoffe (REACH)“
- EU-Verordnung (2012): „Verordnung über die Bereitstellung auf dem Markt und die Verwendung von Biozidprodukten“

- Länderverordnung (2006): „Bergverordnung für Tiefbohrungen, Unterspeicherung und für die Gewinnung von Bodenschätzen durch Bohrungen (BVOT)“
- Länderverordnung (1997): „VAwS - Verordnung über Anlagen zum Umgang mit wassergefährdenden Stoffen und über Fachbetriebe“
- LBEG (2012): „Rundverfügung: Mindestanforderungen an Betriebspläne, Prüfkriterien und Genehmigungsablauf für hydraulische Bohrlochbehandlungen“

**Wichtige technische Empfehlungen:**

- API (2009): “Guidance Document HF1: Hydraulic Fracturing Operations”
- API (2010): “Guidance Document HF2: Water Management Associated with Hydraulic Fracturing”
- API (2011): “Guidance Document HF3: Practices for Mitigating Surface Impacts Associated with Hydraulic Fracturing”

Zur Initiierung und Ausbereitung der hydraulischen Risse werden Flüssigkeiten eingesetzt, die unter Drücken oberhalb des Aufbrechdruckes in die Formation gepumpt werden. Die Grundsubstanz von Behandlungsfluiden ist üblicherweise Wasser. Nach Miskimins (2011) macht Wasser meist ca. 70-90% des verpumpten Volumens aus. Der Rest sind Stützmittel (ca. 7-28%) und Additive (0,2-4%), siehe Abbildung 7.



**Abb. 7: Behandlungsfluid-Additive**

In der Hauptinjektion wird das Behandlungs-Fluid in drei Stufen verpumpt: (1) als „Pad“ (in der Regel ohne Stützmittel), um die Formation aufzubrechen und die erzeugten Risse für die Aufnahme von Stützmitteln aufzuweiten, (2) als „Proppant Slurry“ oder „Carrier“, um Stützmittel in die Risse einzubringen und (3) als „Flush“ (ohne Stützmittel), um die mit Stützmitteln beladene Suspension aus dem Bohrloch in die erzeugten Risse zu verdrängen.

**6.2.1. Wasser**

Der Wasserbedarf hängt von der Art der hydraulischen Behandlung ab und reicht bis zu maximal 500 m<sup>3</sup> pro Behandlung für typische „Gel“-Behandlungen in konventionellen Lagerstätten. In unkonventionellen Lagerstätten werden pro Behandlung größere Mengen verpumpt. In konventionellen Lagerstätten sind Wiederholungsbehandlungen für die gesamte Lebensdauer einer Bohrung meist nicht notwendig.

Das Wasser kommt bislang aus der Trinkwasserversorgung, aus eigenen Brunnen oder aus Prozessanlagen. Das für die Behandlung benutzte Wasser muss grundsätzlich keine Trinkwasserqualität haben. Eine Entnahme aus Oberflächengewässern ist möglich und wurde bereits durchgeführt. Untersuchungen zum Recycling rückgeförderter Flüssigkeiten werden durchgeführt.

Die Lagerung des Behandlungs-Wassers erfolgt in Tanks und/oder Wasserbecken.

**PRAKTIKEN: WASSERBESCHAFFUNG**

- Wasserbereitstellung für Behandlungen in konventionellen Lagerstätten (bis zu 500 m<sup>3</sup>/Behandlung) aus dem öffentlichen Wassernetz bzw. eigenen Brunnen
- Fortsetzung der Untersuchungen, um rückgeförderte Flüssigkeiten einer Behandlung aufzubereiten und für Folge-Behandlungen einzusetzen.

**6.2.2. Einsatzstoffe und Inhaltsstoffe**

Aus den unterschiedlichsten Gründen werden dem Behandlungs-Fluid Einsatzstoffe beigegeben, um z.B.

- erzeugte Risse offenhalten (Stützmittel, z.B. Sand)
- Fluid tragfähig machen für Stützmittel (z.B. Polymere)
- Reibungsverlust beim Verpumpen mindern (Fließverbesserer)
- Fluid-Rückförderbarkeit verbessern bzw. zu ermöglichen (Gelbrecher)
- Eintrag biologischer Substanzen vermeiden (z.B. UV-Strahlung)
- ggf. Mineral-Quellungen und -Ausfällungen vermeiden (Salze)
- Zuordnung der Produktion (Tracer).

Die Grundsubstanz (Wasser), Stützmittel und Einsatzstoffe werden unmittelbar vor Durchführung der Behandlung auf dem Bohrplatz zum Behandlungs-Fluid angemischt und in die Bohrung verpresst.

Einsatzstoffe, umgangssprachlich auch als Additive bekannt, sind von den Servicefirmen hergestellte Produkte, die unter Handelsnamen bekannt sind. Sie bestehen häufig aus mehreren Inhaltsstoffen, den Chemikalien, aus denen die Einsatzstoffe in der Regel durch Mischung hergestellt werden. Den einzelnen Inhaltsstoffen lassen sich eindeutige Identifikationsnummern (CAS-, UN-Nummer) zuordnen. Für sie sind in der Regel alle einschlägigen human- und ökotoxikologischen Daten sowie die Daten zur Wassergefährdung und Einstufung nach Gefahrstoffverordnung bekannt. Für Stoffe, für die entsprechende Informationen fehlen, werden Untersuchungen durchgeführt. Von zurzeit laufenden Untersuchungen werden grundsätzliche Aussagen zu den mikro-biologischen und chemischen Umsetzungsprozessen der in der Formation verbleibenden Stoffe (Abbau-Reaktionen sowie Reaktionen von Behandlungs-Fluid mit Lagerstättenwasser und Reservoir-Gestein) erwartet.

Die Stützmittel, z.B. Sand, stellen kein Risiko für das Grundwasser dar und werden hier nicht weiter behandelt. Die Anzahl der in Deutschland für Behandlungs-Fluide eingesetzten chemischen Inhaltsstoffe betrug mit Stand Anfang 2013 weniger als 50. Für die Zubereitung eines Behandlungs-Fluids werden davon üblicherweise 5 bis 15 Inhaltsstoffe verwendet. Analysen an den inzwischen veröffentlichten Inhaltsstoffen des weltweiten Portfolios von ca. 600 Stoffen haben gezeigt, dass einige Stoffe im weltweiten Portfolio eine oder mehrere Eigenschaften haben, „die Anlass für Besorgnis geben“, Tyndall (2011). Dies gilt auch dann noch, wenn man berücksichtigt, dass bei der Bewertung des Risikos, das von Behandlungs-Fluiden ausgeht, neben den Eigenschaften der unverdünnten Substanz auch die Konzentration der Inhaltsstoffe, ihr Verbleib in der Umwelt und der Aufnahmepfad für Mensch und Umwelt wesentlich sind, UBA (2011).

Zur Abschätzung des Gefährdungsrisikos für Boden und insbesondere Nutzwasser durch Einträge an der Geländeoberfläche werden, neben den Einstufungen der eingesetzten Behandlungs-Fluide zur Wassergefährdung und nach Gefahrstoffverordnung, auch die einschlägigen ökotoxikologischen/humantoxikologischen Daten wie Algen-, Fisch-, Daphnien- und Bakterien-Teste sowie Teste zur biologischen Abbaubarkeit eingesetzt.

**PRAKTIKEN: BEHANDLUNGS-FLUID EINSATZSTOFFE UND INHALTSSTOFFE**

- Beschränkung auf den Einsatz von Inhaltsstoffen für die alle einschlägigen human- und ökotoxikologischen Daten und Daten zur Wassergefährdung und Einstufung nach Gefahrstoffverordnung vorhanden sind
- Verzicht auf Frac-Fluid-Mischungen die als gefährlich gemäß der europäischen CLP-Verordnung und höher als schwach wassergefährdend (WGK 1) eingestuft sind
- Auswahl der weiteren Inhaltsstoffe unter Berücksichtigung ihres Gefährdungspotentials

- Veröffentlichung aller bei einer Behandlung eingesetzten Einsatz- und Inhaltsstoffe, insbesondere Information zu:
  - Zweck für den die Einsatzstoffe verwendet werden
  - Identifikationsnummern (CAS-, UN-Nummer) der in den Einsatzstoffen enthaltenen Inhaltsstoffe und die nach Gefahrstoffrecht vorgeschriebene Kennzeichnung für Inhaltsstoffe, Einsatzstoffe und Gesamtfluid
  - Einstufung in WGK für Inhaltsstoffe, Einsatzstoffe und Gesamtfluid
  - Gesamtmengen der jeweiligen Inhaltsstoffe
  - effektive Konzentration (Massen-%) der jeweiligen Inhaltsstoffe im Behandlungs-Fluid
  - Maß der möglichen Einwirkungen (z.B. mögliches Austrittsvolumen)
- Fortlaufende Überprüfungen sowohl der Art, der Anzahl als auch der Konzentration von Einsatzstoffen.

### **6.3. Durchführung von hydraulischen Bohrlochbehandlungen**

Ziel: Sichere Durchführung von hydraulischen Bohrlochbehandlungen bei Vermeidung von Gefährdungen von Menschen und Umwelt.

Wichtige gesetzliche Vorgaben:

- Bundesrechtsverordnung (2002): „Betriebssicherheitsverordnung (BetrSichV)“
- Bundesrechtsverordnung (2013): „Gefahrgutverordnung Straße, Eisenbahn und Binnenschifffahrt (GGVSEB)“
- Länderverordnung (2006): „Bergverordnung für Tiefbohrungen, Unterspeicherung und für die Gewinnung von Bodenschätzen durch Bohrungen (BVOT)“
- Länderverordnung (1997): „VAwS - Verordnung über Anlagen zum Umgang mit wassergefährdenden Stoffen und über Fachbetriebe“
- LBEG (2012): „Rundverfügung: Mindestanforderungen an Betriebspläne, Prüfkriterien und Genehmigungsablauf für hydraulische Bohrlochbehandlungen“

Wichtige technische Empfehlungen:

- API (2009): „Guidance Document HF1: Hydraulic Fracturing Operations“
- API (2010): „Guidance Document HF2: Water Management Associated with Hydraulic Fracturing“
- API (2011): „Guidance Document HF3: Practices for Mitigating Surface Impacts Associated with Hydraulic Fracturing“.
- WEG (2006): „Technische Regel - Futterrohrberechnung“

Während einer hydraulischen Behandlung sind die Rohrtouren hohen Belastungen ausgesetzt. Zum Schutz der Verrohrungen können die Ringräume zwischen den einzelnen Rohrtouren mit Schutzdrücken beaufschlagt werden. Die Überwachung der Ringraumdrücke bietet Gewähr, vor Erreichen vorher berechneter Maximaldrücke auf unvorhergesehene Druckentwicklungen, z.B. durch Stopp der Injektionspumpen, zu reagieren. Reaktionszeiten bei

Eintreten solcher Entwicklungen im Sekundenbereich sind grundsätzlich möglich. Für den Fall, dass eine rechtzeitige Reaktion nicht erfolgt, kann durch die Ausstattung der Ringräume mit Sicherheitsabblaseventilen zum Abblasen/Ableiten gewährleistet werden, dass die berechneten Maximaldrücke tatsächlich nicht überschritten werden.

**PRAKTIKEN: DURCHFÜHRUNG EINER HYDRAULISCHEN BOHRLOCHBEHANDLUNG**

- Zum Schutz vor Schäden an der Verrohrung, Schutzdruckbeaufschlagung der Ringräume (Ringraum 1 und 2, ggf. auch Ringraum 3). Die Belastung der Rohre während einer hydraulischen Bohrlochbehandlung wird gemäß WEG-Regel zur Futterrohrberechnung berechnet. Sie darf maximal 80% der Streckgrenze (DIN EN 10002) unter der jeweiligen Umgebungstemperatur nicht überschreiten
- Permanente elektronische Überwachung der Ringraumdrücke (in der Regel Ringraum 1 und 2) während der Durchführung einer hydraulischen Bohrlochbehandlung
- Automatische Notabschaltung der Injektionspumpen zum Stopp der hydraulischen Bohrlochbehandlung bei Erreichen vorher festgelegter Maximaldrücke
- Absicherung der Ringräume mit Sicherheitsabblaseventilen (im Sinne der Druckbehälterverordnung) zum Abblasen/Ableiten in Behälter mit Auslösedrücken, die von einem Sachverständigen auf Basis der Kennlinien der Ventile festgelegt worden sind.

Der An- und Abtransport von Gerätschaften und Material insbesondere von Chemikalien erfolgt, soweit relevant, in Übereinstimmung mit den Vorgaben nach Gefahrgutverordnung Straße (GGVSEB), die Lagerung nach der Verordnung über Anlagen zum Umgang mit wassergefährdenden Stoffen und über Fachbetriebe (VAWS).

- Antransport von Gerätschaften und Material, der Beeinträchtigungen des Umfeldes minimiert, z.B. grundsätzlich außerhalb der Nachtruhe, über geeignete, ggf. hergerichtete Transportwege
- Einhaltung der relevanten Vorgaben aus GGVSEB und VAWS für Antransport und Lagerung von Chemikalien
- Beschränkung der Lagerung chemischer Zusätze sowohl zeitlich als auch volumenmäßig auf das absolute Minimum unter Berücksichtigung der Wassergefährdungsklasse.

Die Durchführung von hydraulischen Bohrlochbehandlungen erfordert eine große Anzahl von Spezial Equipment. Es beinhaltet Behälter, Mischaggregate, Equipment für den Stützmitteltransport, Pumpanlagen und Nebenaggregate wie Schläuche, Rohrleitungen, Regelventile und Manifolds. Die Service Anbieter hydraulischer Bohrlochbehandlungen stellen neben diesem Equipment auch die für eine erfolgreiche Behandlung notwendigen Monitoring- und Kontrollsysteme zur Verfügung.

- Test von Gerätschaften und Aggregaten auf Funktionsfähigkeit und Sicherheit und Abnahme durch eine nach Bergrecht bestellte verantwortliche Person
- Durchführung von Drucktesten des obertägigen Hochdruck-Pipings und der Anlagen (grundsätzlich Abdrücken mindestens mit dem 1,1-fachen des zu erwartenden maximalen Druckes) sowie halbjährliches Abdrücken der Einzelkomponenten mit dem 1,5-fachen Nominaldruck.
- Austausch von nicht funktionsfähigem Equipment
- ggf. Verifizierung der Tauglichkeitsnachweise durch einen unabhängigen Sachverständigen
- ggf. Durchführung von vorbereitenden Maßnahmen aus dem Gefahrenabwehrplan für nicht geplante Zwischenfälle
- Durchführung einer finalen Vorbesprechung mit allen involvierten Personen bezüglich Sicherheit und Ablauf der durchzuführenden Behandlung.

Nach erfolgtem Nachweis von Funktionsfähigkeit und Sicherheit der eingesetzten Gerätschaften und Aggregate kann die hydraulische Behandlung durchgeführt werden, siehe Abbildung 8. Die Pumpzeiten für eine hydraulische Bohrlochbehandlung liegen abhängig vom verpumpten Volumen in der Größenordnung von Stunden. Pumpraten sind abhängig vom verpumpten Behandlungs-Fluid. Für Gel-Behandlungen sind in Deutschland Raten von 4 bis 6 m<sup>3</sup>/min üblich.

- Ausnahmslos Einsatz von erfahrenem Fachpersonal
- Durchführung der hydraulischen Behandlung gemäß Plan, vorzugsweise bei Tageslicht; sonst Gewährleistung einer ausreichenden Platzausleuchtung
- Elektronische Überwachung des Behandlungs-Prozesses und Reaktion auf Ereignisse zur Gewährleistung einer sicheren Ausführung der hydraulischen Bohrlochbehandlung, s. auch 6.4.2.



**Abb. 8: Durchführung einer hydraulischen Bohrlochbehandlung**

Die Behandlungsdurchführung erfolgt vom Bohrungsplatz aus. An- und Abtransport sowie Lagerung von Gerätschaften und Material, insbesondere von Chemikalien, erfolgen in Übereinstimmung mit den relevanten gesetzlichen Vorgaben. Gerätschaften und Aggregaten werden vor Einsatz überprüft, ggf. abgedrückt und abgenommen. Die Durchführung der Behandlung erfolgt gemäß Plan, vorzugsweise bei Tageslicht. Der Behandlungs-Prozess wird permanent elektronisch überwacht, um auf ungeplante Ereignisse reagieren zu können. Für den Fall, dass eine rechtzeitige Reaktion nicht erfolgt, bieten Sicherheitseinrichtungen Gewähr dafür, dass berechnete Maximaldrücke tatsächlich nicht überschritten werden.

**6.4. Datensammlung, Analyse, Monitoring**

Wichtige gesetzliche Vorgaben:

- LBEG (2012): „Rundverfügung: Mindestanforderungen an Betriebspläne, Prüfkriterien und Genehmigungsablauf für hydraulische Bohrlochbehandlungen“
- Wichtige technische Empfehlungen:
- API (2009): „Guidance Document HF1: Hydraulic Fracturing Operations“

Vor, während und nach der Durchführung einer hydraulischen Bohrlochbehandlung findet ein umfangreiches Monitoring statt, um zu gewährleisten, dass die Maßnahme sicher, erfolgreich und ohne Schaden für die Umwelt, insbesondere die oberflächennahen Nutzwasserleiter durchgeführt wird. Bei diesem Monitoring-Prozess lassen sich die nachfolgenden Aktivitäten unterscheiden

- Bestimmung des Referenzzustandes
- Monitoring während der Durchführung einer hydraulischen Behandlung
- Monitoring nach der Durchführung einer hydraulischen Behandlung

#### **6.4.1. Referenzzustandsbestimmung**

Ziel: Schaffung einer Vergleichsbasis für künftige Messungen.

Wichtige technische Empfehlungen:

- API (2009): "Guidance Document HF1: Hydraulic Fracturing Operations"
- API (2010): "Guidance Document HF2: Water Management Associated with Hydraulic Fracturing"

Abhängig vom Gebiet, in dem Bohr- und Behandlungs-Aktivitäten aufgenommen werden sollen, werden oberflächennahes Grundwasser und naheliegende Gewässer beprobt und analysiert soweit Informationen zum aktuellen Zustand von Oberflächen- und Grundwasser nicht ohnehin vorliegen. Dies gilt insbesondere für Gebiete mit bekannten Belastungen, z.B. durch biogenes Gas wie im Münsterland, Melchers (2008). Die Feststellung des Referenzzustandes vor Aufnahme von Aktivitäten erlaubt es, spätere Veränderungen festzustellen. Da die Inhaltsstoffe der Behandlungs-Fluide bekannt sind, lassen sich mögliche Ursachen der Veränderungen in der Grundwasser-Zusammensetzung feststellen und zuordnen.

#### ***PRAKTIKEN: REFERENZZUSTANDSBESTIMMUNG***

- Feststellung des Referenzzustandes in naheliegenden Gewässern und im oberflächennahen Grundwasser, ggf. durch Beprobung und Probenanalyse, insbesondere in vorhandenen Nutzwasserbrunnen spätestens vor Durchführung einer hydraulischen Behandlung
- Bemessung des Beprobungsprogrammes für ein Monitoring vor, während und nach der hydraulischen Behandlung unter Berücksichtigung der vorherrschenden Grundwasserströmung.

#### **6.4.2. Prozess-Monitoring während der hydraulischen Bohrlochbehandlung**

Ziel: Gewährleistung der Sicherheit der Durchführung einer hydraulischen Bohrlochbehandlung sowie einer Riss-Ausbreitung, die in ihrem Höhenwachstum durch die überlagernde Barriere-Schicht begrenzt wird.

Wichtige gesetzliche Vorgaben:

- LBEG (2012): „Rundverfügung: Mindestanforderungen an Betriebspläne, Prüfkriterien und Genehmigungsablauf für hydraulische Bohrlochbehandlungen“

Wichtige technische Empfehlungen:

- API (2009): "Guidance Document HF1: Hydraulic Fracturing Operations"

Gutes Prozess Monitoring und gute Qualitätskontrolle während einer hydraulischen Bohrlochbehandlung sind maßgeblich für die Durchführung einer erfolgreichen Maßnahme ohne unzulässige Umweltauswirkungen. Der Umfang der Monitoring-Maßnahmen ist abhängig von den jeweiligen Gegebenheiten.

Hydraulische Bohrlochbehandlungen werden mit Hilfe von Simulationsmodellen geplant, die insbesondere auf der Basis von Pumprate, Injektionsdruck, Injektionsrate, Stützmittelkonzentration, Behandlungs-Fluid Rheologie und der relevanten gesteinsphysikalischen Parameter die Ausdehnung und die Geometrie von Rissystemen prognostizieren. Durch das kontinuierliche Monitoring der tatsächlichen Werte dieser Parameter während des Behandlungsvorganges und Echtzeit Simulation lässt sich die Riss-Ausbreitung in Echtzeit überwachen und auf unvorhergesehene Entwicklungen reagieren.

Für die sichere Durchführung von hydraulischen Maßnahmen ist die Verfolgung der Drücke im gesamten obertägigen System unerlässlich. Übliche Messstellen sind am Mixer (Blender), an den Hochdruckpumpen, im Hochdruck-Bereich und am Bohrlochkopf. Die Verfolgung der Drücke erfolgt kontinuierlich, um Abweichungen vom Plan vor Fortsetzung weiterer Aktivitäten unverzüglich erkennen und auf sie reagieren zu können. Üblicherweise reichen kleine Korrekturen (von z.B. Pumprate und Behandlungsdruck sowie Konzentrationsänderungen innerhalb der Fluidkomposition und der Stützmittelkonzentration) gegenüber dem ursprünglichen Plan, um die Maßnahme fortsetzen zu können.

Unerwartetes oder ungewöhnliches Druckverhalten kann auch Anzeichen eines Problems sein. Druckabweichungen als Folge auftretender Leckagen, z.B. im Untertagesystem, sind leicht zu erkennen. Treten diese auf, ist es möglich, die Behandlung sofort abzubrechen.

#### ***PRAKTIKEN: PROZESS-MONITORING WÄHREND DER DURCHFÜHRUNG EINER HYDRAULISCHEN BOHRLOCHBEHANDLUNG***

- Monitoring der für eine Simulation der Rissausbreitung relevanten Parameter
- Nutzung der Planungssoftware für Echtzeitsimulationen während der Behandlung, um Behandlungsfortschritt und Riss-Geometrie Entwicklung zu überwachen
- Monitoring der Drücke im Hochdrucksystem, insbesondere des Injektionsdruckes am Bohrlochkopf und der Drücke in den nicht bis zu Tage zementierten Ringräumen, und reagieren auf unvorhergesehene Ereignisse
- Monitoring der verpumpten Volumen an Behandlungs-Fluid und aller Zusatzstoffe zum Vergleich mit der späteren Rückförderung
- Ausnahmslos Einsatz von erfahrenem Fachpersonal.

#### **6.4.3. Mikro-seismisches und Mikro-Deformations-Monitoring**

Ziel: Messung der Riss-Ausbreitung während des Behandlungsvorganges

Wichtige gesetzliche Vorgaben:

- LBEG (2012): „Rundverfügung: Mindestanforderungen an Betriebspläne, Prüfkriterien und Genehmigungsablauf für hydraulische Bohrlochbehandlungen“

Wichtige technische Empfehlungen:

- API (2009): "Guidance Document HF1: Hydraulic Fracturing Operations"

Mikro-seismisches und Mikro-Deformations-Monitoring ermöglichen es grundsätzlich, die Ausbreitung eines Risses sichtbar zu machen, wenn die Entfernung zwischen Riss und Aufnahmegeräten nicht zu groß ist. Die Technologie wird in den USA insbesondere in den flacheren Schiefergasbohrungen eingesetzt, um neue Behandlungs-Techniken bewerten zu können, um die Effektivität von Behandlungs-Techniken in neuen Gebieten zu verbessern und zur Kalibrierung von Simulationsprogrammen zur Prognose der Rissausbreitung.

Beim Mikro-seismischen Monitoring erfolgt die Verfolgung der Riss-Ausbreitung durch die Aufnahme, Ortung und räumliche Darstellung akustischer Signale, hervorgerufen durch Riss-induzierte Änderungen der Gebirgsspannung (Rissöffnung) und des Fluiddruckes (Leakoff). Nach Erfahrungen in den USA lassen sich diese Signale in Schiefer Lagerstätten mit Geophonen bis zu einer Entfernung von max. 1.500 m verfolgen, Fisher und Warpinski (2012). In vielen der anderen Lagerstätten sind die maximalen Aufnahmestrecken deutlich geringer, was ihre Einsatzmöglichkeiten für konventionelle Lagerstätten einschränkt.

Beim Mikro-Deformations-Monitoring erfolgt die Ortung der Riss-Ausbreitung durch die Messung kleinster Riss-induzierter Bewegungen (Displacements) entweder an der Erdoberfläche oder in einem benachbarten Bohrloch mit Hilfe empfindlicher „Tiltmeter“ (Neigungssensoren). Die eingesetzten Tiltmeter sind in der Lage an der Erdoberfläche Neigungsänderungen bis in den Bereich Nanoradian festzustellen. Von der Erdoberfläche lässt sich so bis in Teufen von ca. 3.000 m die Richtung der Rissausbreitung orten. Die Bestimmung der Rissdimensionen erfordert Untertagemessungen. Für Risshöhen von 30 bis 60 m liegen die maximalen Aufnahmestrecken bei nur 150 bis 300 m, Warpinski (2013).

Monitoring Feldversuche bei einzelnen Kampagnen (z.B. Horstberg: Behandlungstiefe ca. 3.600 m, GeneSys: Behandlungstiefe ca. 3.700 m) sowie Rauschpegelmessungen (Joswig, 2005) im Bereich Niedersachsen bestätigen die Beobachtungen von Fischer und Warpinski (2012), dass es aufgrund der Geologie und der Tiefe der konventionellen Reservoirs nahezu unmöglich ist, selbst mit hochempfindlichen Geräten eine Riss-Ausbreitung unterhalb des Zechstein Salzes an der Oberfläche zu registrieren. Einzig für die Schiefergasbohrung Damme 3 konnten mit einem Untertage-Monitoring von Damme 2 aus bislang aussagekräftige mikro-seismische Ereignisse aufgenommen werden.

#### 6.4.4. Seismisches Monitoring

Ziel: Feststellung potentieller seismischer Erschütterungen in Echtzeit, um ihre Magnituden aufzunehmen und um auf ggf. zunehmende Erschütterungsintensitäten reagieren zu können.

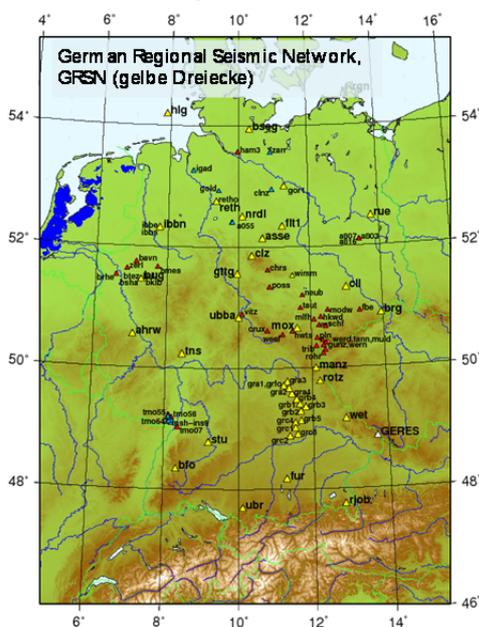
Wichtige gesetzliche Vorgaben:

- LBEG (2012): „Rundverfügung: Mindestanforderungen an Betriebspläne, Prüfkriterien und Genehmigungsablauf für hydraulische Bohrlochbehandlungen“

Wichtige technische Empfehlungen:

- DIN-Norm 4150: DIN EN 1998-1/NA Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter, Auslegung von Bauwerken gegen Erdbeben

Aus erdbebengefährdeten Gebieten ist bekannt, dass es in Folge einer hydraulischen Bohrlochbehandlung zu wahrnehmbaren Erschütterungen kommen kann. Gebiete, die nach DIN-Norm 4150 in Deutschland als Erdbebengebiete anzusprechen sind, sind auf den Oberrheintalgraben beschränkt. Außerhalb der ausgewiesenen Erdbebenzonen ist das Risiko spürbarer Behandlungsinduzierter Seismizität eher unerheblich (Richter, 2011). Dies gilt insbesondere für Behandlungen zur Stimulation der Gasproduktion, bei der – anders als z.B. in der Geothermie – nicht in vorhandene Störungszonen injiziert wird. Dies wird in Niedersachsen durch die in der Vergangenheit durchgeführten Kampagnen von hydraulischen Bohrlochbehandlungen in konventionellen Reservoiren bestätigt, bei denen es zu keinen spürbaren seismischen Ereignissen gekommen ist, wie durch das German Regional Seismic Network der BGR und das Bergschadenskundliche Beweis-Sicherungssystem des WEG nachgewiesen, siehe Abbildung 9.



**Abb. 9: Behandlungsinduzierte Seismizität**

Zum Risiko spürbarer Erschütterungen an der Erdoberfläche wird die natürliche Seismizität im Behandlungsgebiet mit Hilfe von GRSB und WEG Beweis-Sicherungssystem festgestellt. Während der Durchführung hydraulischer Bohrlochbehandlungen wird ein Monitoring auf Seimizität mit den vorgenannten Überwachungssysteme durchgeführt, außerhalb des WEG überwachten Gebietes ggf. ergänzt durch den Einsatz mobiler Einheiten.

**PRAKTIKEN: SEISMISCHES MONITORING**

- Feststellung der natürlichen Seismizität im Behandlungsgebiet unter Nutzung des GRSN (German Regional Seismic Network) der BGR ggf. ergänzt um Informationen des Bergschadenskundlichen Beweis-Sicherungssystems des WEG
- Überwachung seismischer Aktivitäten während der Durchführung von hydraulischen Bohrlochbehandlungen durch Nutzung der vorgenannten Überwachungssysteme, außerhalb des WEG überwachten Gebietes ggf. ergänzt durch den Einsatz mobiler Einheiten.

**6.4.5. Post Behandlungs-Monitoring**

Ziel: Messungen zum Riss-Höhenwachstum im bohrlochnahen Bereich

Wichtige gesetzliche Vorgaben:

- LBEG (2012): „Rundverfügung: Mindestanforderungen an Betriebspläne, Prüfkriterien und Genehmigungsablauf für hydraulische Bohrlochbehandlungen“

Wichtige technische Empfehlungen:

- API (2009): “Guidance Document HF1: Hydraulic Fracturing Operations”

Die am häufigsten eingesetzten Monitoring Verfahren nach Durchführung hydraulischer Bohrlochbehandlungen in Vertikalbohrungen sind Temperatur- und Tracermessungen zur Ortung der erzeugten Risslängen und -höhen. Die Aussagen dieser Verfahren beschränken sich auf den bohrlochnahen Bereich. Mit Fortschreiten der computerbasierten Modellierungsverfahren, mit denen es möglich ist, das gesamte Rissystem abzubilden, nimmt ihre Bedeutung ab. Mit diesen Modellierungsverfahren lassen sich z. B. Drucktransienten-Messungen modellieren, die vereinfacht schon Ende 70er/Anfang 80er Jahre Gegenstand von Untersuchungen waren, Brinkmann et al. (1980), Reinicke et al. (1983).

Mit Hilfe von Temperaturmessungen wird der Temperaturverlauf über den behandelten Bereich hinweg festgestellt. Abweichungen zwischen dem Temperaturverlauf vor und nach hydraulischer Behandlung sind das Ergebnis von Auskühlungen, durch das Behandlungs-Fluid, das üblicherweise mit der an der Oberfläche herrschenden Umgebungstemperatur verpumpt wird. Dadurch sind Aussagen darüber möglich, welche Perforationen Behandlungs-Fluid aufgenommen haben und in begrenztem Umfang auch, welches Riss-Höhenwachstum unmittelbar außerhalb des Futterrohres erreicht wurde.

Im Rahmen von Tracermessungen werden entweder die Stützmittel oder das Behandlungs-Fluid markiert. Nach Behandlung werden Bohrlochmessungen durchgeführt, die in der Lage sind, den Tracer nachzuweisen. Als Tracer kommen beispielsweise thermale Neutronen Absorber in Betracht und radioaktiver Tracer. Messzweck ist es nachzuweisen, dass das Höhenwachstum und/oder die Platzierung der Stützmittel erfolgt ist wie beabsichtigt. Wie auch beim Temperaturlog ist die Nachweistiefe dieser Messungen gering und liegt bestenfalls im Meterbereich.

#### **6.4.6. Post-Komplettierungsmonitoring**

Ziel: Nachweis der technischen Integrität der Bohrung und der Bohrungsausrüstung im laufenden Produktionsbetrieb.

Wichtige gesetzliche Vorgaben:

- Länderverordnung (2006): „Bergverordnung für Tiefbohrungen, Unterspeicher und für die Gewinnung von Bodenschätzen durch Bohrungen (BVOT)“

Wichtige technische Empfehlungen:

- API (2009): “Guidance Document HF1: Hydraulic Fracturing Operations”

Das Produktionsmonitoring dient dem Nachweis der technischen Integrität der Bohrung und der Bohrungsausrüstung. Es wird laufend durchgeführt, insbesondere durch Druck Monitoring.

Während der Bohrungsherstellung werden Rohr- und Rohrschuh-Integrität durch Druckteste nachgewiesen. Während der Durchführung der hydraulischen Behandlung erfolgt der Nachweis der Integrität auf Basis der Drucküberwachung der Ringräume zum Ausschluss von Leckagen zwischen den Ringräumen, insbesondere zum Ausschluss von Leckagen des Steigrohres. Diese Überwachung der Ringraumdrücke wird auch nach Abschluss der Behandlung über den gesamten Lebenszyklus der Bohrung fortgesetzt. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die Drücke in den geschlossenen Ringräumen auch bei gegebener Integrität Schwankungen unterliegen. Sie resultieren aus den sich ändernden Bedingungen im Steigrohr, insbesondere Druck und Temperatur.

#### **PRAKTIKEN: POST-KOMPLETTIERUNGSMONITORING**

- Festlegung der für normale Betriebsbedingungen zu erwartenden minimalen und maximalen Ringraumdrücke
- Überwachung der Ringräume einer Bohrung bis zu ihrer Verfüllung
- Regelmäßige Bohrungsbefahrungen durch Feldpersonal zur Feststellung normaler Bohrungs- und Betriebsbedingungen bzw. Abweichungen davon, z.B. Bohrlochkopf, Steigrohr- und Ringraumdrücke, Leckagen etc.
- Überprüfung der geförderten Flüssigkeiten auf Salze und Korrosionsprodukte
- Sofern vorhanden, wiederkehrende Überprüfungen der Untertage-Sicherheitsventile
- Wiederkehrende Arbeiten zur Überprüfung der Abdichtungen und Wartung der Verflansungen im Bohrlochkopf
- Beim Ausbau von Teilen der Bohrungsausrüstung, Sichtprüfung zur Dokumentation der Zustandsbedingungen nach Einsatz, z.B. Prüfung der Steigrohre auf Korrosion/ Erosion
- Bei Bohrungsarbeiten ggf. Durchführung von Messungen zur Zustandsbestimmung der Ausrüstung Untertage und Obertage, z.B. Multiarm-Kaliberlog.

### 6.5. Initiale Rückförderphase

Ziel: Das verpumpte Behandlungs-Fluid ohne Stützmittel aus der Formation so weit wie möglich wieder zurückfördern und die so zurückgewonnenen Medien einer ordnungsgemäßen Verwertung bzw. Entsorgung zuführen bei Vermeidung von Gefährdungen von Menschen und Umwelt.

Wichtige gesetzliche Vorgaben:

- Bundesgesetz (2009): „Wasserhaushaltsgesetz (WHG)“
- Bundesrechtsverordnung (2010): „Gefahrstoffverordnung (GefStoffV)“
- Bundesrechtsverordnung (2013): „Gefahrgutverordnung Straße, Eisenbahn und Binnenschifffahrt (GGVSEB)“
- EU-Verordnung (2006): „Registrierung, Bewertung, Zulassung und Beschränkung chemischer Stoffe (REACH)“
- Länderverordnung (2006): „Bergverordnung für Tiefbohrungen, Untergrundspeicher und für die Gewinnung von Bodenschätzen durch Bohrungen (BVOT)“
- Länderverordnung (1997): „VAWS - Verordnung über Anlagen zum Umgang mit wassergefährdenden Stoffen und über Fachbetriebe“
- LBEG (2012): „Rundverfügung: Mindestanforderungen an Betriebspläne, Prüfkriterien und Genehmigungsablauf für hydraulische Bohrlochbehandlungen“
- Wichtige technische Empfehlungen:
- API (2010): „Guidance Document HF2: Water Management Associated with Hydraulic Fracturing“

Nach Ende einer hydraulischen Bohrlochbehandlung, nachdem sich der Riss unter dem Druck des Gebirges bis auf seine Stützmittelfüllung geschlossen hat, wird die Bohrung in Betrieb genommen. Für die sich anschließende Förderung sind zwei Phasen zu unterscheiden, zum einen die Flowback-Phase (Flüssigkeitsförderung mit signifikanter Behandlungs-Fluid Konzentration) und zum anderen die Förderphase (praktisch Flowback-freie Förderung von Fluiden aus der Lagerstätte). Von „praktisch Flowback-freier Förderung“ spricht man, wenn die rückgeförderte Flüssigkeit weitestgehend feststofffrei und von wasserähnlicher Viskosität ist.

In der Flowbackphase werden ca. 20-60% der verpumpten Behandlungs-Flüssigkeit zurückgefördert. Das verpresste Stützmittel bleibt zum allergrößten Teil planmäßig in den künstlich erzeugten Rissen. Die Flüssigkeit aus der Lagerstätte besteht aus Kondenswasser, ggf. aus Kohlenwasserstoffkondensaten und bei den im kohlenwasserstoffführenden Bereich einer Formation durchgeführten hydraulischen Bohrlochbehandlungen aus abgeschertem Haftwasser. Salzgesättigtes Lagerstättenwasser wird – wenn überhaupt – erst im fortgeschrittenen Stadium der Gewinnung gefördert.

Die unmittelbar nach einer hydraulischen Bohrlochbehandlung zurückgeführten Flüssigkeiten enthalten Informationen über die Zusammensetzung des Teils der verpressten Flüssigkeiten, für den advective Gesetzmäßigkeiten gelten. Advektiver Fluss wird durch Druckgradienten bestimmt im Gegensatz zum diffusiven Transport, der Konzentrationsgradienten folgt und sich sehr viel langsamer vollzieht. Für den Transport im Untergrund spielt die Diffusion praktisch keine Rolle. Über die detaillierte Zusammensetzung der Flüssigkeiten in der initialen Rückförderphase gibt es zurzeit noch wenig belastbare Daten.

Für die Entsorgung/Verwertung der geförderten Flüssigkeiten stehen grundsätzlich die folgenden Möglichkeiten zur Verfügung:

- Entsorgung über zertifizierte Entsorgerfirmen
- Injektion in bergrechtlich zugelassene Versenkbohrungen
- Aufbereitung zur Wiederverwertung für weitere Behandlungen.

Die Nutzung der vorgenannten Optionen ist von einer Reihe von Faktoren abhängig, darin eingeschlossen: Verfügbarkeit zertifizierter Entsorgerfirmen; Verfügbarkeit und Genehmigungsfähigkeit aufnahmefähiger Injektionsbohrungen/-horizonte; Kapazität von Aufbereitungseinrichtungen; Aufbereitungsmöglichkeiten der Einrichtungen, um ggf. die für eine Einleitung in Gewässer notwendigen Grenzwerte zu erreichen.

Gängige Praxis ist es heute, die in der Flowback-Phase geförderten Flüssigkeiten über zertifizierte Entsorgerfirmen zu entsorgen und die in der Förderphase geförderten Flüssigkeiten in bergrechtlich zugelassene Versenkbohrungen zu injizieren. <sup>4</sup>

#### **PRAKTIKEN: FLÜSSIGKEITSMANAGEMENT**

- In der Flowback-Phase (Flüssigkeitsförderung mit signifikanter Behandlungs-Fluid Konzentration), Rückförderungen über Freiförderanlage mit Zweiphasen-Abscheider und Abfackelung der Gasphase bzw. deren Verbrennung in einer Verbrennungsanlage (z.B. Enclosed-Burner System)
- In der Förderphase, Förderung über die Trocknungsanlage
- Beprobung, Analyse und Bewertung der rückgeführten Flüssigkeiten zur Feststellung des Polymer/Gel-Anteils
- Beispielhaft länger anhaltende Beprobung, Analyse und Bewertung der Trinkwasser-relevanten Inhaltsstoffe in der Flüssigkeitsförderung
- Entsorgung der Rückförderung in der Flowback-Phase über zertifizierte Entsorgungsunternehmen
- Minimierung von Volumen und Dauer der Zwischenlagerung des Flowback in dem dafür zugelassenen Bereich des Bohr- bzw. Sondenplatzes

<sup>4</sup> An einem Gesamtkonzept für den Umgang mit geförderten wässrigen Flüssigkeiten inkl. Behandlung/ Wiederverwertung nach WHG wird gearbeitet

**WEG-Richtlinie****„Praxis der hydraulischen Bohrlochbehandlung  
für konventionelle Speichergesteine“**

Stand: 06/2014

Seite 51 von 67

- Injektion der Flüssigkeitsförderung der Förderphase in bergrechtlich zugelassene Versenkbohrungen
- Be-/Entladung sowie Straßentransport der geförderter Flüssigkeiten unter Einhaltung der GGVSEB
- Fortwährender Nachweis der geregelten Entsorgung.

## 7. Literaturverzeichnis

- API (2005):** "API standard 14B (fifth edition), Design, Installation, Repair and Operation of Subsurface Safety Valve System". API Publishing Services, 1220 L Street, N.W., Washington, D.C. 20005, 10/2005
- API (2006):** "API SPEC 5CT/ISO 11960, Specification for Casing and Tubing". API Publishing Services, 1220 L Street, NW, Washington, DC 20005, 1/2006
- API (2008):** "API 10TR4, Technical Report on Considerations Regarding Selection of Centralizers for Primary Cementing Operations". API, 1220 L Street, N.W., Washington, D.C. 20005, 5/2008
- API (2008):** "API Technical Report 10TR1, Cement Sheath Evaluation". API, 1220 L Street, N.W., Washington, D.C. 20005, 9/2008
- API (2009):** "Guidance Document HF1: Hydraulic Fracturing Operations – Well Construction and Integrity Guidelines". API Publishing Services, 1220 L Street, NW, Washington, DC 20005, 10/2009, <http://www.shalegas.energy.gov/resources/HF1.pdf>
- API (2010):** "API SPEC 13A Specification for Drilling Fluids Materials". API Publishing Services, 1220 L Street, NW, Washington, DC 20005, April 27, 2010
- API (2010):** "API SPEC 5B, Specification for Threading, Gauging, and Thread Inspection of Casing, Tubing, and Line Pipe Threads". API Publishing Services, 1220 L Street, NW, Washington, DC 20005, 6/2010
- API (2010):** "Guidance Document HF2: Water Management Associated with Hydraulic Fracturing". API Publishing Services, 1220 L Street, NW, Washington, DC 20005, 6/2010
- API (2010):** "API RP 10D-2/ISO 10427-2, Recommended Practice for Centralizer Placement and Stop Collar Testing". API, 1220 L Street, N.W., Washington, D.C. 20005, 7/2010
- API (2010):** "API SPEC 10A/ISO 10426-1, Specification for Cements and Materials for Well Cementing". API, 1220 L Street, N.W., Washington, D.C. 20005, 10/2010
- API (2010):** "API 65-2, Isolating Potential Flow Zones During Well Construction", 2<sup>nd</sup> Edition. API, 1220 L Street, N.W., Washington, D.C. 20005, 10/2010, December 2010
- API (2013):** "API RP 10B-2/ISO 10426-2, Recommended Practice for Testing Well Cements". API, 1220 L Street, N.W., Washington, D.C. 20005, 4/2013
- BGR (2013):** „Stellungnahme der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe zum Gutachten des Umweltbundesamtes (UBA) „Umweltauswirkungen von Fracking bei der Aufsuchung und Gewinnung von Erdgas aus unkonventionellen Lagerstätten – Risikobewertung, Handlungsempfehlungen und Evaluierung bestehender rechtlicher Regelungen und Verwaltungsstrukturen“. 1/2913, <http://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Energie/Downloads/BGR-Stellungnahme-UBA2012.html>
- Bundesgesetz (1934):** „Lagerstättengesetz (LagerstG)“, Ausfertigungsdatum: 04.12.1934, zuletzt geändert 10.11.2001, <http://www.gesetze-im-internet.de/bundesrecht/lagerstg/gesamt.pdf>
- Bundesgesetz (1980):** „Bundesberggesetz (BBergG)“, Ausfertigungsdatum: 13.08.1980, zuletzt geändert 31.7.2009, <http://www.gesetze-im-internet.de/bundesrecht/bbergg/gesamt.pdf>
- Bundesgesetz (1998):** „Bundes-Bodenschutzgesetz (BBodSchG)“, Ausfertigungsdatum: 17.03.1998, zuletzt geändert 24.2.2012, <http://www.gesetze-im-internet.de/bundesrecht/bbodschg/gesamt.pdf>
- Bundesgesetz (2009):** „Wasserhaushaltsgesetz (WHG)“, Ausfertigungsdatum: 31.07.2009, zuletzt geändert 7.8.2013, [http://www.gesetze-im-internet.de/bundesrecht/whg\\_2009/gesamt.pdf](http://www.gesetze-im-internet.de/bundesrecht/whg_2009/gesamt.pdf)
- Bundesrechtsverordnung (1990):** „Verordnung über die Umweltverträglichkeitsprüfung bergbaulicher Vorhaben (UVP-V Bergbau)“, Ausfertigungsdatum: 13.07.1990, zuletzt geändert 3.9.2010, <http://www.gesetze-im-internet.de/bundesrecht/uvpbergbv/gesamt.pdf>

**WEG-Richtlinie****„Praxis der hydraulischen Bohrlochbehandlung  
für konventionelle Speichergesteine“**

Stand: 06/2014

Seite 53 von 67

**Bundesrechtsverordnung (1995):** „Bergverordnung für alle bergbaulichen Bereiche (ABergV)“, Ausfertigungsdatum: 23.10.1995, Zuletzt geändert 24.2.2012, <http://www.gesetze-im-internet.de/abbergv/BJNR146600995.html>

**Bundesrechtsverordnung (1999):** „Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung (BBodSchV)“, Ausfertigungsdatum: 12.07.1999, zuletzt geändert 24.2.2012, <http://www.gesetze-im-internet.de/bundesrecht/bbodschv/gesamt.pdf>

**Bundesrechtsverordnung (2002):** „Betriebssicherheitsverordnung (BetrSichV)“, Ausfertigungsdatum: 27.09.2002, zuletzt geändert 8.11.2011, <http://www.gesetze-im-internet.de/bundesrecht/betrsv/gesamt.pdf>

**Bundesrechtsverordnung (2010):** „Verordnung zum Schutz des Grundwassers (Grundwasserverordnung - GrwV)“, Ausfertigungsdatum: 09.11.2010, [http://www.gesetze-im-internet.de/bundesrecht/grwv\\_2010/gesamt.pdf](http://www.gesetze-im-internet.de/bundesrecht/grwv_2010/gesamt.pdf)

**Bundesrechtsverordnung (2010):** „Gefahrstoffverordnung (GefStoffV)“, Ausfertigungsdatum: 26.11.2010, zuletzt geändert 15.7.2013, [http://www.gesetze-im-internet.de/bundesrecht/gefstovf\\_2010/gesamt.pdf](http://www.gesetze-im-internet.de/bundesrecht/gefstovf_2010/gesamt.pdf)

**Bundesrechtsverordnung (2013):** „Gefahrgutverordnung Straße, Eisenbahn und Binnenschifffahrt (GGVSEB)“, Fassung vom: 22.1.2013, <http://www.gesetze-im-internet.de/ggvseb/>

**DVGW (1998):** „Verwendung von Spülungszusätzen in Bohrspülungen bei Bohrarbeiten im Grundwasser“, Regelwerk, Technische Mitteilung Merkblatt W116, 4/1998

**DWA (2005):** „Technische Regel wassergefährdender Stoffe (TRwS), Ausführung von Dichtflächen“, Oktober 2005, [http://www.netinform.de/Vorschriften/GW/TRwS\\_A\\_786/whnjs.htm](http://www.netinform.de/Vorschriften/GW/TRwS_A_786/whnjs.htm)

**EU-Verordnung (2006):** „Registrierung, Bewertung, Zulassung und Beschränkung chemischer Stoffe (REACH)“, Verordnung (EG) Nr. 1907/2006 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 18. Dezember 2006, <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=CONSLEG:2006R1907:20121009:DE:PDF>

**EU-Verordnung (2012):** „Verordnung über die Bereitstellung auf dem Markt und die Verwendung von Biozidprodukten“, Verordnung (EU) Nr. 582/2012 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 22. Mai 2012, <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2012:167:0001:0123:DE:PDF>

**Economides M.J., Martin T. (2007):** „*Modern Fracturing*“. ET Publishing, Houston, ISBN 978 1 60461 688 0

**Fisher K., Warpinski, N. (2012):** „*Hydraulic-Fracture-Height Growth: Real Data*“, SPE Production & Operations, February 2012, pp. 8-19

**Hou, Z.; Wundram, L.; Meyer, R.; Schmidt, M.; Schmitz, S. & Were, P. (2012):** „*Development of a long-term wellbore sealing concept based on numerical simulations and in-situ-testing in the Altmark natural gas field*“. Environmental Earth Sciences 67(2), 2012:395–409, DOI: 10.1007/s12665-012-1670-7

**Joswig, M., Heinze, B., Guggenmos, M. (2008):** „*Obertägige Messungen von Hydrofracs in Rotenburg - Abschätzung der Erfolgsaussicht*“. In: Institut für Geophysik, Universität Stuttgart (2008)

**Ländergesetz (2010):** „Niedersächsisches Wassergesetz (NWG)“, Niedersächsisches Vorschrifteninformationssystem, 19.2.2010, letzte Änderung 3.4.2012, <http://www.nds-voris.de/jportal/?quelle=jlink&query=WasG+ND&psml=bsvorisprod.psml&max=true>

**Länderverordnung (2006):** „Bergverordnung für Tiefbohrungen, Untergrundspeicher und für die Gewinnung von Bodenschätzen durch Bohrungen im Land Niedersachsen (Tiefbohrverordnung - BVOT)“, 20.9.2006,

[http://www.lbeg.niedersachsen.de/portal/live.php?navigation\\_id=27872&article\\_id=96026&psmand=4](http://www.lbeg.niedersachsen.de/portal/live.php?navigation_id=27872&article_id=96026&psmand=4)

**WEG-Richtlinie**

**„Praxis der hydraulischen Bohrlochbehandlung  
für konventionelle Speichergesteine“**

Stand: 06/2014

Seite 54 von 67

**Länderverordnung (1997):** „VAwS - Verordnung über Anlagen zum Umgang mit wassergefährdenden Stoffen und über Fachbetriebe (Anlagenverordnung - VAwS)“, Niedersächsisches Vorschrifteninformationssystem, 17.12.1997, letzte Änderung 24.01.2006, <http://www.nds-vo-ris.de/jportal/?quelle=purl&query=WasgefStAnIV+ND&psml=bsvorisprod.psml&doktyp=Gesetze&max=true>

**Länderverordnung (2009):** „Verordnung über Schutzbestimmungen in Wasserschutzgebieten (SchuVO)“, Niedersächsisches Vorschrifteninformationssystem, 9.11.2009, <http://www.nds-voris.de/jportal/?quelle=jlink&query=WasSchGebV+ND+Anlage&psml=bsvorisprod.psml&max=true>

**LBEG (1998):** „Richtlinien über das Verfüllen auflässiger Bohrungen“, Oberbergamt Clausthal-Zellerfeld, 29.07.1998. (Handakte Nr. 4.25) -.

**LBEG (2012):** „Rundverfügung: Mindestanforderungen an Betriebspläne, Prüfkriterien und Genehmigungsablauf für hydraulische Bohrlochbehandlungen in Erdöl- und Erdgaslagerstätten in Niedersachsen“. LBEG, Oktober 2012,

[http://www.lbeg.niedersachsen.de/portal/live.php?navigation\\_id=562&article\\_id=110051&psmand=4](http://www.lbeg.niedersachsen.de/portal/live.php?navigation_id=562&article_id=110051&psmand=4)

**Melchers, C. (2009):** „Methan im südlichen Münsterland Genese, Migration und Gefahrenpotenzial“. Dissertation Westfälische Wilhelms-Universität Münster. Mai 2009

**Miskimins, J.L. (2011):** „Unconventional Frac-Jobs for Unconventional Reservoirs“. SPE Distinguished Lecture Program, Vortrag German Section SPE, März 2011

**Neutraler Expertenkreis (2012):** „Risikostudie Fracking“. April, 2012, [http://dialog-erdgasundfrac.de/sites/dialog-erdgasundfrac.de/files/Ex\\_risikostudiefracking\\_120518\\_webprint.pdf](http://dialog-erdgasundfrac.de/sites/dialog-erdgasundfrac.de/files/Ex_risikostudiefracking_120518_webprint.pdf)

**NORSOK (2013):** “NORSOK Standard D-010, Well integrity in drilling and well operations”, Rev 4, June 2013, <http://www.standard.no/PageFiles/29619/D-010u4.pdf>

**NRW (2012):** „Fracking in unkonventionellen Lagerstätten in NRW“. Gutachten mit Risikostudie zur Exploration und Gewinnung von Erdgas aus unkonventionellen Lagerstätten in Nordrhein-Westfalen (NRW) und deren Auswirkungen auf den Naturhaushalt insbesondere die öffentliche Trinkwasserversorgung“, 6. September 2012, [http://www.umwelt.nrw.de/umwelt/pdf/gutachten\\_fracking\\_nrw\\_2012.pdf](http://www.umwelt.nrw.de/umwelt/pdf/gutachten_fracking_nrw_2012.pdf)

**Brinkmann, F., Krömer, E., Reinicke, K.M. (1980):** „Methoden zur Bestimmung fracspezifischer Parameter aus dem Förderverhalten von behandelten Gasbohrungen“. Erdöl-Erdgas-Zeitschrift, 96. Jg., Juni 1980.

**Reinicke, K.M., Brinkmann, F.W., Schwarz, H., Hueni, G. (1983):** “Interpretation of Buildup Data Obtained From MHF Wells In Northern Germany”. Journal Petroleum Technology, Dezember 1985 (SPE/DOE 11605, 1983).

**Reinicke, K.M., Teodoriu, C., Fichter, C., Weichmann, M.J., Weinlich, F.H., Zhang, C.-L., Krebs, R. (2011):** „Untersuchung von Selbstheilungsmechanismen im Verbundsystem Rohr-Zement-Gebirge von CO<sub>2</sub>-Bohrungen“. DGMK/ÖGEW-Frühjahrstagung 2011, Celle, 11./12. April 2011

**Richter, S. (2011):** „Fracking und Erdbebenrisiko“. Protokoll eines Fachgesprächs im Rahmen des ExxonMobil Informations- und Dialogprozess 22.11.2011 in Kassel, <http://dialog-erdgasundfrac.de/sites/dialog-erdgasundfrac.de/files/2011-11-22-Protokoll-Fachgespraech-Fracking-und-Erdbeben.pdf>

**RWE Dea (2013):** RWE Dea – Bürgerinformation Völkersen, Fragen & Antworten.

<http://www.rwe.com/web/cms/de/1260556/rwe-dea-buergerinformation-voelkersen/rwe-dea-ag-buergerinformation-voelkersen/fragen-antworten/>

**WEG-Richtlinie****„Praxis der hydraulischen Bohrlochbehandlung  
für konventionelle Speichergesteine“**

Stand: 06/2014

Seite 55 von 67

**UBA (2011):** „Einschätzung der Schiefergasförderung in Deutschland – Entwurf, Inhaltlicher Stand März 2011“. Veröffentlichung August 2011, Umweltbundesamt, Pressestelle, Autor Bernd Kirschbaum - Fachgebiet II 2.1

**UBA (2012):** „Umweltauswirkungen von Fracking bei der Aufsuchung und Gewinnung von Erdgas aus unkonventionellen Lagerstätten – Kurzfassung“. November 2012,  
<http://www.umweltdaten.de/publikationen/fpdf-k/k4346.pdf>

**Staatliche Geologische Dienste Deutschlands (2012):** „Stellungnahme zu den geowissenschaftlichen Aussagen des UBA-Gutachtens, der Studie NRW und der Risikostudie des ExxonMobil Info Dialogprozesses zum Thema Fracking“. März 2012,  
<http://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Energie/Downloads/SGD-Stellungnahme-Fracking-Studien.pdf?blob=publicationFile&v=2>

**Stormont, J. C., Howard, C. I., Daemen, J. J. K. (1991):** „In Situ Measurements of Rock Salt Permeability Changes Due to Nearby Excavation“. Sandia Report, SAND90-3134.UC-721, July 1991.

**Tran-Viet, T. (2013):** „Methodische Entwicklung eines praktikablen Konzeptes zur Bewertung der Dichtheit verfüllter Bohrungen“. Dissertation TU Clausthal, Januar 2013

**Tyndall Centre (2011):** “Shale gas: an updated assessment of environmental and climate change impacts”. Tyndall Centre for Climate Change Research, University of Manchester, Manchester M13 1PL,  
<http://www.324.cat/multimedia/pdf/1/0/1359364607701.pdf>

**WEG (2006):** „Technische Regel - Futterrohrberechnung“, mit Rohrfestigkeitsangaben wie angegeben in API Bul 5C2/ISO 10400 oder berechnet nach API Bul 5C3/ISO 10400. Wirtschaftsverband Erdöl- und Erdgasgewinnung e.V., Juni 2006

**WEG (2006):** „Leitfaden Gestaltung des Bohrplatzes“. Wirtschaftsverband Erdöl- und Erdgasgewinnung e.V., August 2006

**Warpinski (2013):** Mikro-Deformations Monitoring, private Kommunikation, Juli 2013

**Williams, S., Carlsen, T., Constable, K., Guldahl, G. (2009):** *Identification and Qualification of Shale Annular Barriers Using Wireline Logs During Plug and Abandonment Operations*. SPE/IADC 119321, SPE Well Abandonment, Aberdeen, Scotland, UK, 30 June 2009, siehe auch [http://www.spe-uk.org/well-abandonment-09/1530\\_shale\\_annular\\_barriers\\_e\\_guidding\\_statoilhydro.pdf](http://www.spe-uk.org/well-abandonment-09/1530_shale_annular_barriers_e_guidding_statoilhydro.pdf)

## 8. Anhang: Erläuterung von Fachbegriffen

**Additive, Einsatzstoffe, Inhaltsstoffe:** Chemische Zusätze zu Behandlungs-Fluiden. Bei der Verwendung dieser Begriffe wird die folgende Hierarchie unterstellt: ein Behandlungs-Fluid besteht aus Wasser, Stützmittel und mehreren Additiven oder Einsatzstoffen, auch unter dem Begriff Zubereitungen bekannt. Ein Einsatzstoff besteht in der Regel aus mehreren Inhaltsstoffen. Danach sind Einsatzstoffe die von den Servicefirmen angebotenen Produkte, die unter Handelsnamen bekannt sind. Die Inhaltsstoffe sind die Chemikalien, aus denen in der Regel durch Mischung Einsatzstoffe hergestellt werden und denen sich eindeutige Identifikationsnummern (CAS-, UN-Nummer) zuordnen lassen.

Zweck der Einsatzstoffe ist unter anderem: Gel-Bildung, Reibungsminderung, Vernetzung, Gel-Brechung, Veränderung der Oberflächenspannung, Verhinderung von Mineralauslösungen, Unterdrückung von Bakterienwachstum in der Lagerstätte etc. Die Einsatzstoffe werden ausgewählt entsprechend ihrer Fähigkeiten, Behandlungsergebnis und Bohrungsproduktivität zu verbessern und ihrer Umweltverträglichkeit.

**Barriere-Schichten:** Gering durchlässige Erd- oder Gesteinsschichten. Sie hemmen die Strömung von Fluiden wie Wasser, Öl und/oder Gas (z.B. nach unten bzw. nach oben). Ihre Fähigkeit Fluide zu transportieren wird als Durchlässigkeit in Quadratmeter oder Darcy ( $1 \text{ Darcy} \approx 10^{-12} \text{ m}^2$ ) angegeben. Für Grundwasser sind Angaben als Durchlässigkeitsbeiwert in Metern pro Sekunde üblich. Wasser kann sich in gut durchlässigen Schichten um etwa einen Meter am Tag bewegen. In Barriere-Schichten aus Ton benötigt es hunderte von Jahren für wenige Meter. Salzsichten sind wasserundurchlässig.

**Behandlung:** siehe Hydraulische Bohrlochbehandlung.

**Behandlungs-Fluid:** Ein Fluid, das im Rahmen einer Bohrlochbehandlung in eine Bohrung injiziert wird. Behandlungsfluide bestehen in der Regel aus Wasser, Stützmitteln und geringen Anteilen von Fluiden als Additive.

Die Grundsubstanz (Wasser), Stützmittel und Einsatzstoffe werden unmittelbar vor Durchführung der Behandlung auf dem Bohrplatz zum Behandlungs-Fluid angemischt und in die Bohrung verpresst.

**Betriebsplan:** Vom Bergbauunternehmer aufzustellender und von der Bergbehörde zu prüfender und zu genehmigender Plan, auf dessen Grundlage ein Bergbaubetrieb geführt wird. Das Bundesberggesetz (BBergG) sieht als Betriebspläne vor: Rahmenbetriebsplan, Hauptbetriebsplan und Sonderbetriebsplan.

Rahmenbetriebspläne dienen der Prüfung der grundsätzlichen Durchführbarkeit von bergbaulichen Vorhaben und regeln das sogenannte Außenverhältnis des bergbaulichen Vorhabens. Je nach Bedeutung und Umfang des Vorhabens wird der Rahmenbetriebsplan im einfachen Verwaltungsverfahren oder im Planfeststellungsverfahren mit Umweltverträglichkeitsprüfung zugelassen. Die Zulassung des Rahmenbetriebsplanes entfaltet keine gestattende Wirkung. In jedem Fall sind für die Umsetzung der „Rahmengenemigung“ weitere Betriebspläne erforderlich, insbesondere ein Hauptbetriebsplan.

Hauptbetriebspläne sind die zentralen Dokumente bzw. Genehmigungen für die Führung eines Bergbaubetriebes. Hauptbetriebspläne sind in der Regel auf einen 2 Jahre nicht überschreitenden Zeitraum aufgestellt und zugelassen. Im Hauptbetriebsplan sind die Organisation des Betriebes, die wesentlichen Betriebseinrichtungen und Anlagen und die angewandten Techniken bzw. Technologien beschrieben. Der letzte Hauptbetriebsplan eines Bergbaubetriebes, in dem die Maßnahmen zur Stilllegung und Wiedernutzbarmachung dargestellt und genehmigt werden, wird auch Abschlussbetriebsplan genannt.

Für besondere Vorhaben kann die Bergbehörde die Vorlage von Sonderbetriebsplänen verlangen, die dann der Beschreibung und Genehmigung bestimmter Vorhaben oder auch nur Teilen davon dienen. Der Inhalt von Betriebsplänen richtet sich nach § 52 Bundesberggesetz und das Zulassungsverfahren nach § 54 Bundesberggesetz.

**Bohrlochkomplettierung (Well Completion):** Die Herrichtung einer Bohrung zur Aufnahme der Produktion/Injektion nach Erklärung ihrer Fündigkeit durch eine Kombination von Maßnahmen, Verfahrensschritten und Ausrüstungen für den sicheren Betrieb von Produktions- und Injektionsbohrungen unter den jeweiligen spezifischen Bedingungen. Die Komplettierung verfolgt die Ziele, eine effektive Kommunikation zu den gewünschten Förderhorizonten herzustellen, die Kommunikation zu unerwünschten Horizonten zu unterbinden und Produktionsprobleme zu lösen (zum Beispiel Sand-Zufluss, Schwefel, korrosive Medien etc.).

Im Rahmen der Komplettierung werden in der Regel 1. die zu fördernden Horizonte durch die letzte Rohrtour verrohrt; 2. der Ringraum zwischen Stahlrohr und Bohrlochwand zementiert; 3. das Steigrohr samt Packer und anderen Spezialelementen (Untertage-Sicherheitsventil, Schiebemuffen, Nippel-Profile etc.) in das Bohrloch eingebracht; 4. der Bohrlochkopf mit den Vorrichtungen zum Öffnen und Schließen des Bohrloches installiert; 5. im Falle zementierter Endverrohungen die Verrohrung im Lagerstättenbereich mit Sandstrahl-, Kugel- oder Hohlladungsperforatoren perforiert.

**Bohrlochkopf (Well Head):** Verschluss der Bohrung an der Oberfläche mit dem Kolonnenkopf zur Aufhängung und gegenseitigen Abdichtung der in die Bohrung eingebauten Rohrtouren, dem Steigrohrkopf bzw. -hänger zur Aufhängung und Abdichtung der Steigrohre und dem Eruptionskreuz (X-Mas Tree), bestehend aus einer Anordnung von Absperrventilen, Sicherheits-, Kontroll- und Regeleinrichtungen zum Öffnen und Schließen des Bohrloches.

Kopfdruckmonitoring der Drücke in den unterschiedlichen Ringräumen erlaubt die ständige Kontrolle der Bohrungsintegrität.

**Bohrlochmessung:** Geophysikalische Messungen im Bohrloch zur Untersuchung der Eigenschaften der Gesteine in situ. Gemessen werden dabei die verschiedenen geometrischen und physikalischen Parameter, z.B.

- Intensität der natürlichen Gamma-Strahlung des Gebirges (Gehalt an Tonmineralen)
- die Laufzeit des Gebirges (Porosität)
- der spezifische elektrische Widerstand des Gebirges, (Art des Porenhaltes, Wassersättigung)
- die Temperatur im Bohrloch in Abhängigkeit von der Teufe
- die Bohrlochgeometrie (Kaliber, Neigung, Richtung).

**Bohrplatz:** Ein für die Herstellung einer Bohrung hergerichteter Platz, von dem sie sicher und umweltverträglich abgeteuft werden kann. Auf dem Platz werden die Bohranlage sowie die für ihren Betrieb notwendigen Anlagen, Materialien und Personal untergebracht. Aus Gründen des Gewässerschutzes werden Bohrplätze so angelegt, dass keine wassergefährdenden Flüssigkeiten in den Boden oder in Gewässer gelangen können. Für die Herstellung des Platzes gilt in Deutschland der Leitfaden „Gestaltung des Bohrplatzes“ des Wirtschaftsverbandes Erdöl- und Erdgasgewinnung e.V. (WEG).

**Bohrspülung (Bohrschlamm):** Eine Flüssigkeit, die während der Bohrlochherstellung durch den Bohrstrang hinunter zum Meißel gepumpt wird und über den Ringraum zwischen Bohrstrang und Gebirge wieder nach oben steigt. Wichtigste Aufgaben der umlaufenden Bohrspülung sind Reinigen der Bohrlochsohle und Austrag des erbohrten Bodenmaterials (Bohrklein) sowie Gewährleistung von Bohrlochintegrität und Bohrlochstabilität.

Auch bei der Ermittlung von Zuflüssen (Öl, Gas und Wasser) aus dem erbohrten Gesteinsverband sowie der Beherrschung der Formationsdrücke erfüllt die Spülung eine wichtige Aufgabe. Die Dichte der Bohrspülung wird dabei auf die Bohrtiefe und die erwartenden Formationsdrücke ausgelegt. Wenn der durch die Dichte der Bohrspülung abhängige hydrostatische Druck der Bohrsäule (Spülungsdruck) kleiner ist als der Porendruck des in der Tiefe erbohrten Gesteins, kann es zu Gas- oder Flüssigkeitszutritten in das Bohrloch und zu Eruptionen von Bohrlochflüssigkeiten und Gasen, Ölen oder Wasser (Blow-out) kommen, wenn das Bohrloch nicht geschlossen wird. Ist der Spülungsdruck dagegen zu hoch, kann das umliegende Gestein aufgerissen werden und Spülung ins Gestein abfließen.

Eine Bohrspülung ist in der Regel ein Bentonit-Wasser Gemisch, welches zu einer Suspension aufbereitet wird. Zur gezielten Steuerung der rheologischen Eigenschaften werden der Suspension auch Hilfsmittel, meist Polymere, zugegeben. Daneben gibt es auch auf Öl basierende Bohrspülungen.

**Bohrung:** Das technische Bauwerk, das durch Bohren und anschließende Verrohrung (Casing) und Zementierung entsteht. Bohrungen werden als senkrechte, geneigte oder Bohrungen mit horizontalen Abschnitten hergestellt. Bohrungen, die sich im Bereich der Lagerstätte in mehrere Äste verzweigen, werden als Multilateral-Bohrungen bezeichnet.

**Bohrungsintegrität:** Druck-Containment einer Bohrung und Schutz vor Fluid-Migration (Flüssigkeiten oder Gase) entlang einer Bohrung zwischen geologischen Schichten im Untergrund und zur Oberfläche. Nach U.S. Environmental Protection Agency (EPA) wird Technische Integrität einer Bohrung als gegeben angenommen, wenn keine „signifikanten“ Leckagen vorliegen und kein „signifikanter“ Umstieg von Fluiden in höhere (Trinkwasser-) Horizonte stattfindet. In der Kavernenbauindustrie wird eine „signifikante“ Leckage mit einer Leckrate definiert, die in der Größenordnung der messbaren Umstiegsraten liegt und mit 50 kg/d angegeben wird.

Norsok (NORSOK, 2013) definiert Bohrungsintegrität als die Anwendung technischer, operativer und organisatorischer Maßnahmen zur Reduzierung des Risikos eines unkontrollierten Austritts von Formations-Fluiden über den Lebenszyklus einer Bohrung hinweg. Aspekte in diesem Zusammenhang beinhalten Zuständigkeit/Verantwortlichkeit, Prozesse des operativen Bohrbetriebes, Prozesse der Bohrungsinstandhaltung, Integrität von Steigrohr/Ringräumen, Integrität von Bohrlochkopf (inkl. der Verflansungen) und die Überprüfung der Sicherheitssysteme.

**Bohrungsproduktivität, Open Flow Potential:** Ein Maß für die Ergiebigkeit einer Bohrung. Sie wird üblicherweise über den Produktivitätsindex definiert. Dieser gibt die Förderrate je Megapascal bzw. je bar Depression an. Als Depression oder Draw Down bezeichnet man die Druckdifferenz zwischen dem Formations- oder Schichtdruck und dem Bohrlochdruck in Formationsteufe (Bodenfließdruck). Ein solcher Differenzdruck ist Voraussetzung dafür, dass ein (advektiver) Zustrom von Schichtmedium aus dem produktiven Horizont zum Bohrloch erfolgen kann.

Als Open Flow Potential bezeichnet man die maximal mögliche Förderrate gegen Atmosphärendruck.

**Casing:** siehe Futterrohr.

**Cluster, Clusterbohrplatz:** Bohrplatz von dem mehr als eine Bohrung niedergebracht werden.

**Deckgebirge:** Hier, die über einer Lagerstätte bis zur Erdoberfläche anstehenden geologischen Schichten.

**Durchlässigkeit (Permeabilität), Durchlässigkeitsbeiwert:** Maß zur Quantifizierung der Fähigkeit von Gesteinsschichten und Böden, Fluide (Flüssigkeiten wie Erdöl und Wasser, oder Gase) zu transportieren. Mit ihr sehr eng verbunden ist der „Durchlässigkeitsbeiwert“. Die Durchlässigkeit,  $k$ , in Quadratmeter oder Darcy ( $1 \text{ Darcy} \approx 10^{-12} \text{ m}^2$ ), ist der „Proportionalitätsfaktor“ im Darcy'schen Gesetz mit dem Strömungsgeschwindigkeit zu Druckgefälle und dem Inversen der Viskosität in Beziehung gesetzt werden. Für Grundwasser sind Angaben als Durchlässigkeitsbeiwert in Metern pro Sekunde üblich.

**Filterkuchen:** Ein von der Bohrspülung oder dem Bohrschlamm an der Bohrlochwandung gebildeter Belag, der sich beim Durchteufen poröser und permeabler Schichten unter dem Differenzdruck zwischen dem hydrostatischem Druck der Spülungssäule und dem Schichtdruck bildet. Aufgaben des Filterkuchens sind die Unterbindung von Zuflüssen aus dem Bohrloch ins Gebirge und Unterbindung von Zuflüssen aus dem Gebirge ins Bohrloch.

Filterkucheneigenschaften wie Dicke, Konsistenz, Glätte und Durchlässigkeit sind wichtig, denn der an der Bohrlochwand gebildete Filterkuchen kann bei schlechter Ausbildung zu Stuck Pipe und anderen Bohr- und Zementationsproblemen führen. Schlechte Filterkuchenausbildung kann auch zu Formationsschädigungen führen und damit zu reduzierten Förderraten für Öl- und Gas.

**Flowback:** In der initialen Rückförderphase nach einer hydraulischen Bohrlochbehandlung geförderte Flüssigkeit, die sich aus zurückgeförderten Behandlungs-Fluiden und aus Lagerstättenwasser zusammensetzt.

**Förderrate:** Die Menge an Gas bzw. Öl, die in einem definierten Zeitraum aus einer Bohrung gefördert wird. Angegeben wird diese vorzugsweise in Volumen pro Zeiteinheit, also  $\text{m}^3/\text{h}$ ,  $\text{m}^3/\text{d}$  oder in Masse pro Zeiteinheit, also  $\text{t}/\text{h}$  oder  $\text{t}/\text{d}$ .

**Frackdruck (Aufbrechdruck/Breakdown Pressure, Ausbreitungsdruck/Extension Pressure, Schließdruck/Closure Pressure):**

Der Aufbrechdruck (Formation Breakdown Pressure) ist der Druck, bei dem sich an der Bohrlochwand Risse im Gestein bilden. Er ist üblicherweise größer als der Druck, der erforderlich ist, um den Riss in der Formation auszubreiten, da er beeinflusst wird durch Bohrlöcheffekte.

Der Riss-Ausbreitungsdruck ist der Druck, der innerhalb des Risses herrschen muss, um ihn auszubreiten. Er ist in der Regel kleiner als der Aufbrechdruck und immer größer als der Riss-Schließdruck.

Der Riss-Schließdruck ist der Druck, den die Formation auf die Stützmittel im Riss ausübt. Es ist auch der Mindestdruck, der innerhalb des Risses herrschen muss, um ihn offen zu halten.

**Futterrohr:** Stahlrohre großen Durchmessers – auch Casing genannt – , die zu Rohrtouren verbunden in das offene Bohrloch eingefahren und einzementiert werden. Futterrohre sind in der Regel ca. 40 ft (12 m) lang. Sie werden meist mit Außengewinde an beiden Enden des Rohres hergestellt und durch kurze Gewindemuffen mit Innengewinde miteinander verschraubt. Futterrohre können auch mit Außengewinde auf der einen und Innengewinde auf der anderen Seite hergestellt werden. Auch durch Schweißen ist eine Verbindung der Futterrohre möglich.

Durch das Verbundsystem Verrohrung und Rohrzementation wird das Bohrloch stabilisiert und eine Migration von Fluiden zwischen angrenzenden geologischen Schichten verhindert.

Futterrohre werden auf die Belastungen ausgelegt, denen sie über ihren Lebenszyklus ausgesetzt sind, z.B. Belastungen durch Außendruck, Innendruck sowie Druck- und Zug in axialer Richtung und Biegebelastungen im Falle von abgelenkten und horizontalen Bohrungen.

**Grundwasser:** Zusammenhängende Wassermengen, die in gut durchlässigen Gesteinsschichten (z. B. Sand oder Sandstein) die Porenräume füllen und gefördert werden können. Man unterscheidet „süßes“ Grundwasser in Oberflächennähe (bis zu etwa 200 Meter Tiefe), das für die Trinkwassergewinnung genutzt werden kann, und „salziges“ Grundwasser in größeren Tiefen. Ohne Barriere-Schichten dazwischen gehen diese Grundwasserschichten ineinander über.

**Hydraulische Bohrlochbehandlung:** auch Hydraulic Fracturing (Fracking) genannt ist eine Technik, mit der Gesteine behandelt werden, um künstliche Fließwege zu erzeugen. Dabei werden in den Gesteinen durch Einpressen eines Behandlungs-Fluids Risse erzeugt. Das Gestein wird hierzu aufgebrochen (engl.: fracing = aufbrechen). Damit sich die bis zu mehrere hundert Meter langen Risse nach Pumpenstopp unter dem Gebirgsdruck nicht wieder verschließen, werden Stützmittel, z.B. Sand, in die schmalen Risse eingebracht.

**Hydroisohypsen:** Aus Standrohrspiegelhöhen abgeleitete Grundwassergleichen, die – in einem Grundwassergleichenplan dargestellt – das piezometrische Gefälle im Grundwasser darstellen, aus dem die Grundwasserströmungsrichtung abgeleitet werden kann.

**Kopfdruck:** Der Druck, der sich am Kopf einer Bohrung, die eine Gesteinsschicht erschließt, einstellt. Der Druck wird am oberen Ende des zur Gesteinsschicht hin offenen Bohrlochs gemessen. Dabei ist das Bohrloch mit dem zu fördernden bzw. zu versenkenden Medium gefüllt. Für Sicherheitsbetrachtungen wird der statische Kopfdruck gemessen, bei der Messung ruht das Medium im Bohrloch. Der dynamische Kopfdruck (Kopf-Fließdruck) wird bei definierten Förderraten gemessen und charakterisiert zusammen mit der Förder- bzw. Injektionsrate die Ergiebigkeit einer Lagerstätte bzw. ihr Aufnahmevermögen.

**Messnetz:** Zur Überwachung seismischer Ereignisse im Zusammenhang mit der Erdgasförderung hat die niedersächsische Erdgasindustrie im Jahr 2007 ein seismisches Überwachungssystem eingerichtet. Auslöser waren mehrere seismische Ereignisse im Umfeld von Erdgasfeldern östlich von Bremen mit Magnituden bis zu 2,9. Das Messnetz besteht aus sechs Seismometern, die in eigens dafür hergestellten Bohrlöchern in 200 Meter Tiefe eingebaut sind. Zusätzlich sind zehn Erschütterungsmessgeräte an der Oberfläche in Gebäuden installiert.

**Lagerstätten, hier Erdöl- und Erdgaslagerstätten:** Bereiche im geologischen Untergrund, in denen Erdöl und Erdgas angetroffen wird, deren Abbau sich wirtschaftlich lohnt oder in der Zukunft lohnen könnte. Konventionelle Lagerstätten: Lagerstätten in Speichergesteinen, die bei ausreichender Durchlässigkeit mit den konventionellen Methoden des Bohrlochbergbaus ohne Einsatz aufwändiger Technologie erschlossen und wirtschaftlich gefördert werden können. Die ebenfalls in Speichergesteinen angetroffenen Tight Gas Lagerstätten werden für eine wirtschaftliche Förderung hydraulisch behandelt.

Unkonventionelle Lagerstätten: Lagerstätten in extrem geringdurchlässigen Muttergesteinsschichten, z.B. Schiefer- und Kohleschichten, die mit konventionellen Methoden wirtschaftlich nicht gefördert werden können. Ihre Erschließung erfordert die Anwendung aufwändiger Bohr- und Behandlungstechniken,

um größere Kontaktflächen zwischen Bohrloch und den geringdurchlässigen Gesteinsschichten zu schaffen. Eingesetzte Techniken sind z.B. die Horizontalbohrtechnik und die Technik der hydraulischen Behandlung (Frack-Technik).

**Lagerstätten-Modellierung/-Simulation:** Ein Verfahren, das auf Grundlage der

- physikalischen Eigenschaften der Gesteine (Permeabilität, Porosität, Spannungszustand)
- Medien in den Porenräumen (Flüssigkeiten, Gas)
- physikalischen Eigenschaften dieser Medien (Viskosität, Kompressibilität, Druck, Temperatur)
- Erhaltungssätze (insbesondere für Masse und Impuls)

Aussagen zur Größe und Ergiebigkeit einer Lagerstätte ermöglicht. Durch den Abgleich von modellierten Förderraten und -mengen mit den real erzielten Daten lassen sich die Modelle im Rahmen eines „History Matching“ verfeinern aber auch verallgemeinern. Die Lagerstättenmodellierung erfolgt heute auf der Grundlage numerischer Simulationsverfahren mit dem Computer.

**Lagerstättenwasser:** siehe Tiefenwasser

**Liner:** Eine Rohrtour, die nicht bis an die Oberfläche geführt, sondern im unteren Bereich der vorangegangenen Rohrtour verankert, abgesetzt und zementiert ist. Durch eine sogenannte Linerverlängerung kann der Liner zu einem späteren Zeitpunkt bis zur Oberfläche geführt und dort verankert werden, sollte dies erforderlich sein.

**Lithologie:** Die chemische und physikalische Beschaffenheit der Gesteine, ihre Oberflächenstruktur, ihre Eigenschaften (Festigkeit und Elastizität, Härte, bergfeuchte und trockene Gesteinsdichte, Schichtung usw.) und ihre Zusammensetzung aus einzelnen Mineralen, ihre Körnung, Farbe und teilweise ihrer Kristallstruktur.

**Monitoring:** Die Beobachtung und Überwachung bestimmter Zustände und Veränderungen in der Umwelt. Systematische Beobachtungen werden gekoppelt mit Alarm- oder Handlungsschwellen. Werden diese überschritten, löst dies Aktionspläne aus.

**Mud Logging, Sampling:** Der Prozess der Bewertung der Bohrspülung und des Bohrkleins und der Dokumentation der Ergebnisse zusammen mit relevanten Bohrparametern im sogenannten „Mud Log“ oder „Sampler Log“.

Auf der Basis von Untersuchungen und Messungen des durch die umlaufende Bohrspülung zu Tage geförderten Bohrkleins und möglichen Lagerstättenfluiden gibt das Mud Logging den ersten, wenngleich unvollständigen, interpretativen Einblick in das, was im geologischen Untergrund angetroffen wurde.

**Muttergesteine:** Sedimente, reich an organischem Material, die in der Lage sind Erdöl oder Erdgas zu bilden. Für die Bildung von Erdöl und Erdgas aus feinkörnigen Sedimentgesteinen (Tone oder Schiefer) ist ein organischer Bestandteil (Total Organic Content, TOC) von 4 bis 8 Gewichtsprozent erforderlich. Kohleschichten sind das Muttergestein für den überwiegenden Anteil des in Deutschland nachgewiesenen Erdgases.

**Nanoradiant:** Der Radiant (Einheitenzeichen: rad) dient zur Angabe der Größe eines ebenen Winkels. Er ist eine abgeleitete Einheit im SI-Einheitensystem. Der ebene Winkel von 1 Radiant umschließt auf der Umfangslinie eines Kreises mit 1 Meter Radius einen Bogen der Länge 1 Meter. Der Vollwinkel umfasst  $2\pi$  Radiant: 1 Vollwinkel =  $2\pi$  rad. Eine Nanoradiant ist  $10^{-9}$  Radiant.

**Nipple-Profil:** Teil der Komplettierung, hergestellt aus einer kurzen Sektion dickwandigen Rohres mit bearbeiteter inneren Oberfläche, mit der eine Dichtfläche und ein Arretierungsprofil geschaffen wird. Sogenannte Lande-Nippel sind in den meisten Komplettierungen enthalten, um in festgelegten Tiefen das Absetzen von Geräten zu ermöglichen, Stopfen oder Ventile zum Beispiel zur Durchflusskontrolle oder Messgeräte für Druck und Temperatur.

**Packer:** Ein hydraulisches Dichtungselement, das in eine Bohrung einfahren und auf Lokation aufgeweitet (gesetzt) wird, um das Bohrloch oder einen Ringraum dicht zu verschließen.

Packer beinhalten flexible Elemente aus Elastomeren für die Aufweitung. Die zwei üblichsten Packer-Formen sind der Produktions- oder Testpacker und der aufblasbare (inflatable) Packer. Bei Produktionspackern werden ringförmige Elemente aus Elastomeren durch zwei Metallplatten zusammengepresst und ihr Durchmesser so vergrößert. Bei aufblasbaren Packern wird ein Fluid in einen Balg des Packers gepumpt und dieser aufgeweitet.

Produktionspacker werden in verrohrten Bohrlöchern gesetzt, aufblasbare Packer können in offenen und verrohrten Bohrlöchern eingesetzt werden. Packer können am Draht, am Rohr oder mit Coiled Tubing eingefahren werden. Sie sind für den vorübergehenden Einsatz als ziehbare Packer zu haben oder auch für den Einsatz auf Dauer als Permanent-Packer. Permanent-Packer werden aus Materialien hergestellt die leicht ausgebohrt bzw. ausgefräst werden können.

**Perforation:** Der "Verbindungstunnel" vom Bohrloch durch das Futterrohr und den Zementmantel in die Lagerstätten Formation, durch den Öl und/oder Gas produziert oder Fluide injiziert werden. Bei der am häufigsten genutzten Herstellungsart kommen Perforationskanonen zum Einsatz, die im Abstand von etwa 10 cm mit Hohlladungen bestückt sind, mit denen üblicherweise etwa 30 cm lange „Tunnel“ mit einem Durchmesser im Zentimeterbereich erzeugt werden. Neben Hohlladungsperforatoren kommen auch Sandstrahl-, Kugelperforatoren zum Einsatz.

**Planfeststellungsverfahren:** Das Planfeststellungsverfahren ist ein in den §§ 72 bis 78 des Verwaltungsverfahrensgesetzes (VwVfG) besonders geregeltes Verwaltungsverfahren. Daneben gelten die Verwaltungsverfahrensgesetze der Länder. Im Bundesberggesetz ist festgelegt, dass bergbauliche Vorhaben einer Planfeststellung bedürfen, wenn dieses Vorhaben gemäß §57 c BBergG einer Umweltverträglichkeitsprüfung bedarf. Welche Vorhaben der Umweltverträglichkeitsprüfung bedürfen ist durch Rechtsvorschriften festgelegt z.B.: UVP-G (Gesetz über die Umweltverträglichkeitsprüfung) oder UVP-V Bergbau (Verordnung über die Umweltverträglichkeitsprüfung bergbaulicher Vorhaben). Das Verfahren besteht aus den Schritten:

1. Prüfung der Vollständigkeit der Planunterlagen
2. Beteiligung der Träger öffentlicher Belange und Abgabe von Stellungnahmen
3. Öffentliche Auslegung der Planunterlagen und Abgabe von Einwendungen
4. Erörterung der Stellungnahmen und Einwendungen
5. Abwägungsprozess und Beschluss-Erstellung.

Den Abschluss des Planfeststellungsverfahrens bildet der sogenannte Planfeststellungsbeschluss.

**Reservoir-Gestein:** Die Gesteine, die das Reservoir oder die Lagerstätte bilden. Im Falle konventioneller Lagerstätten handelt es sich dabei um Speichergesteine aus z.B. Sandstein und Karbonaten. Im Falle von unkonventionellen Lagerstätten sind es Muttergesteine, insbesondere Schiefer- oder Tonsteine bzw. Kohlen.

**Ringraum:** Raum zwischen den einzelnen konzentrisch eingebauten Rohrtouren bzw. zwischen Futterrohr und Bohrlochwand. Das Monitoring des Ringraumdruckes am Bohrlochkopf erlaubt die Überwachung der Integrität der einzelnen Rohrtouren. Es wird über den gesamten Lebenszyklus der Bohrung durchgeführt.

**Risiko:** Umschreibt mögliche schädliche Auswirkungen, die mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit eintreten können. So definiert lässt sich ein Risiko beeinflussen durch Reduzierung der Eintrittswahrscheinlichkeit aber auch durch Reduktion des Schadenspotentials eines Ereignisses. Bei hydraulischen Bohrlochbehandlungen kann eine Minderung der Eintrittswahrscheinlichkeit von Auswirkungen insbesondere durch technische und organisatorische Vorkehrungen (Nachweise, Design, Ausführung) erreicht werden, das Schadensausmaß insbesondere durch Einsatz von Behandlungsfluiden mit geringem Schadenspotential sowie Störfallvorsorge.

**Rotary-Verfahren:** Bohrverfahren mit einer Gesteinszerstörung durch einen sich drehenden Bohrmeißel der über ein Bohrgestänge von Übertage oder einen Bohrmotor kurz über dem Meißel angetrieben wird. Die Bohrmethode benötigt eine kontinuierliche Reinigung der Bohrlochsohle. Die Reinigung der Sohle und der Austrag des Bohrkleins werden mithilfe einer umlaufenden Bohrspülung.

**Rückförderung:** siehe Flowback

**Schichtenverzeichnis:** Das Protokoll (geologische Aufnahme) der geologischen Schichten, die bei einer Bohrung im Untergrund angetroffen werden. Die erbohrten Schichten werden mit ihrer Teufe (Tiefenlage) erfasst, benannt und ausführlich beschrieben. Für jede Schicht bzw. Tiefenlage können Angaben enthalten sein über: Boden- bzw. Gesteinsbezeichnung, Zusammensetzung (Lithologie), Mächtigkeit, Farbe, mechanische Eigenschaften, Alter, Wassergehalt, Konsistenz, Kalkgehalt usw. Das Schichtenverzeichnis ist eine Grundlage und ein wesentlicher Teil einer Bohrdokumentation.

**Schiebemuffe:** Teil der Komplettierung, mit dem durch Öffnen oder Schließen ein Fließweg zwischen Steigraum und Ringraum geschaffen werden kann.

**Seismik:** Geophysikalisches Verfahren, das zur Bestimmung von Schichtgrenzen im geologischen Untergrund eingesetzt wird. Reflexionsseismische Messungen zielen darauf ab, aus reflektierten P-Wellen (Primär- oder Longitudinalwellen) oder S-Wellen (Scherwellen) Erkenntnisse über den Aufbau des Untergrundes zu gewinnen und geologische oder geophysikalische Grenzflächen zu rekonstruieren.

Beim seismischen Verfahren mit P-Wellen macht man sich die Eigenschaft der Gesteine zunutze, dass sich Erschütterungen im Gestein als Druckwellen fortpflanzen, deren Geschwindigkeit abhängig von der Gesteinsart ist. Treffen diese Wellen auf einen Schichtübergang, an dem sich die Geschwindigkeiten und Dichten ändern, werden sie reflektiert und gebrochen. Die von den Schichtübergängen im Untergrund an die Erdoberfläche reflektierten Wellen werden von Geophonen aufgezeichnet. Aus der Laufzeit der Wellen lässt sich bei bekannter Geschwindigkeit der seismischen Wellen innerhalb der verschiedenen Schichten die Tiefe und Lagerung der reflektierenden Gesteinsschichten ermitteln. Die Erschütterungen werden durch kleine Sprengungen in flachen Bohrlöchern (Schuss-Seismik), durch Vibratoren entlang von Wegen (Vibro-seismik) oder durch Luftpulser im Wasser ausgelöst.

Die erforderliche Umrechnung der Feldmessungen von Laufzeit in Teufe (Tiefenlage) erfolgt nach Abschluss der Messungen in aufwändigen Rechenverfahren im Rahmen des seismischen „Processing“. Das Endergebnis ist ein Abbild des Untergrundes als Schnittbild unter einer seismischen Linie (2D Seismik) oder als drei-dimensionales Abbild (3D Seismik) unter einer untersuchten Fläche.

**Skin:** Ein Maß für den zusätzlichen Druckverlust und damit auch Produktivitätsverlust beim radialen Fluss auf eine produzierende Bohrung als Folge einer Schädigung des bohrlochnahen Bereiches.

**Sonde:** Für die Produktion bzw. Injektion hergerichtete Bohrungen. Hierzu werden die Bohrungen komplettiert.

**Spacer:** Ein Trennfluid, eingesetzt zwischen Spülung und Zementbrühe, um eine maximale Spülungsverdrängung vor Platzierung der Zementbrühe zu erreichen und so Vermischungszonen zwischen Spülung und Zement zu vermeiden. Hierzu wird der Spacer mit spezifischen Eigenschaften insbesondere für Dichte und Rheologie (Viskosität) hergestellt, die auf die jeweiligen Eigenschaften von Spülung und Zementbrühe abgestimmt sind.

**Speichergesteine:** Poröse oder klüftige Sedimentgesteine, die in der Lage sind, Flüssigkeiten oder Gase zu speichern. Die häufigsten Speichergesteine sind Sandstein, tonige Sandsteine und verschiedene Arten von Kalksteinen.

**Steigrohr (Tubing):** Das innerste Stahlrohr einer Bohrung, durch das Erdöl und/oder Erdgas und Wasser an die Oberfläche gefördert werden. Es wird in das fertig verrohrte und zementierte Bohrloch eingebracht und mit Hilfe eines Packers an seinem unteren Ende verankert. Der dadurch entstehende Ringraum zwischen Steigrohr und Produktionsrohrtour wird üblicherweise mit einer korrosionsschützenden Flüssigkeit (completion fluid) aufgefüllt und dazu benutzt, durch Monitoring des Ringraumdruckes die Integrität des Steigrohres zu überwachen. Das auswechselbare Steigrohr schützt die Produktionsrohrtour vor Erosion, Korrosion und Ablagerungen wie z.B. Salze.

Das Steigrohr hat in der Regel einen Durchmesser von 5-10 cm und besteht meist aus ca. 9 m langen Rohren, die miteinander verschraubt werden. Je nach Anforderung beinhaltet der Steigrohrstrang verschiedene Spezialelemente wie Untertage-Sicherheitsventil, Schiebemuffe, Nippel-Profile etc.

**Störungen:** Brüche („Trennflächen“) im geologischen Untergrund, die durch die Verschiebung oder Verformung von Gesteinsschichten entstanden sind. Sie sind nicht hohl, sondern mit Gesteinsmaterial gefüllt. Die Durchlässigkeit für Gase oder Flüssigkeiten kann entlang von Störungen höher aber auch gering sein, als die der umgebenden Gesteine.

**Stratigraphie:** Die Beschreibung von Schichtabfolgen in Sedimentgesteinen im Zusammenhang mit ihrer zeitlichen Entstehung.

**Stuck Pipe:** Teil eines Bohrstranges, der fest ist und ohne Überschreitung der zulässigen Hakenlast des Bohrgerätes weder rotiert noch vertikal bewegt werden kann.

**Testarbeiten:** Im Rahmen der Bohrungsherstellung: Untersuchungsarbeiten an als potentiell produktiv erkannten geologischen Schichten zur Prüfung ihres Schichtinhaltes, Nachweis einer mobilen Phase und Ermittlung der erforderlichen Kennwerte, insbesondere (statischer) Lagerstättendruck und Lagerstättentemperatur und Bohrungsproduktivität, d.h. der erzielbaren Förderraten in Abhängigkeit vom (dynamischen) Bohrlochfließdruck.

Im Rahmen der Förderung einer Bohrung: Untersuchungsarbeiten zur Feststellung der Kennwerte maßgeblich für die Ausförderung der Lagerstätte insbesondere (statischer) Lagerstättendruck und -temperatur, Durchlässigkeitsmächtigkeit ( $k h$ ), Bohrlochschädigung (Skin,  $s$ ) und Bohrungsproduktivität.

**Tiefbohrzement:** Eine speziell auf die Verhältnisse im Bohrloch abgestimmte Zementmischung. Nach dem Anrühren des Zementes mit Wasser erstarrt und erhärtet er infolge chemischer Reaktionen mit dem Anmachwasser selbständig. Nach dem Erhärten bleibt er auch unter Wasser fest und raumbeständig.

Als Tiefbohrzemente kommen in der Regel Portlandzemente zum Einsatz. Die Rohstoffe dieses Zementes (in der Regel Kalkstein und entweder Ton oder Schiefer) werden in Steinbrüchen abgebaut, zerkleinert und zusammen vermahlen. Das dabei entstehende Rohmehl wird dann bei Temperaturen von ca. 1.400–1.650 °C zu sogenanntem Klinker gebrannt. Die entstehenden graubraunen Granalien werden anschließend auf eine Korngröße vermahlen, die durch die Zementart bestimmt wird. Die endgültige Größe der Zementpartikel hat einen direkten Einfluss darauf, wie viel Wasser nötig ist, um eine Brühe ohne Überschusswasser herzustellen. Durch die Zumahlung von unterschiedlichen Zusatzstoffen wie Hüttensand, Puzzolan, Flugasche und Kalkstein können Zemente mit verschiedenen chemischen und physikalischen Eigenschaften hergestellt werden.

**Tiefenwasser:** Grundwasser in größeren Tiefen, das je nach den geologischen Gegebenheiten mit Salzen und Schadstoffen (Schwermetalle, radioaktive Stoffe) belastet sein kann. Kommt es in den erdgas- oder erdölführenden Schichten vor, heißt es Lagerstättenwasser.

**Tight-Gas:** Erdgasvorkommen in sehr geringdurchlässigen Speichergesteinen, wie z.B. Sandsteinen und Karbonaten, die hydraulisch behandelt werden müssen, um eine wirtschaftliche Förderung zu erreichen. Tight-Gas wird inzwischen den konventionellen Gasvorkommen zugerechnet im Gegensatz zu unkonventionellem (Schiefer- oder Kohleflöz-) Gas, das in Muttergesteinen angetroffen wird.

**Tiltmeter:** Messgerät zur Registrierung kleinster Neigungsänderungen der Erdoberfläche aus der Horizontalen. Tiltmeter werden zum Beispiel benutzt für das Monitoring von Vulkanen, den Response auf den Bau von Dämmen, kleinste Bewegungen vor potentiellen Hangrutschungen sowie von Orientierung und Volumen von hydraulisch erzeugten Rissen im Untergrund. Mit neusten Messgeräten können Neigungsänderungen bis in den Nanoradian-Bereich aufgenommen werden.

**Tracer:** Hier als Inhaltsstoff des Behandlungs-Fluids oder als gesondert hinzugegebener Stoff zu verstehen, den man einfach messen kann. Im bohrlochnahen Bereich zeigt er den Weg sich ausbreitender Flüssigkeiten oder z.B. platzierte Stützmittel an.

**Umweltverträglichkeitsprüfung (UVP):** Die Umweltverträglichkeitsprüfung ist ein unselbständiger Verfahrensbestandteil bei der Genehmigung von Vorhaben. Dabei werden die Auswirkungen des Vorhabens auf die verschiedenen Schutzgüter (z.B. Menschen und menschliche Gesundheit, Tiere, Pflanzen, Luft, Wasser, Boden, Kulturgüter und mögliche Wechselwirkungen) beurteilt. Die Umweltverträglichkeitsprüfung erfolgt in den drei Schritten:

1. Beschreibung des Ist-Zustandes
2. Beschreibung der Wirkungen des Vorhabens (z. B. Emissionen)
3. Prognose der Wirkungen auf die Schutzgüter (z. B. Immissionen) und Bewertung der Wirkungen.

Die Eingangsdaten der Umweltverträglichkeitsprüfung liefert die Umweltverträglichkeitsstudie, die Bestandteil des Antrages ist. Die Umweltverträglichkeitsprüfung selbst wird von der zuständigen Fachbehörde durchgeführt.

**Unkonventionelles Erdgas:** Erdgasvorkommen in extrem geringdurchlässigen Muttergesteinen, in denen es entstanden ist, z.B. Schiefergas (Shale Gas) und Kohleflözgas („Coal Bed Methane“ = CBM). Unkonventionelle Erdgaslagerstätten können nur durch eine künstliche Erhöhung der Durchlässigkeit, z.B. durch Schaffung von Fließwegen, wirtschaftlich erschlossen werden.

**Verbinder:** Zur Herstellung einer Rohrtour werden Futterrohre miteinander verschraubt. Die Verbindung erfolgt bei Futterrohren mit Außengewinde an beiden Enden des Rohres mit Hilfe von Gewindemuffen mit beidseitigem Innengewinde. Futterrohre können auch direkt miteinander verschraubt werden, wenn sie mit Außengewinde auf der einen und Innengewinde auf der anderen Seite hergestellt worden sind.

Um die gewünschte Dichtheit gegenüber Fluiden im erwarteten Beanspruchungsbereich zu gewährleisten, sind die einzelnen Rohre je nach Art der Rohrverbindung nach Hersteller-/Auftraggeber-Angaben zu verschrauben. Die Kontrolle der Verschraubung erfolgt über eine computerunterstützte Drehmomentaufzeichnung mit Verschraub-Diagramm zur elektronischen und visuellen Auswertung

**Verrohrung:** Das System der unterschiedlichen Stahlrohrtouren, die in ein Bohrloch eingebracht werden, um zusammen mit der Zementierung insbesondere die Nutzwasserhorizonte zu schützen, das Bohrloch zu stabilisieren und Formationen geringer Festigkeit, Verlustzonen und Zonen anormaler Formationsdrücke zu isolieren. Zur Verrohrung zählen die Rohrtouren:

- **Standrohr:** Die Rohrtour für den ersten Bohrlochabschnitt. Es wird entweder gerammt oder der Bohrlochabschnitt wird für das Einbringen des Standrohres gebohrt. Diese Rohrtour hat die Aufgabe ein Unterspülen der Fundamente der Bohranlage und des Bohrplatzes zu verhindern.
- **Ankerrohrtour:** Die dem Standrohr nachfolgende Rohrtour. Sie überdeckt die für eine Nutzung vorgesehenen Grundwasserleiter als Barriere und nimmt die Bohrlochabspernung auf. Sie wird bis zu Tage zementiert.
- Die tieferen Rohrtouren können entweder bis an die Oberfläche geführt oder sie können im unteren Bereich der vorangegangenen Rohrtour als sogenannter Liner verankert, abgesetzt und zementiert werden.
- **Zwischenrohrtour:** Rohrtour zwischen Anker- und Produktionsrohrtour, die rein bohrtechnische Aufgabenstellungen erfüllt.
- **Produktionsrohrtour:** Die letzte Rohrtour, die in ein Bohrloch eingebracht wird. Sie nimmt die Komplettierung auf und wird ggf. während der hydraulischen Behandlung und der nachfolgenden Produktion belastet.
- **Produktionslinier:** siehe Linier

**Verfüllung:** Verschluss einer Bohrung, wenn diese nicht länger benötigt wird. Die Mindestanforderungen an Verfüllungen sind dokumentiert in einer „Richtlinie über das Verfüllen auflässiger Bohrungen“, die durch die Aufsichtsbehörde erlassen wurde. Die Richtlinie sieht vor, dass im Rahmen einer Verfüllung der Kontakt zum geologisch Anstehenden durch eine Bodenzementierung verschlossen wird. Oberhalb dieses Zementstopfens werden in der Rohrfahrt in bestimmten Abständen weitere Zementbrücken gesetzt, gegebenenfalls in Kombination mit mechanischen Stopfen. Zur Minimierung von Risiken werden die Brücken üblicherweise in potentiellen Problemzonen platziert, zum Beispiel im Bereich des Liner Tops, geschnittener Rohre etc. Wird ein Bereich mit fehlender Zementierung hinter den

**WEG-Richtlinie****„Praxis der hydraulischen Bohrlochbehandlung  
für konventionelle Speichergesteine“**

Stand: 06/2014

Seite 67 von 67

Rohren ausgemacht oder wird ein solcher vermutet, erfolgt normalerweise im Rahmen einer Squeeze-Zementierung die Verpressung von Zementbrühe hinter die Rohrtouren. Der Zwischenraum zwischen den Zementbrücken in der Rohrtour wird mit einer beschwerten Bohrspülung ausgefüllt. Auch vollständige Füllungen der Rohrtour mit Zement sind üblich. Im oberflächennahen Bereich werden die Rohrtouren in etwa drei Metern Tiefe geschnitten und mit einer Zementplatte abgedeckt beziehungsweise mit einer Stahlplatte zugeschweißt.

**Wasserschutzgebiet:** Wasserschutzgebiete sind Areale, für die zum Schutz von Gewässern vor schädlichen Einflüssen besondere Gebote und Verbote gelten. Wasserschutzgebiete dienen der Reinhaltung des Wassers als Lebensgrundlage für Mensch und Umwelt.

Das Wasserschutzgebiet ist ein gesetzliches Instrument, Grundwasserareale zu schützen. Es ist in mehrere Zonen gegliedert, für die abgestufte Handlungsbeschränkungen und Verbote gelten. Wasserschutzgebiete sollen den Einzugsbereich von Trinkwassergewinnungsanlagen frei von wassergefährdenden Stoffen halten und werden durch die zuständigen unteren Wasserbehörden festgesetzt.

**WGK-Bereich:** (Wasser-Gefährdungs-Klassen Bereich) Der Bereich eines Bohrplatzes für Bohranlagenunterbau mit Bohrkeller, Maschinenstellfläche, Dieselöllager und ggf. Spülungstanks, "solids control"-Equipment und Bohrgutbehälter. Er ist so ausgelegt, dass wassergefährdende Flüssigkeiten nicht in den Boden eindringen können und von den sonstigen Bereichen des Platzes durch bauliche und infrastrukturelle Maßnahmen, die auch Starkregen-Niederschlagsmengen berücksichtigen, abgetrennt.

**Zementation:** Die feste Verankerung der Verrohrung im Bohrloch. Die Zementation wird so hergestellt, dass ein dichter Abschluss des Bohrlochs erreicht wird. Die Zementation wird ferner so bemessen, dass nutzbare Wasserstockwerke, nicht genutzte Erdöl- oder Erdgasträger und laugenführende Gebirgsschichten abdichtet werden und ein Eindringen von Wasser in nutzbare Lagerstätten vermieden wird.