

Nachhaltiger Umgang mit Lagerstättenwasser aus der Erdgasförderung der RWE Dea AG in Niedersachsen

Studie

Auftraggeber

RWE Dea AG
Überseering 40
22297 Hamburg

Autoren

Diplom-Geologe Dr. Hanno Paetsch,

IGU – Institut für Geologie und Umwelt GmbH,
31319 Sehnde, Glückaufstraße 50

Diplom-Chemiker Dr. Hans-Bernhard Rhein,

Umweltkanzlei Dr. Rhein Beratungs- und Prüfgesellschaft mbH,
31157 Sarstedt, Bahnhofstraße 17

Diplom-Geologe Dr.-Ing. Thomas Röckel,

Piewak & Partner GmbH – Ingenieurbüro für Hydrogeologie und Umweltschutz,
95444 Bayreuth, Jean-Paul-Straße 30

Diplom-Ingenieur Axel Sperber,

IDEAS Ing. Büro A.Sperber
31234 Edemissen, Grüne Riede 20

Projektnummer

2013-236

Datum, Ort

01.07.2014
31319 Sehnde

Umfang des Berichtes

254 Seiten, 89 Tabellen, 22 Abbildungen, 5 Anlagen

HINWEISE ZUR GLIEDERUNG UND ZUR BEARBEITUNG DER STUDIE

Die vorliegende Studie gliedert sich in acht Hauptkapitel, zwei Kapitel mit Verzeichnissen und vier Gutachtenanlagen (Sonderteile A-D) sowie eine CD-ROM mit Dateiunterlagen/Dokumenten der RWE Dea AG, die zur Bearbeitung zur Verfügung standen und als vertraulich gehandhabt werden (vgl. Quellenverzeichnis).

Die Ergebnisse der Studie sind in einer Kurzfassung zusammengefasst, die dieser Studie ebenfalls angehängt ist.

Am Ende der Studie befinden sich folgende Verzeichnisse (Kapitel 9 und 10):

- Abkürzungsverzeichnis
- Tabellenverzeichnis
- Abbildungsverzeichnis
- Verzeichnis der verwendeten Rechtsquellen
- Verzeichnis der Anhänge/Sondergutachten
- Quellenverzeichnis
- Literaturverzeichnis

Im Laufe der Bearbeitung, seit etwa März 2013 bis nahezu zum Ende der Bearbeitung, wurden aktuelle Daten/Analysen und Erkenntnisse aus anderen Projekten nachgereicht. Dadurch kann es vorkommen, dass einzelne Zahlenangaben und Berechnungen nicht immer auf der gleichen Datenbasis beruhen (geringfügige Abweichungen von Mengenangaben). Insbesondere die Erarbeitung der Aufbereitungsverfahren erfolgte nahezu parallel und gibt den heutigen Erkenntnisstand wieder. Sämtliche Änderungen oder Ergänzungen, die während der Bearbeitung erfolgten, sind bei der Bewertung berücksichtigt worden.

Bei den im Text und in den Tabellen dargestellten Werten handelt es sich oftmals um Ergebnisse von komplexen Berechnungen, die zur besseren Lesbarkeit sinnvoll gerundet worden sind. Die verwendete Datenbasis und die Berechnungsweise sind in der Regel angegeben. Zusätzlich sind auf der CD-ROM mit den Dateiunterlagen/Dokumenten (vgl. Quellenverzeichnis) die Tabellen aus der Studie mit den Zahlenwerten hinterlegt, wie sie für die weiteren Berechnungen verwendet wurden.

INHALTSVERZEICHNIS

1	AUFGABENSTELLUNG / ZIELSETZUNG	7
2	AUSGANGSSITUATION	8
2.1	Feldesentwicklung / Entstehung	9
2.1.1	Lage der Bohrungen.....	10
2.1.2	Prognose der Lagerstättenwassermengen	19
2.1.3	Lagerstättenwasserzusammensetzung	21
2.1.4	Anfallstellenbeschreibung des Lagerstättenwassers	31
2.2	Bestandteile des Lagerstättenwassers	37
2.2.1	Anorganische Verbindungen (Salzgehalt und Schwermetalle)	41
2.2.2	Organische Verbindungen (Kohlenwasserstoffe, BTEX-Aromate).....	44
2.2.3	Natürliche radioaktive Stoffe (NORM)	46
2.2.4	Schwebstoffe / abfiltrierbare Stoffe	50
2.2.5	Regionale Charakteristik	52
2.3	Rechtliche Rahmenbedingungen	60
2.4	Ist-Zustand / momentaner Umgang mit Lagerstättenwasser	66
2.4.1	Transport (Leitungen, TKW).....	66
2.4.2	Entsorgung	67
2.4.3	Versenkung	67
2.5	GefahrenEinstufung und Ökotoxikologie	68
2.6	Literaturbetrachtung und Studien zur Aufbereitung von Lagerstättenwasser	69
3	METHODIK ZUR AUSWAHL VON VERFAHRENSOPTIONEN	74
3.1	Grundsätze	74
3.2	Betrachtungsrahmen	74
3.3	Vor- und Nachteile einzelner Optionen, Ausschluss-Kriterien	75
3.4	Technische/rechtliche Zielvorgaben	76
3.4.1	Anforderungen an die Abfalldeponierung.....	78
3.4.2	Anforderungen an NORM-belastete Rückstände.....	85
3.4.3	Anforderungen an die Direkteinleitung	87
3.4.4	Anforderungen an die Indirekteinleitung.....	92
3.4.5	Anforderungen an NORM-belastetes Abwasser	96

3.4.6	Maßstäbe für Langfristigkeit / Nachhaltigkeit	97

4 AUSWAHL UND BESCHREIBUNG DER BETRACHTETEN

OPTIONEN	100
4.1 Option 1: Injektion	101
4.1.1 Vorteile der Option 1	102
4.1.2 Voraussetzungen, Ausschluss-Kriterien.....	103
4.1.3 Rechtsvorgaben	103
4.1.4 Transport.....	104
4.1.5 Aufbereitung	104
4.1.6 Verbleib	109
4.1.7 Optimierungsmöglichkeiten / offene Fragen.....	109
4.2 Option 2: Bergbauliche Verwertung, z.B. ehemalige Salzlagerstätten	110
4.2.1 Vorteile der Option 2	110
4.2.2 Voraussetzungen, Ausschluss-Kriterien.....	111
4.2.3 Rechtsvorgaben	111
4.2.4 Transport.....	112
4.2.5 Aufbereitung	112
4.2.6 Verbleib	117
4.2.7 Optimierungsmöglichkeiten / offene Fragen.....	117
4.3 Option 3a: Aufbereitung des LaWa durch Verdampfung und Kondensation mit dem Ziel der (Direkt-)einleitung	119
4.3.1 Vorteile der Option 3a	119
4.3.2 Voraussetzungen, Ausschluss-Kriterien.....	119
4.3.3 Rechtsvorgaben	120
4.3.4 Transport.....	122
4.3.5 Aufbereitung	122
4.3.6 Verbleib	126
4.3.7 Optimierungsmöglichkeiten / offene Fragen.....	127
4.4 Option 3b: Aufbereitung des Lagerstättenwassers durch phys.-chem. und thermische Behandlung mit dem Ziel der Indirekteinleitung	128
4.4.1 Vorteile der Option 3b	129
4.4.2 Voraussetzungen, Ausschluss-Kriterien.....	129
4.4.3 Rechtsvorgaben	129
4.4.4 Transport.....	130

4.4.5	Aufbereitung	130
4.4.6	Verbleib	135
4.4.7	Optimierungsmöglichkeiten / offene Fragen.....	136
5	BEURTEILUNG DER OPTIONEN	137
5.1	Grundlagen	137
5.2	Gewähltes Vorgehen und Festlegung der Bewertungskriterien	145
5.3	Ressourcenverbrauch	149
5.3.1	Primärenergieverbrauch.....	149
5.3.2	Betriebs- und Hilfsmittelverbrauch	161
5.3.3	Art und Umfang des Platzbedarfs	163
5.4	Emission und Schadstofffreisetzung	165
5.4.1	Freisetzungsrisiko beim Transport ohne NORM	167
5.4.2	Freisetzungsrisiko bei der Aufbereitung inkl. Lagerung ohne NORM.....	174
5.4.3	Verteilung der in den NORM enthaltenen Radioaktivität.....	178
5.4.4	(Verkehrs)lärm.....	191
5.5	Schadstoffverbleib und -verteilung	192
5.5.1	Gefährdungspotential nicht verwertbarer Rückstände einschl. NORM.....	193
5.5.2	Gefährdungspotential des aufbereiteten Lagerstättenwassers	199
5.6	Grundwasserschutz	201
5.7	Nachhaltigkeit	206
5.7.1	Veränderung des Verbleibortes durch das aufbereitete Lagerstättenwasser	206
5.7.2	Beeinflussung der Langzeitstabilität des Verbleibortes durch das aufbereitete Lagerstättenwasser	207
5.7.3	Kapazität des Verbleibortes für Lagerstättenwasser und Abfälle	209
5.7.4	Langzeitstabilität des Verbleibortes der festen Abfälle/Rückstände	212
6	VERGLEICHENDE BEWERTUNG	213
7	ALTERNATIVOPTIONEN UND ERGÄNZUNGEN	221
7.1	Zentrale bzw. dezentrale Behandlung	222

7.2	Transport (LKW / Bahn / Pipeline)	223
8	GUTACHTERLICHE EMPFEHLUNG UND AUSBLICK	225
9	VERZEICHNISSE	228
9.1	Abkürzungsverzeichnis	228
9.2	Tabellenverzeichnis	231
9.3	Abbildungsverzeichnis	238
9.4	Verzeichnis der verwendeten Rechtsquellen	240
9.5	Verzeichnis der Anhänge/Sondergutachten	245
9.6	Quellenverzeichnis	246
10	LITERATURVERZEICHNIS	250

1 AUFGABENSTELLUNG / ZIELSETZUNG

Die RWE Dea AG fördert in Niedersachsen aus verschiedenen Erdgasfeldern Erdgas. Im Zuge der Förderung wird aus der Erdgaslagerstätte neben dem Erdgas auch natürlich vorkommendes Lagerstättenwasser mit z.T. hoher Salinität mitgefördert.

Der saline Anteil setzt sich im Wesentlichen aus Natriumchlorid, Calciumchlorid, Kaliumchlorid und Magnesiumchlorid zusammen. Die mitgeförderten Wässer können auch unterschiedliche Anteile von Kohlenwasserstoffen sowie andere Stoffe, wie z.B. Quecksilber oder natürlich vorkommende radioaktive Stoffe, sogen. NORM-Stoffe, enthalten. Der Anteil des Lagerstättenwassers am produzierten Erdgas hängt von verschiedenen Faktoren, wie z.B. dem Alter der Bohrung, ab. Zurzeit fällt im Bereich der Förderbetriebe Niedersachsen eine Lagerstättenwassermenge von ca. 90.000 m³/Jahr an. In den kommenden beiden Jahren wird diese Menge aufgrund steigender Verwässerung voraussichtlich auf ca. 130.000 m³/Jahr steigen, um anschließend bis 2030 aufgrund sinkender Förderraten wieder kontinuierlich abzunehmen.

Das bei der Erdgasförderung anfallende Lagerstättenwasser wurde in der Vergangenheit zu einem großen Teil in Disposalbohrungen (Versenkbohrungen) in den sogenannten Kalkarenit (geologische Schicht in ca. 1000 m Tiefe) eingebracht. Die RWE Dea AG ist gefordert, Alternativen für den Umgang und Verbleib der Lagerstättenwässer zu suchen, zu prüfen und zu bewerten.

Für die Erstellung der Studie wurden von der RWE Dea AG die Autoren dieser Studie zu deren interdisziplinärer Bearbeitung als Gutachter beauftragt.

Innerhalb der Studie wurden verschiedene Optionen zum langfristigen Umgang mit dem Lagerstättenwasser aus der Erdgasförderung der RWE Dea AG in Niedersachsen bezüglich ihrer Umweltverträglichkeit und Nachhaltigkeit bewertet und miteinander verglichen. Darüberhinaus wurden auch die Vor- und Nachteile einer dezentralen Aufbereitung, sowie verschiedene Transportmöglichkeiten für das Lagerstättenwasser betrachtet.

Grundlage für diese Bewertung ist eine ausreichende Datenbasis zum Aufkommen und zur Zusammensetzung des Lagerstättenwassers, die innerhalb dieser Studie ebenfalls zu erarbeiten war. Des Weiteren waren die vorliegenden technischen Konzepte zur Aufbereitung, Behandlung und Verwertung des Lagerstättenwassers und der bei der Aufbereitung und Behandlung entstehenden Reststoffe zu prüfen und zu bewerten.

2 AUSGANGSSITUATION

Zur Gutachtenbearbeitung liegen eine Vielzahl von Detaildaten einzelner Bohrungen vor, die von der RWE Dea AG zur Verfügung gestellt wurden. Es handelt sich für den Untersuchungszeitraum von Februar 2012 bis Mai 2013 um alle in Produktion befindlichen 33 Bohrstellen bzw. 27 Anfallstellen (zwei bis sechs Bohrungen mit jeweils einer gemeinsamen Gastrocknungsanlage) unter Berücksichtigung der Daten der Einzelanalysen umweltrelevanter Stoffgruppen und Messparameter, die zum Teil vom RWE Dea - eigenen Labor in Wietze, zum Teil von Fremdlaboren erstellt wurden, wird für die nachfolgende Bewertung von einer **anhand der anfallenden Menge gewichteten mittleren Zusammensetzung des Lagerstättenwassers** nach Vorbehandlung an den Bohrstellen ausgegangen [U19-22, U47-48, U57].

Aufgrund der aktuellen Entsorgungslage [U12] wurden nach Vorauswahl die ökologisch sinnvollen und umsetzbaren Optionen der Aufbereitung und des Verbleibs des Lagerstättenwassers diskutiert, die einer ökologischen Bewertung unterzogen werden sollten. Diese Optionen sind:

- Injektion ins Rotliegende nach Entfernung von Sedimenten und abscheidbaren Kohlenwasserstoffen
- Einsatz zur Flutung in stillgelegten Salzbergwerken nach Entfernung von abscheidbaren Kohlenwasserstoffen und BTEX
- Vorbehandlung bzw. Aufbereitung mit Methoden der Abwassertechnik und dem Ziel einer Direkt- oder Indirekteinleitung

Variationen dieser Optionen lassen sich herleiten über unterschiedliche Transportmittel, Zentralisierung oder Dezentralisierung einer Aufbereitung sowie den Einsatz von kommunalen und industriellen Kläranlagen bzw. externen Entsorgungsdienstleistern mit chemisch-physikalischen Behandlungsanlagen (CP-Anlagen) für komplexe Abwässer bzw. flüssige Abfälle.

2.1 Feldesentwicklung / Entstehung

Lagerstättenwasser ist ein natürlicher Begleiter bei der Förderung von Erdgas aus tieferliegenden Gesteinsformationen. Seine Zusammensetzung kann über folgende Inhaltsstoffe klassifiziert werden:

- Salze
- Kohlenwasserstoffe (aromatisch, aliphatisch)
- Schwermetalle
- Ungelöste Stoffe
- Betriebschemikalien

Ferner weist das Lagerstättenwasser Anteile an natürlich vorkommenden radioaktiven Elementen (NORM) auf. Seine genaue nicht anthropogen beeinflusste Zusammensetzung bestimmt sich nach dem Aufbau und den Bestandteilen der Lagerstätte und variiert – abhängig vom Förderzeitraum und von der Fördermenge – von Bohrung zu Bohrung. Kennzeichnend ist in jedem Fall eine Kombination aus salinarem Haftwasser und aus weitgehend salzfreiem Kondenswasser. Letzteres entsteht beim Austritt aus der Bohrung aus dampfförmig vorliegendem Lagerstättenwasser, das im Zuge der Erdgasförderung durch Abkühlung und Druckentspannung kondensiert.

Das geförderte Lagerstättenwasser kann zwar im Einzelfall und in untergeordneten Anteilen auch Reste sog. Frac-Flüssigkeiten enthalten, die der Bohrung zuvor bei einem eventuellen Einsatz der Frac-Technologie in geringem Maße zugesetzt wurden. Da Frac-Flüssigkeiten direkt nach einem Frac zurückgefördert werden und das Lagerstättenwasser, das diese Frac-Flüssigkeiten enthält, separat gesammelt und entsorgt wird, sind diese Wässer nicht Gegenstand der nachfolgenden Betrachtungen zum Umgang mit Lagerstättenwasser.

Da die Menge an Lagerstättenwasser von der Lagerstätte und dem Förderzeitraum abhängt, stehen Mengenprognosen im engen Zusammenhang mit der angestrebten Förderrate und Ausbeute an Erdgas [U23, U24, U32, U54].

2.1.1 Lage der Bohrungen

Die RWE Dea AG fördert als Operator in Niedersachsen aus drei Regionen Erdgas. In den folgenden Abbildungen sind diese Förderregionen (Abbildung 1: Übersichtsplan), sowie die Lage der einzelnen Bohrplätze (Abbildungen 2 bis 4) dargestellt [U13-18].

In der Tabelle 1 sind die einzelnen Bohrstellen des Förderbetriebes Niedersachsen (FBN) aufgeführt.

Tabelle 1: Erdgasfelder mit Angabe der im Untersuchungszeitraum in Förderung befindlichen Bohrplätze

Erdgasfeld	Kürzel	Bohrung	Anmerkung
Völkersen	VKRN	Z1, Z3 bis Z11	Z3/Z11 und Z5/Z6 mit jeweils einer gemeinsamen Gastrocknungsanlage, Z7 bis Z10 über Zentrale Gastrocknungsanlage ZGTA (insgesamt fünf Anfallstellen)
Völkersen Nord	VK-N	Z1, Z2, Z4 bis Z6	Z1/Z5 mit einer gemeinsamen Gastrocknungsanlage = Anfallstelle
Bötersen	BTSN	Z2, Z6, Z8, Z10	
Hemsbünde (Rotenburg-Söhlingen)	HMSB	Z1 bis Z6	
Osthannover (Celle-Bleckmar, Wietze Becklingen, Wietze Wardböhlen)	BCKN	Becklingen Z1, Z2	
	BLKM	Bleckmar Z1	gemeinsame Gastrocknungsanlage mit WARB-Z1
	WARB	Wardböhlen Z1	s.o.
Höhnsmoor	HOEM	Z1	
Langenhörn	LANG	Z1	
Rotenburg-Weissenmoor	WNMR	Z1	
Westerholz	WSTH	Z1	

Es liegen zu allen Bohrungen bzw. gemeinsamen Anfallstellen Analysedaten vor.

Nachhaltiger Umgang mit Lagerstättenwasser - Studie

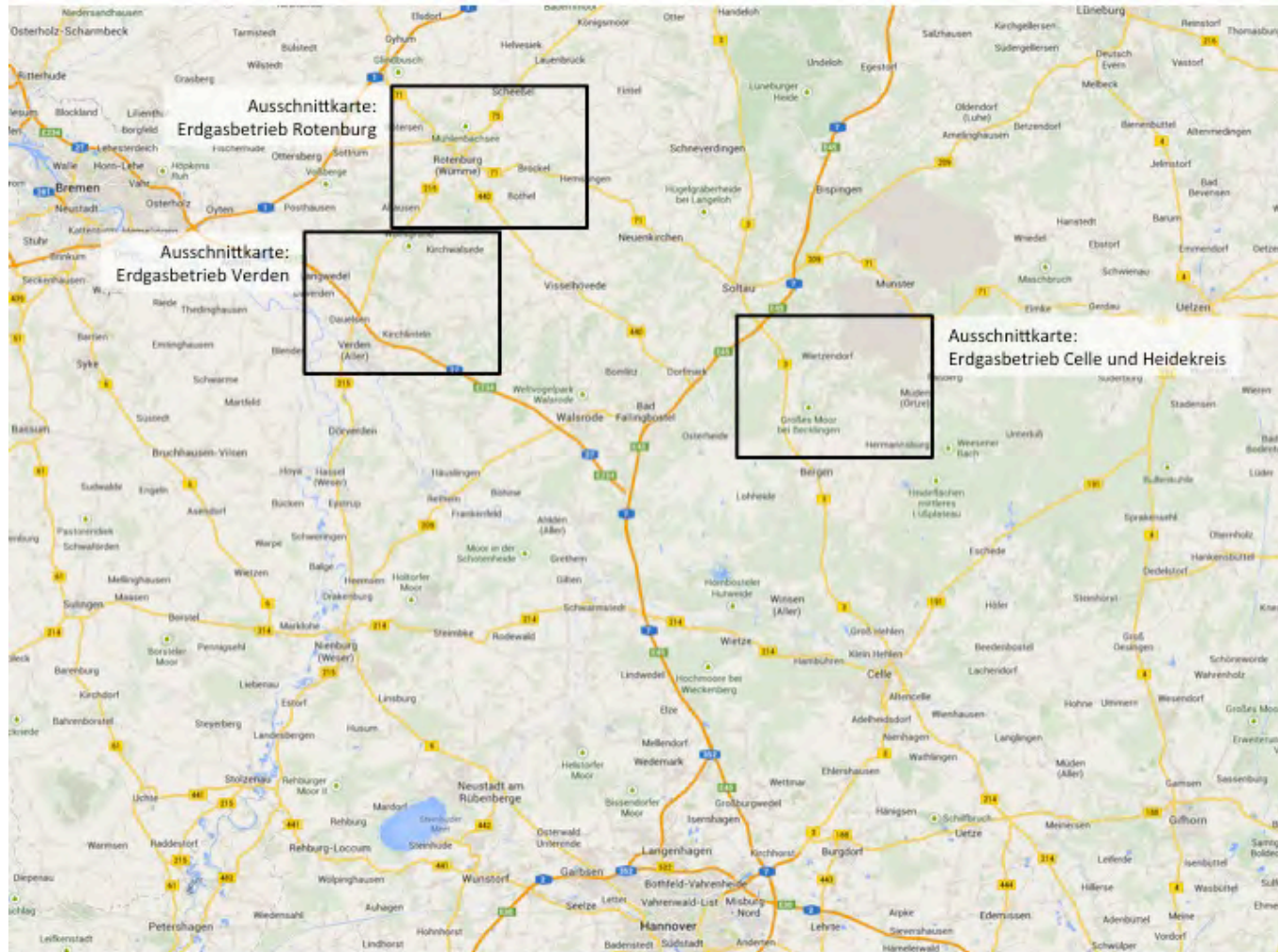


Abbildung 1: Übersichtskarte über die Förderregionen der RWE Dea AG in Niedersachsen

Nachhaltiger Umgang mit Lagerstättenwasser - Studie

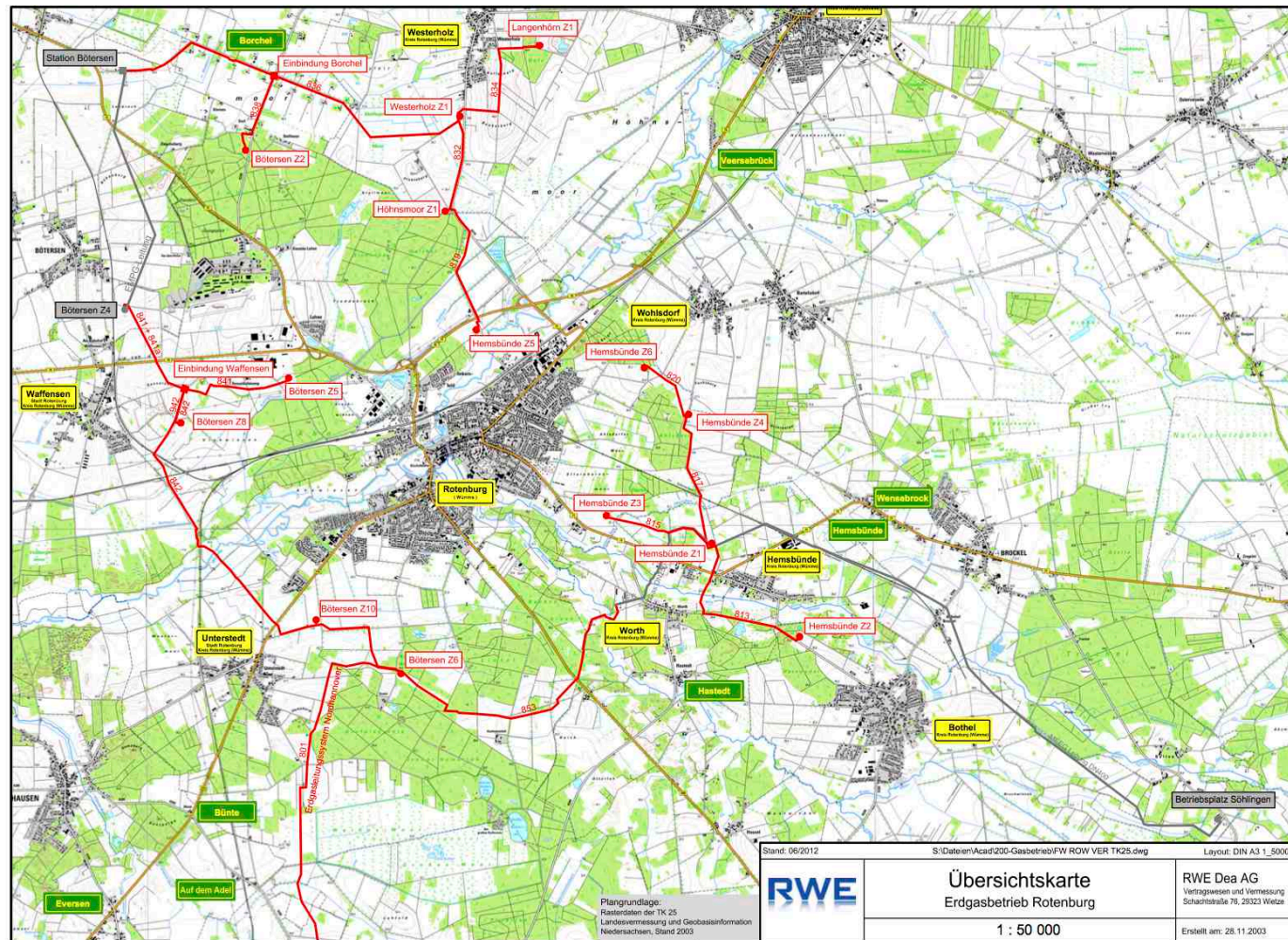


Abbildung 2: Erdgasbetrieb Rotenburg mit der Lage der einzelnen Bohrplätze

Nachhaltiger Umgang mit Lagerstättenwasser - Studie

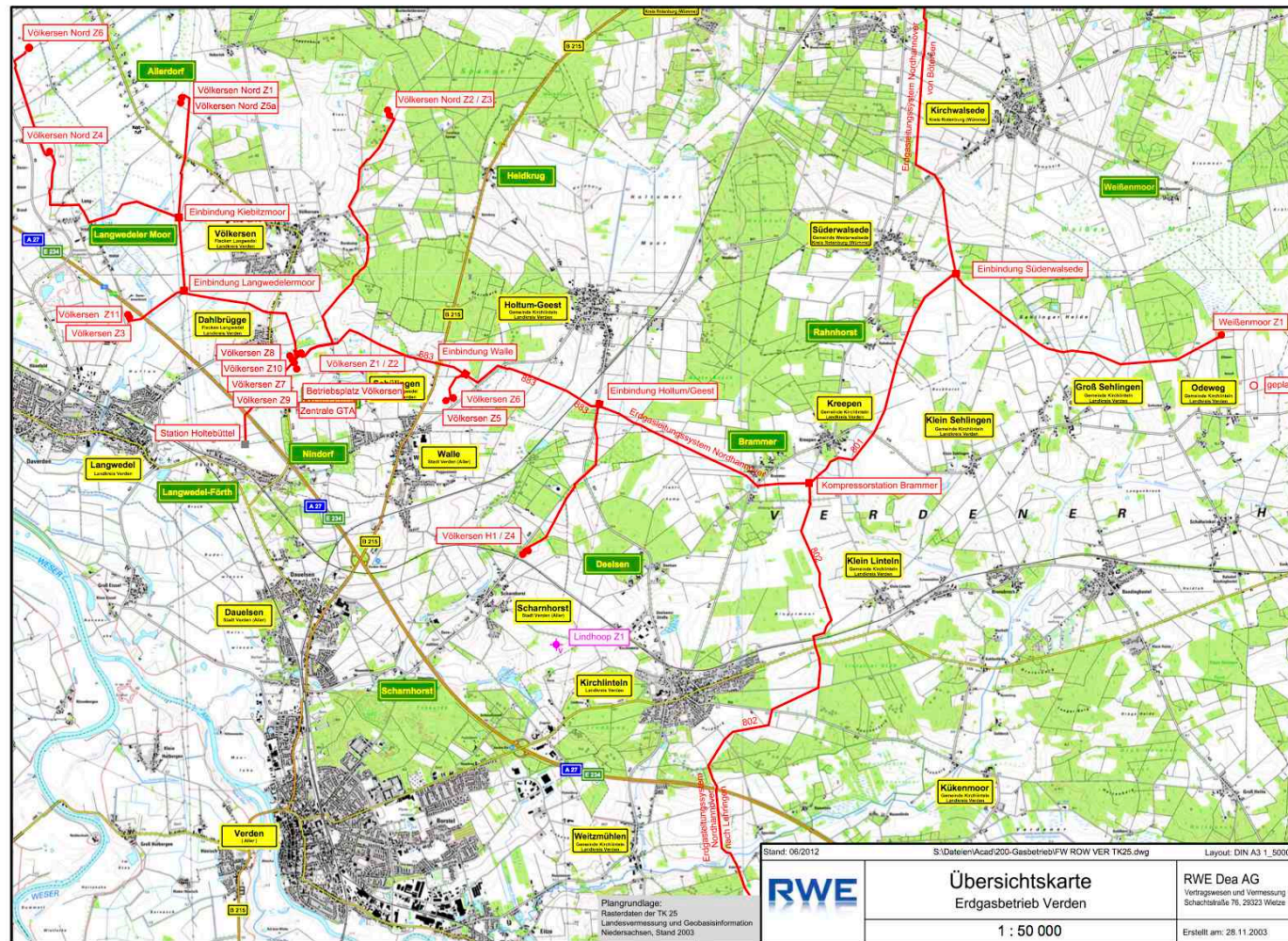


Abbildung 3: Erdgasbetrieb Verden mit der Lage der einzelnen Bohrplätze

Nachhaltiger Umgang mit Lagerstättenwasser - Studie

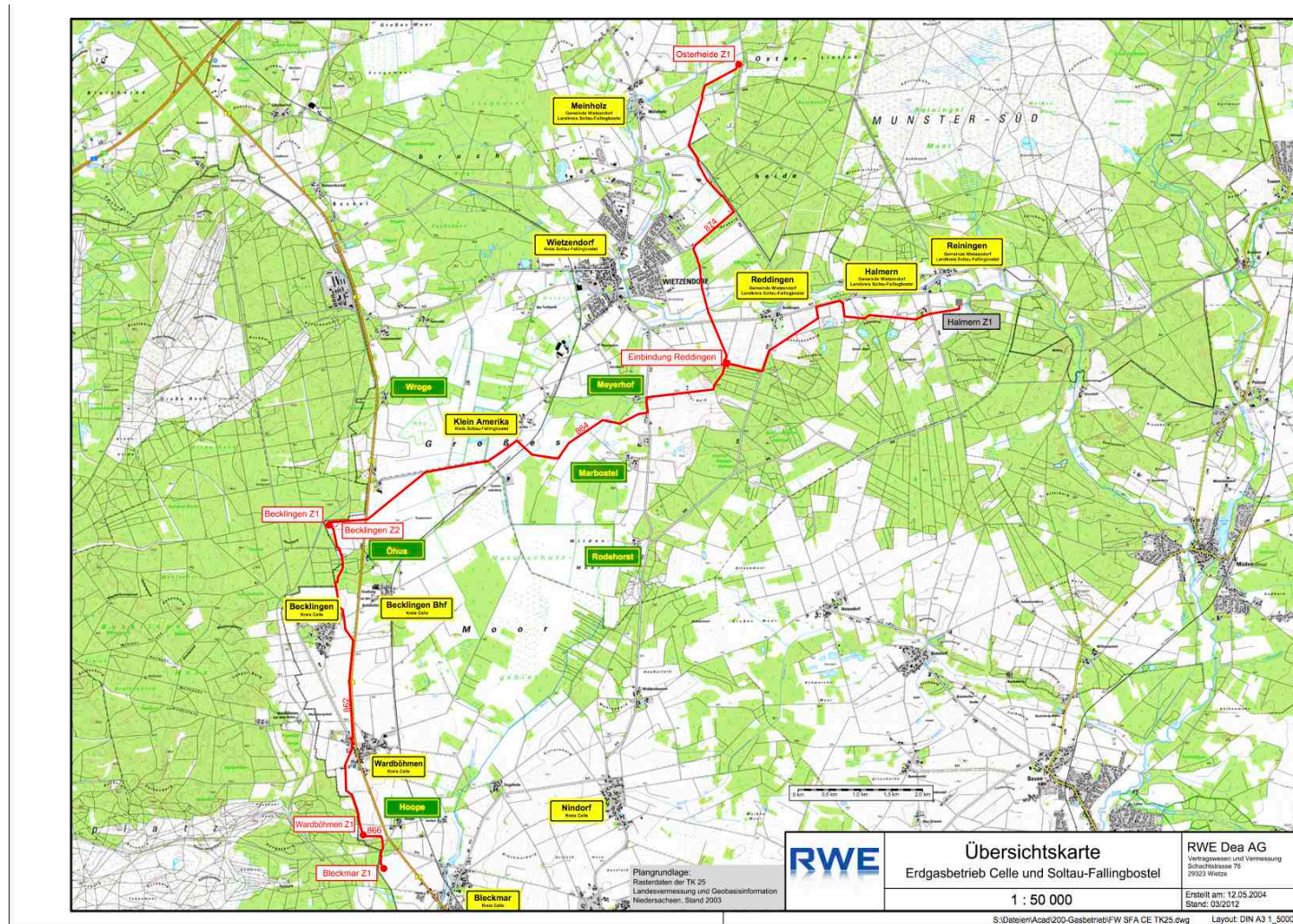


Abbildung 4: Erdgasbetrieb Celle und Heidekreis mit der Lage der einzelnen Bohrplätze

An einzelnen Bohrstellen oder an Doppellokationen (siehe Tabelle 1) sowie dem Zentralplatz Völkersen mit vier Bohrstellen an einer Gastrocknungsanlage wird das Gas getrocknet und es fällt Lagerstättenwasser an. Aus der Lage der Anfallstellen werden die Fahrtstrecken für die verschiedenen Optionen anhand der Straßenentfernung zwischen Anfallstellen und Zielorten mittels www.maps.google.de ermittelt. Die Anzahl der jährlichen Fahrten wird anhand der für die jeweilige Anfallstelle ermittelten Lagerstättenwassermengen (vgl. Tabelle 2) mit TKW-Transporten mit jeweils 25 m³ (bei den nachfolgenden Berechnungen gleichgesetzt mit Mg) ermittelt:

- Anfallstellen – Völkersen Nord Z3
(Option 1: Injektion ins Rotliegende) = 77.961 km/a
- Anfallstellen – Kalibergwerk
(Option 2: Flutung, Aufbereitung am Bergwerk) = 450.312 km/a
- Anfallstellen – Kläranlage Verden
(Option 3: Aufbereitung für Einleitung) = 91.045 km/a

Für die IST-Entfernungen der derzeitigen Entsorgungsfahrten wird auf [U27] Bezug genommen.

Nachhaltiger Umgang mit Lagerstättenwasser - Studie

Tabelle 2: Entfernungen der Bohrungen zu den jeweiligen Zielorten der verschiedenen Optionen (eigene Erhebung und [U27])

Sondenplatz / Startort	Straße	Ausgangsparameter		Option 1 (Injektion) Zielort: Völkersen-Nord Z3 (Düvelshagen bei Völkersen)		Option 2 (Flutung im Salzwerk) Zielort: Kaliwerk Mariagluck, Höfer bei Celle		Optionen 3a und 3b (Aufbereitung) Zielort: Kläranlage Verden (Aller), Weserstraße 100	
		TKW-Fassung [m ³]: 25							
		LaWa-Prognose 2014 [m ³ /a]	Fahrten	Entfernung [km]	Gesamt [km]	Entfernung [km]	Gesamt [km]	Entfernung [km]	Gesamt [km]
Becklingen Z1	Becklingen / B3 (nahe Bahnhof)	4.100	164	67,1	11.004,4	39,8	6.527,2	71,6	11.742,4
Becklingen Z2	Becklingen / B3 (nahe Bahnhof)	1.800	72	67,1	4.831,2	39,8	2.865,6	71,6	5.155,2
Bötersen Z2	liegt am Weidebach, Rotenburg/ Wümme	1.200	48	28,5	1.368,0	102,0	4.896,0	33,7	1.617,6
Bötersen Z6	Grafeler Damm (Unterstedt)	6.200	248	17,2	4.265,6	97,5	24.180,0	22,4	5.555,2
Bötersen Z8	Brockmanns Kamp (Waffensen)	3.000	120	24,8	2.976,0	98,0	11.760,0	30,0	3.600,0
Bötersen Z10	liegt bei Hauptstraße (Unterstedt)	6.200	248	14,9	3.695,2	94,7	23.485,6	20,2	5.009,6
Hemsbünde Z1	Ahlsdorfer Weg (Hemsbünde)	3.000	120	24,0	2.880,0	84,7	10.164,0	28,6	3.432,0
Hemsbünde Z2	liegt bei Hemsbündler Straße/K239	3.000	120	33,8	4.056,0	84,3	10.116,0	36,2	4.344,0
Hemsbünde Z3	liegt bei Soltauer Straße (Rotenburg, Wümme)	3.000	120	21,7	2.604,0	88,1	10.572,0	26,9	3.228,0
Hemsbünde Z4	Ahlsdorfer Weg (Hemsbünde)	3.000	120	23,1	2.772,0	88,0	10.560,0	28,5	3.420,0
Hemsbünde Z5	Westerholzer Weg, Rotenburg/ Wümme	1.500	60	21,6	1.296,0	91,0	5.460,0	26,9	1.614,0
Hemsbünde Z6	Am Forst Ahlsdorf, Rotenburg/ Wümme	3.000	120	22,7	2.724,0	88,1	10.572,0	28,0	3.360,0
Höhnsmoor Z1	Phalsberg / K219	1.500	60	24,3	1.458,0	91,8	5.508,0	29,6	1.776,0

Nachhaltiger Umgang mit Lagerstättenwasser - Studie

Sondenplatz / Startort	Straße	Ausgangsparameter		Option 1 (Injektion) Zielort: Völkersen-Nord Z3 (Düvelshagen bei Völkersen)		Option 2 (Flutung im Salzwerk) Zielort: Kaliwerk Mariagluck, Höfer bei Celle		Optionen 3a und 3b (Aufbereitung) Zielort: Kläranlage Verden (Aller), Weserstraße 100	
		TKW-Fassung [m³]: 25							
		LaWa-Prognose 2014 [m³/a]	Fahrten	Entfernung [km]	Gesamt [km]	Entfernung [km]	Gesamt [km]	Entfernung [km]	Gesamt [km]
Langenhörn Z1	Zum Heidhorst (Westerholz)	1.500	60	27,7	1.662,0	95,2	5.712,0	33,0	1.980,0
Völkersen Z1	Schüleringer Straße (Langwedel)	2.700	108	5,0	540,0	100,0	10.800,0	6,6	712,8
Völkersen Z3	Moorstraße (Langwedel)	4.500	180	8,5	1.530,0	105,0	18.900,0	8,6	1.548,0
Völkersen Z11									
Völkersen Z4	Botterbusch/K28 (Verden/Aller)	3.000	120	11,2	1.344,0	96,1	11.532,0	5,3	636,0
Völkersen Z5	liegt an der Holtumer Straße / K11 (Verden/Aller)	3.500	140	7,4	1.036,0	98,9	13.846,0	6,3	882,0
Völkersen Z6									
Völkersen Z7	Schüleringer Straße (Langwedel)	40.000	1.600	5,0	8.000,0	100,0	160.000,0	6,6	10.560,0
Völkersen Z8									
Völkersen Z9									
Völkersen Z10		4.000	160	5,0	800,0	100,0	16.000,0	6,6	1.056,0
Völkersen Nord Z1 Völkersen Nord Z5	liegt an der Ottersberger Straße / L155 (Langwedel)	5.300	212	5,6	1.187,2	107,0	22.684,0	11,9	2.522,8
Völkersen Nord Z2	liegt bei Düvelshagen (Langwedel)	900	36	0,0	0,0	105,0	3.780,0	11,3	406,8
Völkersen Nord Z4	liegt bei Grasdorfer Straße / K9 (Langwedel)	3.000	120	12,5	1.500,0	105,0	12.600,0	13,0	1.560,0
Völkersen Nord Z6	liegt bei Giers Schanzendorf/ K5	4.000	160	11,6	1.856,0	110,0	17.600,0	17,9	2.864,0
Wardböhmen Z1,	Alte Poststraße / B3 (Bergen)	2.868	115	71,8	8.236,9	35,0	4015,2	71,5	8.202,5

Nachhaltiger Umgang mit Lagerstättenwasser - Studie

Sondenplatz / Startort	Straße	Ausgangsparameter		Option 1 (Injektion) Zielort: Völkersen-Nord Z3 (Düvelshagen bei Völkersen)		Option 2 (Flutung im Salzwerk) Zielort: Kaliwerk Mariagluck, Höfer bei Celle		Optionen 3a und 3b (Aufbereitung) Zielort: Kläranlage Verden (Aller), Weserstraße 100	
		TKW-Fassung [m³]: 25							
		LaWa-Prognose 2014 [m³/a]	Fahrten	Entfernung [km]	Gesamt [km]	Entfernung [km]	Gesamt [km]	Entfernung [km]	Gesamt [km]
inkl. Bleckmar Z1									
Weißemoor Z1	Zum Eitzenbruch (Kirchlinteln)	3.000	120	23,3	2.796,0	88,2	10.584,0	20,0	2.400,0
Westerholz Z1	liegt am Westerholzer Kanal, Westerholzer Dorfstraße (Rotenburg/Wümme)	1.500	60	25,7	1.542,0	93,2	5.592,0	31,0	1.860,0
Summen		120.268	4.811		77.960,5		450.311,6		91.044,9
Mittel (km/Fahrt)					16,2		93,6		18,9

2.1.2 Prognose der Lagerstättenwassermengen

Mit [U32, U9-10] wurden detaillierte Prognosen über die Entwicklung der Fördermengen an Lagerstättenwasser bis ca. 2030 für die einzelnen Bohrungen vorgelegt.

Danach ergibt sich eine maximal jährlich erwartete Förderrate von bis zu ca. 130.000 m³/a. Bis ca. 2014/15 steigt die prognostizierte Lagerstättenwassermenge noch auf bis zu 130.000 m³/a an, um danach wieder bis ca. 2030 abzufallen. Das entspricht kumuliert bis 2030 einer Gesamtmenge an Lagerstättenwasser von ca. 1,2 Mio m³ (Abbildung 5).

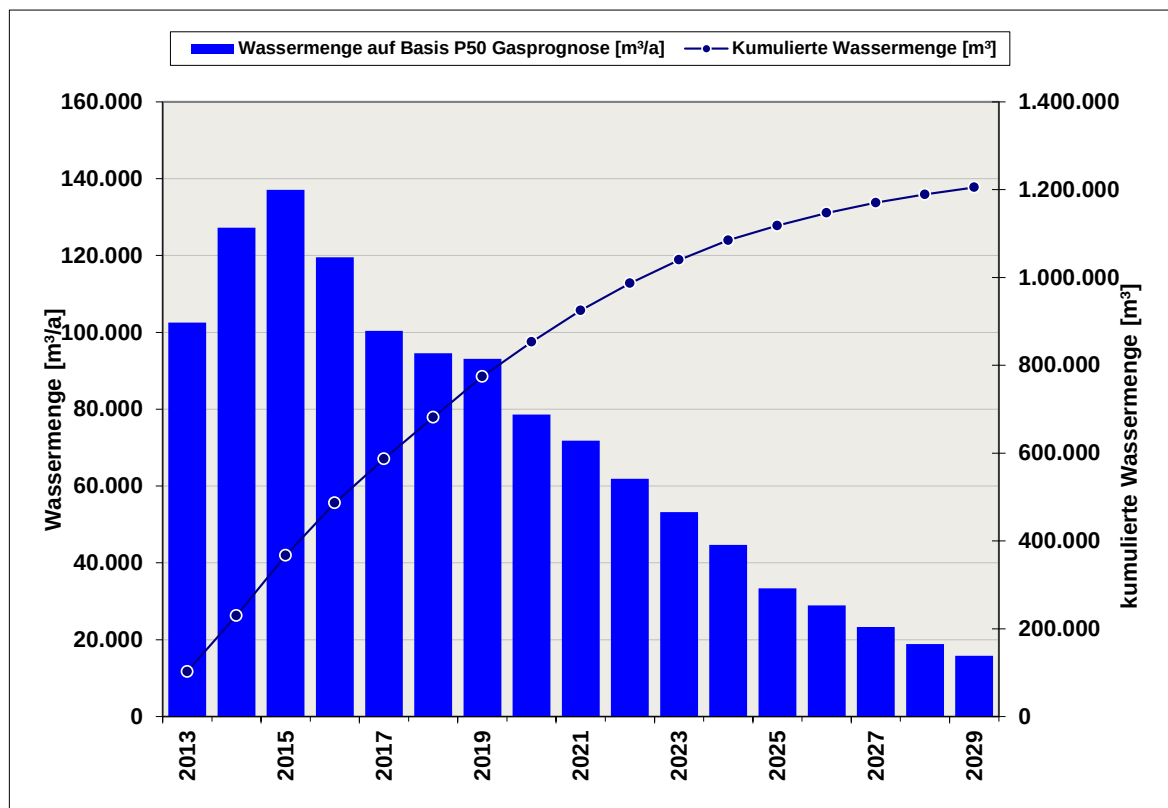


Abbildung 5: Lagerstättenwasserprognose bis 2030

In der nachfolgenden Tabelle 3 sind die Prognosewerte der RWE Dea AG für die Lagerstättenwassermengen einzelner Bohrungen zusammengestellt worden. Die unter „Tabellenwert“ angegebenen Mengen wurden als Basis für die Berechnung der gewichteten Frachten verwendet, wobei für einzelne Anfallstellen das arithmetische Mittel der Konzentrationen in die Berechnung einging. [U47-48].

Nachhaltiger Umgang mit Lagerstättenwasser - Studie

Tabelle 3: Prognostizierte Lagerstättenwassermengen einzelner Bohrungen

	Becklingen Z1	Becklingen Z2*	Ward-böhlen Z1	Bleckmar Z1 (Wardb.Z1)	Bötersen Z2	Bötersen Z6	Bötersen Z8	Bötersen Z10		
	BCKN-Z1	BCKN-Z2	WARB-Z1	BLKM-Z1	BTSN-Z2	BTSN-Z6	BTSN-Z8	BTSN-Z10		
2013	3.761	1.854	1.204	1.570	1.209	6.227	3.007	6.206		
2014	4.152	1.709	1.108	1.668	1.221	6.394	2.715	6.310		
Tab wert	4.100	1.800	1.200	1.668	1.200	6.200	3.000	6.200		

	Hemsbünde Z1	Hemsbünde Z2	Hemsbünde Z3	Hemsbünde Z4	Hemsbünde Z5	Hemsbünde Z6	Höhnsmoor Z1	Langenhörn Z1	Weissenmoor Z1	Westerholz Z1
	HMSB-Z1	HMSB-Z2	HMSB-Z3	HMSB-Z4	HMSB-Z5	HMSB-Z6	HOEM-Z1	LANG-Z1	WNMR-Z1	WSTH-Z1
2013	17.961				5.351				3.038	
2014	15.859				4.561				2.708	
Tab wert	12.000				4.500		1.500	1.500	3.000	1.500

	Völkersen Z1	Völkersen Z3/11	Völkersen Z4	Völkersen Z5/6	Völkersen Z10	ZGTA	Völkersen Nord Z1/Z5	Völkersen Nord Z2	Völkersen Nord Z4	Völkersen Nord Z6	Summe
	VKRN-Z1	VKRN-Z3	VKRN-Z4	VKRN-Z5	VKRN-Z10	ZGTA	VK-N-Z1 und N-Z5	VK-N-Z2	VK-N-Z4	VK-N-Z6	
2013	2.526	3.233	2.660	2.979	4.866	25.186	4.603	199	231	3.205	
2014	2.705	4.436	2.976	3.487	4.833	42.517	5.297	692	1.585	5.486	
Tab wert	2.700	4.500	3.000	3.500	4.000	40.000	5.300	900	3.000	4.000	

Alle Angaben in m³/a.

Angaben aus: Tabelle "Mengen", Datei: "Wassermengenundwerte 2013" [U31]

Angaben in blau : Aus Tabelle "BerechnungenBestimmungen", Datei: "Wassermengenundwerte 2013" [U31]

ZGTA: enthält VKRN Z7, VKRN Z8 und VKRN Z9; VKRN Z10 wird auf der ZGTA separat gesammelt,

WARB Z1 und BLKM Z1 werden wechselseitig auf der WARB Z1 gesammelt

2.1.3 Lagerstättenwasserzusammensetzung

Zur Begutachtung der nachhaltigen Behandlung und des Verbleibs der Lagerstättenwässer werden die Anfallstellen anhand vorliegender chemischer und radiologischer Analysen für maßgebliche Parameter charakterisiert [U47-48, U56-59]. Es werden berücksichtigt:

- 85 Analysensets aus 28 Anfallstellen bzw. Probenahmeorten aus dem Zeitraum 02/2012 bis 04/2013, bei denen die wesentlichen Parameter pH, Leitfähigkeit, Dichte, Alkali-/Erdalkalimetalle, einzelne Schwermetalle wie Pb und Hg, Anionen wie Chlorid, Sulfat zur Bestimmung der Anionen-/Kationengehalte und die Gesamtsalinität bestimmt wurden. Ferner wurden analytisch die aromatischen Kohlenwasserstoffe Benzol, Toluol, Ethylbenzol und Xylole (BTEX) bestimmt. Auch lagen radiologische Untersuchungen des Lagerstättenwassers der genannten Anfallstellen auf U-234, U-235, U-238, Ra-226, Ra-228, Pb-210, Po-210 vor [U19-22, U31].
- weitere 18 Analysensets aus 18 Anfallstellen im Mai 2013 [U59], von denen eine durch einen Analysenwert außerhalb des Erwartungsbereiches (Glykolversehrleppung) nicht gewertet wird, in denen zur Ergänzung des Parameterumfangs die Proben auf typische Summenparameter kommunaler Abwassersatzungen wie TOC, CSB, BSB₅, AOX sowie zusätzliche Kationen/Anionen wie Schwermetalle, organische Anionen, ferner Stickstoffverbindungen sowie organische Verbindungen als abscheidbare Kohlenwasserstoffe, aliphatische KW bzw. MKW, C3-Aromaten, Alkohole/Ketone, LCKW und PAK untersucht wurden.

Um die Bandbreite der Lagerstättenwässer aus den Einzeldaten, vgl. auch Tabelle 25, aufzuzeigen, liegen unter Angabe der jeweiligen Bohrung folgende Auswertungen auf [U22, U31, U47, U48, U58] vor:

- Maximaler Konzentrationswert (mg/L bzw. Bq/L)
- Minimaler Konzentrationswert (mg/L bzw. Bq/L)
- Arithmetischer Konzentrationsmittelwert über alle Proben einer Anfallstelle (mg/L bzw. Bq/L)

- Produktionsgewichteter Mittelwert anhand der Lagerstättenwassermenge der Bohrung (mg/L bzw. Bq/L)
- Jahresfracht (kg/a) anhand der Lagerstättenwassermenge (**120.268 m³/a**, „Tabellenwert“ aus Tabelle 3) einschl. Angabe der Bohrung mit minimaler und maximaler Fracht
- Die Analysen aus Mai 2013 sind in die Darstellung der produktionsgewichteten Mittelwerte mit eingeflossen, wobei zu beachten ist, dass die Mittelwerte einzelner Parameter auf einer geringeren Analysenanzahl beruhen.

Für die weitere Betrachtung werden die Jahresfrachten und die gewichteten Mittelwerte, gegebenenfalls auch die Maximalwerte, für die gutachterliche Bewertung herangezogen, vgl. die Datenzusammenfassung in den Tabellen von [U47-48].

Aus allen vorliegenden Analysendaten (103 Parametersätze, d.h. zwischen einer und sechs Einzelproben über 27 Anfallstellen, sowie einzelner zusätzlicher radiologischer Ergänzungsuntersuchungen) werden für den jeweiligen Analysenparameter die produktionsgewichteten Mittelwerte, die Minima/Maxima und die Frachten wie folgt bestimmt und den nachfolgenden Berechnungen und Beurteilungen zugrunde gelegt:

1. Die Probennahmen erfolgten durch das RWE Dea Labor in Wietze; Probenahmeprotokolle lagen nicht vor.
2. Die Analytik erfolgte in der Regel nach den einschlägigen Verfahren, vgl. hierzu die Übersicht in Tabelle 5.
3. Die Einzelwerte der Analysen jedes Parameters werden wie folgt zusammengefasst:
 - a. Aus den Einzeldaten eines Parameters wird ein arithmetischer Mittelwert je Anfallstelle gebildet.
 - b. Die so verbleibenden Einzel- und Mittelwerte werden auf Basis der prognostizierten Menge an Lagerstättenwasser für das Jahr 2014 (Produktionsmenge aus den von RWE Dea ermittelten Werten, entsprechend „Tabellenwert“ in Tabelle 3) gewichtet und zu einem „produktionsgewichteten Konzentrationsmittelwert [mg/L]“ für jeden Parameter zusammengefasst.
 - c. Diese Konzentrationsmittelwerte werden mit der jeweiligen Produktionswassermenge [m³/a] der Anfallstelle multipliziert und so die Jahresfracht [kg/a] des Inhaltsstoffes bestimmt. Die Summe aller

Jahreswassermengen ergibt 120.268 m³/a und wird wegen der erst in 2013 und 2014 in Betrieb gehenden Bohrungen Völkersen Z2a und Becklingen Z2 in der Verfahrensauslegung auf 130.000 m³/a aufgerundet.

4. Analysenwerte mit Angabe „unter Bestimmungsgrenze“ („< x“-Wert“) werden mit der Bestimmungsgrenze x angesetzt (worst case), bei Parametern, die in keiner Analyse einen positiven Wert aufweisen, wird weder eine Fracht noch ein produktionsgewichteter Mittelwert angegeben (n.n.: nicht nachweisbar).
5. Zusätzlich werden der jeweils kleinste und größte Wert bestimmt (Min/Max). Dabei wird
 - a. einerseits das Min/Max auf Basis aller Einzelmessungen und
 - b. andererseits das Min/Max auf Basis aller Anfallstellen

für den jeweiligen Parameter angegeben. Abweichungen zwischen beiden Angaben deuten auf höhere Abweichungen einzelner Analysenergebnisse (Proben) hin.

Eine Übersicht der produktionsgewichteten Mittelwerte und Jahresfrachten (s. folgende Tabelle 4) mit Angabe der Minimal- und Maximalwerte und der jeweiligen Anfallstelle befindet sich auf [U60].

Die produktionsgewichteten Mittelwerte und Frachten sind der folgenden Tabelle zu entnehmen (Analysenwerte gerundet).

Tabelle 4: Produktionsgewichtete Mittelwerte und Frachten nach [U60] (die angegebenen Werte beruhen auf den von der RWE Dea AG zur Verfügung gestellten Daten [U31, U58], die Werte sind auf drei signifikante Stellen gerundet angegeben, für die weiteren Berechnungen, vgl. nachfolgende Tabellen, werden die zur Verfügung gestellten, nicht gerundeten Werte verwendet)

	Produktions- gewichteter Mittelwert	Einheit	Fracht	Einheit
Dichte 20°C	1,06	[g/mL]		[g/mL]
pH-Wert	5,8	[-]		[-]
ELF 25°C	89,9	[mS/cm]		
Chlor, freies	0,20	[mg/L]	23,8	[kg/a]
Gesamthärte	765	[°dH]		
CSB	2.960	[mg/L]	360.000	[kg/a]
BSB ₅	210	[mg/L]	25.200	[kg/a]
Abfiltrierbare Stoffe	19,1	[mg/L]	2.300	[kg/a]
Absetzbare Stoffe	0,10	[ml/L]	12,0	[kg/a]
Lipophile Stoffe	34,7	[mg/L]	4.170	[kg/a]
Kalium	1.000	[mg/L]	120.000	[kg/a]
Natrium	14.400	[mg/L]	1.740.000	[kg/a]
Calcium	14.900	[mg/L]	1.790.000	[kg/a]
Magnesium	74,7	[mg/L]	8.980	[kg/a]
Lithium	35,0	[mg/L]	4.210	[kg/a]
Strontium	647	[mg/L]	77.800	[kg/a]
Aluminium	0,29	[mg/L]	34,6	[kg/a]
Ammonium-Stickstoff	5,42	[mg/L]	652	[kg/a]
Arsen	0,099	[mg/L]	11,9	[kg/a]
Blei	9,00	[mg/L]	1.080	[kg/a]
Cadmium	0,042	[mg/L]	5,02	[kg/a]
Chrom ges.	0,001	[mg/L]	0,16	[kg/a]
Chrom (VI)	0,005	[mg/L]	0,60	[kg/a]
Kupfer	0,009	[mg/L]	1,11	[kg/a]
Nickel	0,007	[mg/L]	0,87	[kg/a]
Quecksilber	0,044	[mg/L]	5,32	[kg/a]
Zink	1,48	[mg/L]	178	[kg/a]
Antimon	0,001	[mg/L]	0,14	[kg/a]
Barium	34,4	[mg/L]	4.130	[kg/a]
Bor	14,8	[mg/L]	1.780	[kg/a]
Cobalt	0,002	[mg/L]	0,27	[kg/a]
Eisen	29,8	[mg/L]	3.590	[kg/a]

Nachhaltiger Umgang mit Lagerstättenwasser - Studie

	Produktions- gewichteter Mittelwert	Einheit	Fracht	Einheit
Mangan	9,13	[mg/L]	1.100	[kg/a]
Molybdän	0,021	[mg/L]	2,57	[kg/a]
Phosphor ges.	0,58	[mg/L]	70,3	[kg/a]
Selen	0,003	[mg/L]	0,33	[kg/a]
Silicium	4,90	[mg/L]	589	[kg/a]
Tellur	0,01	[mg/L]	1,03	[kg/a]
Titan	0,03	[mg/L]	4,10	[kg/a]
Thallium	0,048	[mg/L]	5,76	[kg/a]
Uran	n.n.	[mg/L]	-	[kg/a]
Vanadium	0,006	[mg/L]	0,70	[kg/a]
Zinn	0,01	[mg/L]	1,40	[kg/a]
Zirkonium	0,01	[mg/L]	0,84	[kg/a]
Chlorid	48.000	[mg/L]	5.770.000	[kg/a]
Sulfat (SO ₄)	201	[mg/L]	24.200	[kg/a]
Chromat	0,002	[mg/L]	0,18	[kg/a]
Nitrat-N	2,02	[mg/L]	243	[kg/a]
Nitrit-N	0,003	[mg/L]	0,36	[kg/a]
Fluorid	4,76	[mg/L]	572	[kg/a]
Cyanid ges.	0,005	[mg/L]	0,60	[kg/a]
Cyanid. l. freis.	0,005	[mg/L]	0,60	[kg/a]
Iodid	9,87	[mg/L]	1.190	[kg/a]
Bromid	424	[mg/L]	51.000	[kg/a]
Hydrogencarbonat (HCO ₃)	56,4	[mg/L]	6.780	[kg/a]
Phosphat	0,11	[mg/L]	12,8	[kg/a]
Silikat (SiO ₂)	10,5	[mg/L]	1.260	[kg/a]
Sulfid, l. freis.	0,04	[mg/L]	4,89	[kg/a]
Phenolindex	2,86	[mg/L]	344	[kg/a]
TOC	348	[mg/L]	41.800	[kg/a]
n-Pentan	n.n.	[mg/L]	-	[kg/a]
n-Hexan	n.n.	[mg/L]	-	[kg/a]
n-Heptan	1,07	[mg/L]	128	[kg/a]
n-Octan	1,03	[mg/L]	124	[kg/a]
n-Nonan	n.n.	[mg/L]	-	[kg/a]
n-Decan	n.n.	[mg/L]	-	[kg/a]
AOX	0,21	[mg/L]	25,3	[kg/a]
MKW (nicht aromatisch C10-C40)	8,52	[mg/L]	1.030	[kg/a]

	Produktions- gewichteter Mittelwert	Einheit	Fracht	Einheit
Summe BTEX	434	[mg/L]	52.200	[kg/a]
Benzol	321	[mg/L]	38.600	[kg/a]
Toluol	70,9	[mg/L]	8.530	[kg/a]
Ethylbenzol	5,76	[mg/L]	693	[kg/a]
m+p-Xylol	20,0	[mg/L]	2.400	[kg/a]
o-Xylol	16,3	[mg/L]	1.960	[kg/a]
Summe C3-Aromaten	4,34	[mg/L]	522	[kg/a]
iso-Propylbenzol	0,257	[mg/L]	30,9	[kg/a]
n-Propylbenzol	0,129	[mg/L]	15,5	[kg/a]
2-Ethyltoluol	0,627	[mg/L]	75,4	[kg/a]
3-Ethyltoluol	0,341	[mg/L]	41,1	[kg/a]
4-Ethyltoluol	0,076	[mg/L]	9,16	[kg/a]
1,3,5-Trimethylbenzol	0,582	[mg/L]	70,1	[kg/a]
1,2,4-Trimethylbenzol	1,14	[mg/L]	138	[kg/a]
1,2,3-Trimethylbenzol	1,18	[mg/L]	142	[kg/a]
Styrol	0,017	[mg/L]	2,10	[kg/a]
Cumol	0,247	[mg/L]	30,0	[kg/a]
Summe PAK (EPA), ohne Naphthalin	n.n.	[mg/L]	-	[kg/a]
Naphthalin	0,542	[mg/L]	65,2	[kg/a]
Acenaphthylen	n.n.	[mg/L]	-	[kg/a]
Acenaphthen	n.n.	[mg/L]	-	[kg/a]
Fluoren	n.n.	[mg/L]	-	[kg/a]
Phenanthren	n.n.	[mg/L]	-	[kg/a]
Anthracen	n.n.	[mg/L]	-	[kg/a]
Fluoranthren	n.n.	[mg/L]	-	[kg/a]
Pyren	n.n.	[mg/L]	-	[kg/a]
Benz(a)anthracen	n.n.	[mg/L]	-	[kg/a]
Chrysen	n.n.	[mg/L]	-	[kg/a]
Benzo(b)fluoranthren	n.n.	[mg/L]	-	[kg/a]
Benzo(k)fluoranthren	n.n.	[mg/L]	-	[kg/a]
Benzo(a)pyren	n.n.	[mg/L]	-	[kg/a]
Dibenz(ah)anthracen	n.n.	[mg/L]	-	[kg/a]
Benzo(g,h,i)perylene	n.n.	[mg/L]	-	[kg/a]
Indeno(1,2,3-cd)pyren	n.n.	[mg/L]	-	[kg/a]

Nachhaltiger Umgang mit Lagerstättenwasser - Studie

	Produktions- gewichteter Mittelwert	Einheit	Fracht	Einheit
LCKW				
Dichlormethan	n.n.	[mg/L]	-	[kg/a]
Trichlormethan	n.n.	[mg/L]	-	[kg/a]
1,1,1-Trichlorethan	n.n.	[mg/L]	-	[kg/a]
Tetrachlormethan	n.n.	[mg/L]	-	[kg/a]
Trichlorethen	n.n.	[mg/L]	-	[kg/a]
Tetrachlorethen	n.n.	[mg/L]	-	[kg/a]
Vinylchlorid	n.n.	[mg/L]	-	[kg/a]
1,1-Dichlorethan	n.n.	[mg/L]	-	[kg/a]
1,1-Dichlorethen	n.n.	[mg/L]	-	[kg/a]
1,2-Dichlorethan	0,0027	[mg/L]	0,33	[kg/a]
cis-1,2-Dichlorethen	n.n.	[mg/L]	-	[kg/a]
trans-1,2-Dichlorethen	n.n.	[mg/L]	-	[kg/a]
Aceton	8,99	[mg/L]	1.080	[kg/a]
iso-Butanol	3,64	[mg/L]	438	[kg/a]
Butylacetat	0,06	[mg/L]	6,96	[kg/a]
Cyclohexan	0,96	[mg/L]	116	[kg/a]
Ethanol	0,90	[mg/L]	108	[kg/a]
Ethylacetat	0,10	[mg/L]	11,9	[kg/a]
2-Propanol	1,43	[mg/L]	172	[kg/a]
Methanol	2,09	[mg/L]	252	[kg/a]
Formiat	56,4	[mg/L]	8.350	[kg/a]
Acetat	182	[mg/L]	21.900	[kg/a]
Glykolsäure	87,2	[mg/L]	10.500	[kg/a]
Summe Kationen (Lithium, Kalium, Natrium, Calcium, Magnesium, Barium, Strontium)	31.100	[mg/L]	3.740.000	[kg/a]
Summe Anionen (Chlorid, Bromid, Iodid, Fluorid, Hydrogencarbonat, Sulfat, Phosphat)	48.700	[mg/L]	5.850.000	[kg/a]
Ges-Salinität	79.800	[mg/L]	9.590.000	[kg/a]
U-238	0,003	[Bq/L]	0,39	[MBq/a]
U-234	0,004	[Bq/L]	0,43	[MBq/a]
Ra-226	10,5	[Bq/L]	1.260	[MBq/a]
Pb-210	14,3	[Bq/L]	1.720	[MBq/a]
Po-210	1,25	[Bq/L]	150	[MBq/a]

	Produktions- gewichteter Mittelwert	Einheit	Fracht	Einheit
U-235	n.n.	[Bq/L]	-	[MBq/a]
Ra-228	10,8	[Bq/L]	1.290	[MBq/a]

Hinweise zu Tabelle 4:

Die in der Tabelle angegebenen LCKW sind auf Verunreinigungen durch Betriebs- oder Reinigungsmittel zurückzuführen, sie bleiben bei der weiteren Betrachtung der Lagerstättenwasserzusammensetzung unberücksichtigt.

Im Zuge der Optimierung der Vorbehandlung des Lagerstättenwassers an den jeweiligen Anfallstellen (B9) ist darauf zu achten, dass Verunreinigungen durch Betriebs- oder Reinigungsmittel ausgeschlossen werden.

Die Bestimmung des in der Tabelle angegebenen AOX-Wertes ist aufgrund der hohen Cl/Br-Gehalte fehlerhaft und bleibt bei der weiteren Betrachtung der Lagerstättenwasserzusammensetzung unberücksichtigt.

In der Tabelle sind für alle einzelnen Analysenparameter, soweit positive Befunde vorliegen, Konzentrationen und Frachtmengen angegeben. Zur Beurteilung der Relevanz bzw. der tatsächlich im Lagerstättenwasser vorhandenen Inhaltsstoffe wird auf die Tabelle 7 verwiesen.

Durch die Worst-case-Betrachtung kann es aufgrund unterschiedlicher Nachweisgrenzen und aufgrund einer unterschiedlichen Analysenanzahl dazu kommen, dass eine Teilmenge, z.B. Chrom(VI), einen höheren Gehalt bzw. eine höhere Fracht aufweist als die Gesamtmenge, in diesem Fall Chrom (gesamt).

Uran ist aufgrund seiner geringen Konzentration im Lagerstättenwasser chemisch nicht nachweisbar (Nachweisgrenze: 0,1 µg/l), trotzdem sind einzelne Uran-Nuklide bei der empfindlicheren Aktivitätsbestimmung quantifizierbar (Aktivitätsangabe in Bq/l).

Die Stickstoffverbindungen sind jeweils bezogen auf die Stickstoffmenge angegeben, die Konzentrationen der jeweiligen Ionen lassen sich folgendermaßen berechnen:

- 1 g NO_3^- -N entspricht 4,43 g NO_3^-
- 1 g NO_2^- -N entspricht 3,29 g NO_2^-
- 1 g NH_4^+ -N entspricht 1,29 g NH_4^+

Aus der angegebenen Borkonzentration lässt sich folgendermaßen die Konzentration von Borat berechnen:

- 1 g Bor entspricht 5,44 g BO_3^{3-}

Nachhaltiger Umgang mit Lagerstättenwasser - Studie

Tabelle 5: Analysenmethoden lt. Angaben des Analysenlabors GBA [U58, Prüfbericht-Nr.: 2013P604602/ 1], k.A. = keine Angabe

Parameter	Bestimmungsgrenze	Einheit	Methode
pH-Wert			DIN EN ISO 10523 ^a
Leitfähigkeit (Labor, 25 °C)	20	µS/cm	DIN EN 27888 (C8) ^a
Chlor, freies	0,03	mg/L	DIN EN ISO 7393-2 (G4-2) ^a
CSB	k.A.	mg/L	DIN 38409 (H41) ^a
BSB ₅	k.A.	mg/L	DIN EN 1899-1 (H51) ^a
Abfiltrierbare Stoffe	1	mg/L	DIN 38409-2 (H2) ^a
Lipophile Stoffe	k.A.	mg/L	DIN 38409 (H56) ^a
Ammonium-N	0,02	mg/L	DIN EN ISO 11732 (E23) ^a
Bor	0,01	mg/L	DIN EN ISO 17294-2 (E29) ^a
Phosphor ges.	0,005	mg/L	DIN EN ISO 11885 (E22) ^a
Chlorid	0,6	mg/L	DIN EN ISO 10304-1/-2 (D19/20) ^a
Sulfat	0,5	mg/L	DIN EN ISO 10304-1/-2 (D19/20) ^a
Nitrat	0,5	mg/L	DIN EN ISO 10304-1/-2 (D19/20) ^a
Nitrat-N	0,1	mg/L	DIN EN ISO 10304-1/-2 (D19/20) ^a
Fluorid	0,15	mg/L	DIN EN ISO 10304-1/-2 (D19/20) ^a
Cyanid ges.	0,005	mg/L	DIN EN ISO 14403 (D6) ^a
Cyanid l. freis.	0,005	mg/L	DIN EN ISO 14403 (D6) ^a
Iodid	k.A.	mg/L	EN ISO 10304-3 (D22) ^a
Bromid	0,5	mg/L	DIN EN ISO 10304-1/-2 (D19/20) ^a
Härtehydrogencarbonat	k.A.	°dH	DIN 38 405-D8 ^a
Nitrit	0,01	mg/L	DIN EN ISO 13395 (D28) ^a
Nitrit-N	0,003	mg/L	DIN EN ISO 13395 (D28) ^a
ortho-Phosphat	0,1	mg/L	DIN EN ISO 15681-2 (D46) ^a
Sulfid, l. freis.	0,04	mg/L	DIN 38405-D27 ^a
Phenolindex	5	µg/L	DIN EN ISO 14402 (H37) ^a
TOC	1	mg/L	DIN EN 1484 (H3) ^a
AOX	10	µg/L	DIN EN ISO 9562 (H14) ^a
Kohlenwasserstoffe	0,1	mg/L	DIN EN ISO 9377-2 (H53) ^a
Arsen	0,5	µg/L	DIN EN ISO 17294-2 (E29) ^a
Blei	1	µg/L	DIN EN ISO 17294-2 (E29) ^a
Cadmium	0,3	µg/L	DIN EN ISO 17294-2 (E29) ^a
Chrom ges.	1	µg/L	DIN EN ISO 17294-2 (E29) ^a
Kupfer	1	µg/L	DIN EN ISO 17294-2 (E29) ^a
Nickel	1	µg/L	DIN EN ISO 17294-2 (E29) ^a
Quecksilber	0,2	µg/L	DIN EN ISO 17294-2 (E29) ^a
Zink	5	µg/L	DIN EN ISO 17294-2 (E29) ^a
Antimon	1	µg/L	DIN EN ISO 17294-2 (E29) ^a
Barium	1	µg/L	DIN EN ISO 17294-2 (E29) ^a
Cobalt	1	µg/L	DIN EN ISO 17294-2 (E29) ^a
Molybdän	1	µg/L	DIN EN ISO 17294-2 (E29) ^a
Selen	1	µg/L	DIN EN ISO 17294-2 (E29) ^a
Titan	5	µg/L	DIN EN ISO 17294-2 (E29) ^a
Thallium	1	µg/L	DIN EN ISO 17294-2 (E29) ^a
Uran	0,1	µg/L	DIN EN ISO 17294-2 (E29) ^a
Vanadium	1	µg/L	DIN EN ISO 17294-2 (E29) ^a
Zinn	1	µg/L	DIN EN ISO 17294-2 (E29) ^a
Zirkonium	1	µg/L	DIN EN ISO 17294-2 (E29) ^a
Chrom (VI)	5	µg/L	DIN 38405-D24/DIN EN ISO 18412 ^a

Nachhaltiger Umgang mit Lagerstättenwasser - Studie

Parameter	Bestimmungsgrenze	Einheit	Methode
Chromat	15	µg/L	Berechnet
Gesamthärte	0,05	°dH	DIN 38409-H6/ DIN EN ISO 17294-2 (E29) ^a
Kalium	0,1	mg/L	DIN EN ISO 17294-2 (E29) ^a
Natrium	0,1	mg/L	DIN EN ISO 17294-2 (E29) ^a
Calcium	0,1	mg/L	DIN EN ISO 17294-2 (E29) ^a
Magnesium	0,1	mg/L	DIN EN ISO 17294-2 (E29) ^a
Barium	0,0005	mg/L	DIN EN ISO 17294-2 (E29) ^a
Strontium	0,001	mg/L	DIN EN ISO 17294-2 (E29) ^a
Aluminium	0,01	mg/L	DIN EN ISO 17294-2 (E29) ^a
Eisen, ges.	0,005	mg/L	DIN EN ISO 17294-2 (E29) ^a
Mangan	0,01	mg/L	DIN EN ISO 17294-2 (E29) ^a
Silicium	0,01	mg/L	DIN EN ISO 17294-2 (E29) ^a
Summe PAK (EPA)		µg/L	Berechnet
Naphthalin	0,02	µg/L	DIN EN ISO 17993 (F18) ^a
Acenaphthylen	0,02	µg/L	DIN EN ISO 17993 (F18) ^a
Acenaphthen	0,02	µg/L	DIN EN ISO 17993 (F18) ^a
Fluoren	0,02	µg/L	DIN EN ISO 17993 (F18) ^a
Phenanthren	0,02	µg/L	DIN EN ISO 17993 (F18) ^a
Anthracen	0,02	µg/L	DIN EN ISO 17993 (F18) ^a
Fluoranthren	0,02	µg/L	DIN EN ISO 17993 (F18) ^a
Pyren	0,02	µg/L	DIN EN ISO 17993 (F18) ^a
Benz(a)anthracen	0,02	µg/L	DIN EN ISO 17993 (F18) ^a
Chrysen	0,02	µg/L	DIN EN ISO 17993 (F18) ^a
Benzo(b)fluoranthren	0,02	µg/L	DIN EN ISO 17993 (F18) ^a
Benzo(k)fluoranthren	0,02	µg/L	DIN EN ISO 17993 (F18) ^a
Benzo(a)pyren	0,02	µg/L	DIN EN ISO 17993 (F18) ^a
Dibenz(ah)anthracen	0,02	µg/L	DIN EN ISO 17993 (F18) ^a
Benzo(g,h,i)perylene	0,02	µg/L	DIN EN ISO 17993 (F18) ^a
Indeno(1,2,3-cd)pyren	0,02	µg/L	DIN EN ISO 17993 (F18) ^a
Summe LCKW		µg/L	Berechnet
Dichlormethan	1	µg/L	DIN EN ISO 10301 (F4) ^a
Trichlormethan	1	µg/L	DIN EN ISO 10301 (F4) ^a
1,1,1-Trichlorethan	1	µg/L	DIN EN ISO 10301 (F4) ^a
Tetrachlormethan	1	µg/L	DIN EN ISO 10301 (F4) ^a
Trichlorethen	1	µg/L	DIN EN ISO 10301 (F4) ^a
Tetrachlorethen	1	µg/L	DIN EN ISO 10301 (F4) ^a
Vinylchlorid	1	µg/L	DIN EN ISO 10301 (F4) ^a
1,1-Dichlorethan	1	µg/L	DIN EN ISO 10301 (F4) ^a
1,1-Dichlorethen	1	µg/L	DIN EN ISO 10301 (F4) ^a
1,2-Dichlorethan	1	µg/L	DIN EN ISO 10301 (F4) ^a
cis-1,2-Dichlorethen	1	µg/L	DIN EN ISO 10301 (F4) ^a
trans-1,2-Dichlorethen	1	µg/L	DIN EN ISO 10301 (F4) ^a
Summe BTEX		µg/L	Berechnet
Benzol	1	µg/L	DIN 38407-F9-1 ^a
Toluol	1	µg/L	DIN 38407-F9-1 ^a
Ethylbenzol	1	µg/L	DIN 38407-F9-1 ^a
m-/p-Xylol	1	µg/L	DIN 38407-F9-1 ^a
o-Xylol	1	µg/L	DIN 38407-F9-1 ^a
Styrol	1	µg/L	DIN 38407-F9-1 ^a
Cumol	1	µg/L	DIN 38407-F9-1 ^a
Aceton	k.A.	mg/L	an. DIN 38407-F9-1/ DIN EN ISO 10301-F4
Summe C3-Aromaten		µg/L	Berechnet

Parameter	Bestimmungsgrenze	Einheit	Methode
iso-Propylbenzol	1	µg/L	DIN 38407-F9-1 ^a
n-Propylbenzol	1	µg/L	DIN 38407-F9-1 ^a
2-Ethyltoluol	1	µg/L	DIN 38407-F9-1 ^a
3-Ethyltoluol	1	µg/L	DIN 38407-F9-1 ^a
4-Ethyltoluol	1	µg/L	DIN 38407-F9-1 ^a
1,3,5-Trimethylbenzol	1	µg/L	DIN 38407-F9-1 ^a
1,2,4-Trimethylbenzol	1	µg/L	DIN 38407-F9-1 ^a
1,2,3-Trimethylbenzol	1	µg/L	DIN 38407-F9-1 ^a
Dichte		g/mL	DEV C9 ^a
Absetzbare Stoffe	0,1	mL/L	DIN 38409-9 (H9) ^a
Lithium	0,001	mg/L	DIN EN ISO 17294-2 (E29) ^a
Tellur	1	µg/L	DIN EN ISO 17294-2 (E29) ^a
Silikat (SiO ₂)	k.A.	mg/L	DIN EN ISO 11885 (E22) ^a
n-Pentan	100	µg/L	Headspace / GC-MS
n-Hexan	100	µg/L	Headspace / GC-MS
n-Heptan	100	µg/L	Headspace / GC-MS
n-Octan	100	µg/L	Headspace / GC-MS
n-Nonan	100	µg/L	Headspace / GC-MS
n-Decan	100	µg/L	Headspace / GC-MS
iso-Butanol	k.A.	mg/L	analog DIN 38407-F9-1/ DIN EN ISO 10301-F4
Butylacetat	k.A.	mg/L	analog DIN 38407-F9-1/ DIN EN ISO 10301-F4
Cyclohexan	k.A.	mg/L	DIN EN ISO 15680 (F19) ^a
Ethanol	0,5	mg/L	analog DIN 38407-F9-1/ DIN EN ISO 10301-F4
Ethylacetat	k.A.	mg/L	analog DIN 38407-F9-1/ DIN EN ISO 10301-F4
2-Propanol	k.A.	mg/L	an. DIN 38407-F9-1/ DIN EN ISO 10301-F4
Methanol	2	mg/L	an. DIN 38407-F9-1/ DIN EN ISO 10301-F4

Die mit ^a gekennzeichneten Verfahren sind akkreditierte Verfahren.
Die Bestimmungsgrenzen können matrixbedingt variieren.

Untersuchungslabor: GBA Pinneberg, GBA Gelsenkirchen, GBA Herten

2.1.4 Anfallstellenbeschreibung des Lagerstättenwassers

Das mit dem Erdgas geförderte Lagerstättenwasser (einschl. Kondenswasser) fällt bei der oberirdischen Gastrocknung an. Bei der RWE Dea AG werden zur Erdgastrocknung laut [U34, U37-42] folgende Verfahren eingesetzt:

- Low Temperature Separation (LTS)
- Cold Frac Anlage (CFA)
- Glykoltrocknung

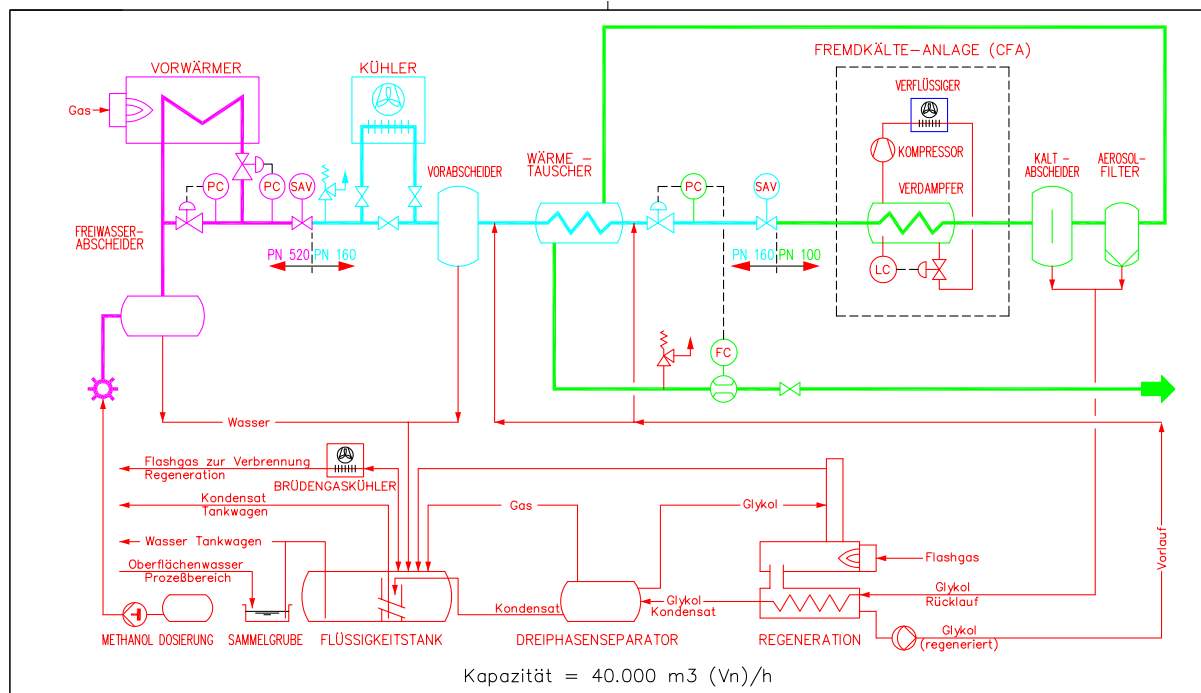


Abbildung 6: Low Temperature Separation (LTS), mit zusätzlicher Cold-Frac-Anlage (CFA), optional bei sinkendem Gasdruck einsetzbar

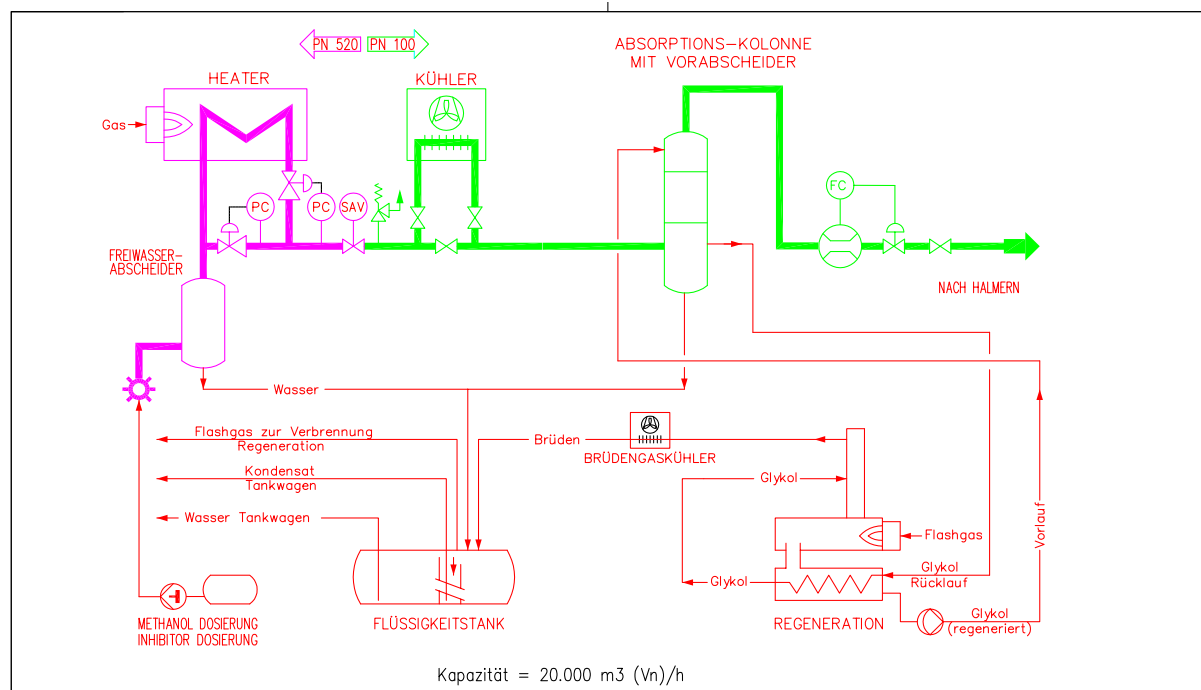


Abbildung 7: Glykoltrocknung

Anhand der Prinzipfließbilder (Abbildung 6 und Abbildung 7) [U34], vgl. auch [U35, U38-42], ist erkennbar, dass folgende Abwässer dem Lagerstättenwassertank (betriebsinterne

Bezeichnung „B9“, auch B119 und B129) zugeführt werden. Abweichungen, wie die Kühlung des Kondenswassers mit Lagerstättenwasser, sind im Einzelfall möglich:

- Glykolhaltige Brüden aus der Glykolregeneration (LTS, Glykoltrocknung)
- Kondensat des Glycol-Rücklaufs aus dem Dreiphasenseparator (LTS)
- Glycol-Wasser-Kondensat aus der Kältetrocknungsanlage (CFA)
- Wasser aus dem Freiwasser- und Vorabscheider der Gastrocknung (LTS, CFA, Glykoltrocknung)

In allen Fällen ist der B9-Behälter mit Erdgas bei etwa 0,5 bar überlagert [U53], das zum Teil zur Druckförderung des Lagerstättenwassers im Prozessbereich anstelle von Pumpenaggregaten eingesetzt wird. Es werden nur diese Prozesswässer betrachtet. Auf den Betriebsanlagen anfallende Oberflächenwässer sollen zukünftig getrennt behandelt und entsorgt werden.

In Völkersen befindet sich eine **Zentrale Gas-Trocknungs-Anlage** (ZGTA), an die die Bohrungen Völkersen Z7, Z8, Z9 und Z10 angeschlossen sind.

Laut [U34] sind für die in 2012 in Betrieb befindlichen 32 Bohrungen folgende Trocknungseinheiten im Einsatz gewesen (zum Teil erfolgt die Trocknung über mehrere Einheiten, vgl. Abbildung 6):

Glykoltrocknungsanlagen	9 Anlagen á 20.000 m ³ (V _N)/h
Mob. GTA (LTS) á 5.000 m ³ (V _N)/h	
LTS:	4 Anlagen á 20.000 m ³ (V _N)/h
	8 Anlagen á 40.000 m ³ (V _N)/h
	2 Anlagen á 100.000 m ³ (V _N)/h aus je drei Bohrungen
CFA:	11 Anlagen á 30.000 m ³ (V _N)/h
	3 Anlagen á 100.000 m ³ (V _N)/h

An den Anfallstellen befinden sich in Verbindung mit den Gastrocknungsanlagen die sog. B9-Behälter; eine Übersicht liefert [U46], zusammengefasst in nachfolgender Tabelle 6.

Die B9-Behälter erfüllen zugleich die Funktion eines Dreiphasen-Abscheiders mit Abtrennzone für Leichtflüssigkeiten und absetzbare Stoffe sowie die Funktion eines Sammel-/Lagerbehälters zur Entsorgungsbereitstellung. Zu den Fragen der Funktion/Auslegung siehe auch die Optimierungshinweise in Kapitel 7.1.1.

Nachhaltiger Umgang mit Lagerstättenwasser - Studie

Im Rahmen dieser Studie wird von einem Abwasser aus dem Tank B9 (bzw. auch B119 und B129) ausgegangen, das die in Kapitel 2.1.3 beschriebene mittlere Zusammensetzung besitzt.

Tabelle 6: Übersicht der vorhandenen B9-Behälter
lt. „Auswertung B9“ [U62]

Bohrung	Ort	Behälterart	Bezeichnung	Volumen (L)	zul. Betriebsdruck (bar)
BCKN-Z1	Becklingen Z1	Sammelbehälter, Lagerbehälter	F-BCKN-Z1-B9	100.000	1
BTSN-Z2	Bötersen Z2	Sammelbehälter, Lagerbehälter	F-BTSN-Z2-B9	100.000	1
BTSN-Z6	Bötersen Z6	Sammelbehälter, Lagerbehälter	F-BTSN-Z6-B9	100.000	1
BTSN-Z8	Bötersen Z8	Sammelbehälter, Lagerbehälter	F-BTSN-Z8-B	80.000	1
BTSN-Z10	Bötersen Z10	Behälter Sonstige	F-BTSN-Z10-B9	100.000	1
HMSB-Z1	Hemsbünde Z1	Sammelbehälter, Lagerbehälter	F-HMSB-Z1-B9	80.000	1
HMSB-Z2	Hemsbünde Z2	Sammelbehälter, Lagerbehälter	F-HMSB-Z2-B9	80.000	1
HMSB-Z3	Hemsbünde Z3	Sammelbehälter, Lagerbehälter	F-HMSB-Z3-B9	100.000	1
HMSB-Z4	Hemsbünde Z4	Sammelbehälter, Lagerbehälter	F-HMSB-Z4-B9	100.000	1
HMSB-Z5	Hemsbünde Z5	Sammelbehälter, Lagerbehälter	F-HMSB-Z5-B9	80.000	1
HMSB-Z6	Hemsbünde Z6	Sammelbehälter, Lagerbehälter	F-HMSB-Z6-B9	100.000	1
HOEM-Z1	Höhnsmoor Z1	Sammelbehälter, Lagerbehälter	F-HOEM-Z1-B9	50.000	1
LANG-Z1	Langenhörn Z1	Sammelbehälter, Lagerbehälter	F-LANG-Z1-B9	80.000	1
VKRN-Z1	Völkersen Z1	Sammelbehälter, Lagerbehälter	F-VKRN-Z1-B509	100.000	1
VKRN-Z2	Völkersen Z2	Sammelbehälter, Lagerbehälter	F-VKRN-Z2-B609	100.000	1
VKRN-Z4	Völkersen Z4	Sammelbehälter, Lagerbehälter	F-VKRN-Z4-B9	100.000	1
VKRN-Z5	Völkersen Z5	Sammelbehälter, Lagerbehälter	F-VKRN-Z5-B9	100.000	1
VKRN-Z11	Völkersen Z11	Sammelbehälter, Lagerbehälter	F-VKRN-Z11-B9	100.000	1
VKRN-ZGTA	Zentrale Gastrocknungsanlage Völkersen	Behälter Sonstige	F-VKRNZGTA-B109	80.176	1
VKRN-ZGTA	Zentrale Gastrocknungsanlage Völkersen	Behälter Sonstige	F-VKRNZGTA-B119	80.176	1
VKRN-ZGTA	Zentrale Gastrocknungsanlage Völkersen	Behälter Sonstige	F-VKRNZGTA-B209	30.000	1
VK-N-Z1	Völkersen Nord Z1	Sammelbehälter, Lagerbehälter	F-VK-N-Z1-B9	100.000	1
VK-N-Z2	Völkersen Nord Z2	Sammelbehälter, Lagerbehälter	F-VK-N-Z2-B9	100.000	1

Nachhaltiger Umgang mit Lagerstättenwasser - Studie

Bohrung	Ort	Behälterart	Bezeichnung	Volumen (L)	zul. Betriebsdruck (bar)
VK-N-Z4	Völkersen Nord Z4	Behälter Sonstige	F-VK-N-Z4-B9	100.000	1
VK-N-Z6	Völkersen Nord Z6	Sammelbehälter, Lagerbehälter	F-VK-N-Z6-B9	101.951	1
WARB-Z1	Wardböhmen Z1	Sammelbehälter, Lagerbehälter	F-WARB-Z1-B9	100.000	1
WNMR-Z1	Weißenmoor Z1	Sammelbehälter, Lagerbehälter	F-WNMR-Z1-B9	100.000	1
WSTH-Z1	Westerholz Z1	Sammelbehälter, Lagerbehälter	F-WSTH-Z1-B9	50.000	1

2.2 Bestandteile des Lagerstättenwassers

Das Lagerstättenwasser enthält die in Tabelle 7 zusammengestellten chemischen Elemente/Verbindungen. Die angegebenen Summenparameter sind solche, die oftmals in Regelwerken wie den Indirekteinleiterverordnungen der Bundesländer oder den Entwässerungssatzungen der Kommunen festgelegt sind.

Tabelle 7: Produktionsgewichtete Mittelwerte und Frachten des Lagerstättenwassers, nach chemischen Kriterien gruppiert, die Werte sind auf drei signifikante Stellen gerundet angegeben (die in der Spalte „Bemerkung“ angegebene Relevanz bezieht sich im wesentlichen auf die ökotoxikologische Betrachtung innerhalb der Studie)

Parameter	Mittelwert	Fracht	Bemerkung
pH (-)	5,8		schwach sauer
Dichte (kg/L)	1,06		unwesentlich von reinem Wasser abweichend
ELF (mS/cm)	89,9		hoher Ionengehalt
absetz. Stoffe (mL/L)	0,10	12 L/a	vernachlässigbar, s. aber abfilt. Stoffe
abfilt. Stoffe (mg/L, >0,45 µm)	19,1	2.300 kg/a	s. separate Korngrößenuntersuchung
	Konz. in mg/L	Fracht in kg/a	
Alkalimetalle			
Li, K, Na	15.500	1.860.000	hoher Salzgehalt, vgl. auch Chlorid
Erdalkalimetalle			
Ca, Mg	15.000	1.800.000	Härtebildner
Ba	34,4	4.130	Löslichkeitsprodukt für BaSO ₄ deutlich überschritten
Sr	647	77.800	hoher Anteil
Erdmetalle			
B	14,8	1.780	Borverbindungen mit evtl. tox. Relevanz
Al	0,29	34,6	nicht relevant
Tl	0,048	5,76	hohe Toxizität
4. Hauptgruppe			
Si	4,9	589	entspricht Angabe SiO ₂
SiO ₂	10,5	1.260	s. Si
Sn	0,01	1,4	nicht relevant
Pb	9,0	1.080	hoher Bleigehalt/Toxizität, s. auch NORM
5. Hauptgruppe			
Nitrat-N, Nitrit-N, Ammonium-N	7,4	895	kein nennenswertes N-Profil
P ges.	0,58	70,3	nicht relevant

Parameter	Mittelwert	Fracht	Bemerkung
PO ₄ Phosphat	0,11	12,8	nicht relevant
As	0,099	11,9	beobachten
Sb	0,001	0,14	nicht relevant
6. Hauptgruppe			
SO ₄ Sulfat	201	24.200	relevantes Anion, s. auch Ba-Gehalt
Sulfid I. freis.	0,04	4,89	unbedeutend, keine Sauergashinweise
Se	0,003	0,33	nicht relevant
Te	0,01	1,03	nicht relevant
Halogenide			
freies Chlor	0,20	23,8	zu gering für nennenswerte Organohalogenbildung/Oxidation
Chlorid	48.000	5.770.000	relevantes Anion/Salzgehalt NaCl, KCl
Bromid	424	51.000	Begleithalogen in annähernd natürlichem Masseverhältnis mit Cl
Fluorid, Iodid	14,6	1762	Gering
Nebengruppen			
Ti	0,03	4,1	beobachten
V	0,006	0,7	nicht relevant
Cr ges.	0,001	0,16	nicht relevant
Cr VI	0,005	0,60	nicht relevant
Mn	9,13	1.100	keine Besonderheit
Fe	29,8	3.590	keine Besonderheit
Co	0,002	0,27	nicht relevant
Ni	0,007	0,87	nicht relevant
Cu	0,009	1,11	nicht relevant
Zn	1,48	178	beobachten
Zr	0,01	0,84	nicht relevant
Mo	0,021	2,57	beobachten
Cd	0,042	5,02	beobachten wg. Toxizität
Hg	0,044	5,32	toxisch relevant, bestimmt als Hg gesamt; unklarer Anteil Hg-Ionen/-Metall
Hydrogencarbonat	56,4	6.780	nicht relevant
Cyanid ges.	0,005	0,60	nicht relevant
Cyanid I. Freisetzb.	0,005	0,60	nicht relevant
Salinität gesamt	79.800	9.590.000	mittlere Salinität von 80 g/L bestätigt
Radioaktivität	Konz. Bq/L	Fracht MBq/a	
NORM Ra-226	10,5	1.260	relevant für Einstufung
NORM Ra-228	10,8	1.290	relevant für Einstufung
NORM Pb-210	14,3	1.720	relevant für Einstufung

Nachhaltiger Umgang mit Lagerstättenwasser - Studie

Parameter	Mittelwert	Fracht	Bemerkung
NORM Po-210, U-234, U-238	1,26	150	beobachten
Summenparameter	Konz. mg/L	Fracht kg/a	
CSB	2.960	360.000	CSB hat anorg. und organische Ursachen
BSB	210	25.200	gering
TOC	348	41.800	beinhaltet u.a. auch Acetate und Glykolate
MKW	8,52	1.030	frei abscheidbare KW nach DEV H53
n-Alkane C5 - C10	2,1	252	siehe MKW
Alkohole, Ketone	18,2	2.190	evtl. Löslichkeitsvermittler gegenüber Wasser/MKW/BTEX
Aromaten BTEX	434	52.200	hoher Aromatengehalt, dispergiert und gelöst
Benzol	321	38.600	cancerogen relevant, hoher Anteil an BTEX
C3-Aromaten	4,34	522	toxisch relevante Derivate
Acetate, Glykolate	269	32.400	bestimmt Anteil der Organik, TOC
PAK	0,55	66	nur Naphthalin relevant
AOX	0,21	25,3	unbedeutend, s. LCKW; bleibt unberücksichtigt, da hoher Bestimmungsfehler bei vorliegendem Cl/Br-Gehalt
LCKW	-	-	nicht im LaWa vorhanden, bleibt unberücksichtigt
Phenolindex	2,86	344	gering, wird u.a. durch das Redoxpotenzial beeinflusst

Für eine ökologische Bewertung der Eignung verschiedener Behandlungs- und Verbleibkonzepte lässt sich das Lagerstättenwasser über folgende umweltrelevante Stoffgruppen hinreichend klassifizieren (angegeben sind jeweils die Parameter, die die Stoffgruppe bestimmen bzw. beeinflussen, die wichtigsten Parameter sind jeweils fett gedruckt):

- Salzgehalt (Salinität):
Li, **Na**, **K**, **Ca**, Ba, **Mg**, Sr, **Halogenide** (F-, Cl- Br-Verbindungen), **Sulfat**, Hydrogencarbonat, **Leitfähigkeit**, Acetat, Glykolat
- Schwermetalle:
pH-Wert, **Pb**, As, **Hg**, Cd, Ti, **Zn**, **auch Erdmetalle**, z.B. B, Tl, Chemischer Sauerstoffbedarf (**CSB**)

- Organische Verbindungen:
einkernige aromatische Kohlenwasserstoffe (**BTEX**), insbesondere **Benzol**, Mineralölkohlenwasserstoffe (**MKW**), **Alkohole/Ketone**, C3-Aromaten, polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK, vor allem Naphthalin), CSB, Gesamter organischer Kohlenstoff (**TOC**)
- Natürliche Radioaktivität (NORM):
Ra-226, Ra-228, Pb-210
- Schwebstoffe, abfiltrierbare Stoffe
abfiltrierbare Stoffe (inkl. Korngrößenverteilung), absetzbare Stoffe, **auch schwerlösliche Salze wie BaSO₄**, pH-Wert

Die Zusammensetzung des Lagerstättenwassers weist regionale Unterschiede auf, sie ist aber nicht für jede einzelne Bohrung exakt prognostizierbar, da sie unter anderem von der geförderten Gasmenge abhängt. Aus diesem Grund wurde aus dem zurzeit geförderten Lagerstättenwasser eine mittlere Zusammensetzung berechnet und für die weitere Betrachtung verwendet.

Die entsprechend ermittelten relevanten Schadstofffrachten im Lagerstättenwasser sind in Tabelle 8 zusammengestellt, wobei der maximale Lagerstättenwasseranfall von 130.000 m³ für das Jahr 2014 zugrunde gelegt wurde.

Tabelle 8: Repräsentative Schadstofffrachten im Lagerstättenwasser

Schadstoffgruppe	Einheit	Fracht (abgeschätzt)
Salzgehalt (Gesamtsalinität)	t/Jahr	9.600
Schwermetalle (As, Pb, Cd, Cr, Hg, Cu, Ni, Zn, Sb, Co, Sn, Zr)	t/Jahr	1,25
BTEX	t/Jahr	52,2
Kohlenwasserstoffe	t/Jahr	1,03
NORM (Ra-226, Ra-228, Pb-210, Po-210)	MBq/Jahr	4.420

MBq = Mega-Bequerel: 10⁶ Bequerel

2.2.1 Anorganische Verbindungen (Salzgehalt und Schwermetalle)

Unter „anorganischen Verbindungen“ sollen im Zusammenhang mit Lagerstättenwasser insbesondere die Salzbildner der Alkali- und Erdalkalimetalle und die Schwermetalle verstanden werden, die die hohe kennzeichnende Salinität des Lagerstättenwassers und die Schwermetalltoxizität bestimmen.

Die folgende Tabelle 9 zeigt einen Vergleich der zehn Hauptbestandteile (= 100%) des Lagerstättenwasser-Salzes mit dem Salz aus Meerwasser laut www.wasser-wissen.de :

Tabelle 9: Vergleich der Salzzusammensetzung Meersalz / Lagerstättenwasser

Element	Meersalz in %	LaWa in %	LaWa in mg/L ^{*)}
Chlorid	55,04	59,6	48.000
Natrium	30,61	17,9	14.400
Sulfat	7,68	0,25	201
Magnesium	3,69	0,09	74,7
Calcium	1,16	18,5	14.900
Kalium	1,10	1,2	1.000
Hydrogencarbonat	0,41	0,07	56,4
Bromid	0,19	0,53	424
Borat (aus B-Gehalt)	0,07	0,1	80,5
Strontium	0,04	0,8	647
Summe		100,00	80.600

^{*)} produktionsbezogener Mittelwert aus Tabelle 4 (diese Zusammenstellung dient zum Vergleich mit Meerwasser, die Summe entspricht nicht exakt der berechneten Gesamtsalinität)

Der Vergleich der Zusammensetzung zeigt bis auf den Härtebildner Calcium im Lagerstättenwasser und den höheren Na-Gehalt im Meersalz und den hier nicht angegebenen korrosionsrelevanten Sauerstoffgehalt eine gute Übereinstimmung.

Die aus den Analysen [U60] auf Basis [U31 und U58] berechnete Gesamtsalinität des Lagerstättenwassers beträgt:

Anionen	48.700 mg/L	5.850.000 kg/a
Kationen	31.100 mg/L	3.740.000 kg/a
Summe	79.800 mg/L	9.590.000 kg/a

Die Durchschnittskonzentration von ca. **80 kg/m³** für die Summe der Salze entspricht bei einer Dichte von 1.06 kg/m³ einem Masseanteil von ca. **7,6 % Salz** im Lagerstättenwasser.

Zum Vergleich zeigt die Nordsee einen mittleren Salzgehalt von 3,5 %, die Ostsee 0,4 bis 2 %, das Tote Meer hingegen 29 %. Das Tote Meer entspricht damit bei 20 °C einer gesättigten Salzsole mit etwa 26 % (Kochsalz, NaCl). Die mittlere Salzkonzentration der Weltmeere liegt bei 34,7 kg/m³, entsprechend 3,5 %.

Das Lagerstättenwasser zeigt von Bohrung zu Bohrung zum Teil erhebliche Salinitätsunterschiede im Bereich von 0,09 – 228 g Salz je kg Wasser, entsprechend 0,009 bis 21,5 %.

In der Praxis hat sich eine Unterteilung in stark (> 1 g/L) und schwach salines Lagerstättenwasser (< 1 g/L) bewährt, die sich an der Verarbeitbarkeit durch CP-Anlagen derzeitiger Entsorger orientiert [U54].

Eine in der Hydrogeologie übliche Unterscheidung ist in Tabelle 10 dargestellt.

Tabelle 10: Einteilung salzhaltiger Wässer, vgl. auch [L5]

Bezeichnung	Salzgehalt	
	g/kg	%
Süßwasser	1	0,1
salzhaltiges Wasser	1 - 25	0,1 - 2,5
Meerwasser, meerwasserähnliches Wasser	25 - 50	2,5 - 5,0
Salzwasser	50	> 5,0
LaWa gemäß Analysen	0,09 - 228	0,009 – 21,5

Interessant ist ein Vergleich zwischen natürlichem Mineralwasser und der von der Fa. K+S AG erzeugten Sole, wie er aus einer Antwort der niedersächsischen Landesregierung zur Großen Anfrage der Fraktion Bündnis 90/Grüne vom 18.01.2010 [L5] hervorgeht, da man daraus ablesen kann, in welchem Umfang Direkteinleitungen in niedersächsische Flüsse in der Vergangenheit erlaubt wurden.

Diesen Werten wurden die Analysen-Bandbreiten des Lagerstättenwassers der RWE Dea AG gegenübergestellt; die Werte der K+S-Sole stammen aus dem Vortrag Stahl - K+S AG „Informationen zur Produktion und Entsorgungsmanagement der K+S AG“, gehalten am 24.06.2008, 4. Sitzung des Runden Tisches, www.runder-tisch-werra.de:

Tabelle 11: Vergleich von Salzgehalten im Mineralwasser und genehmigten Direkteinleitungen mit der Zusammensetzung von Lagerstättenwasser

Element	Natürliches Mineralwasser (g/l)	Sole K+S (g/l)	LaWa (g/l)
Chlor(id)	18,9-19,4	162,4-188,0	0,014 - 138,47
Natrium (Na)	10,5-10,8	50,0-69,0	0,002 - 42,79
Magnesium (Mg)	1,26-1,35	21,1-38,6	0,00001 - 0,21
Sulfat (Schwefel)	2,7	25,2-38,4	0,0008 - 0,52
Calcium (Ca)	0,4-0,41	< 0,4	0,0024 - 46,41
Kalium (K)	0,38-0,39	14,4-29,9	0,0006 - 3,15

Die Natrium-, Kalium-, Magnesium-, Chlorid- und Sulfatgehalte des Lagerstättenwassers liegen immer deutlich unter den K+S-Solen, allein der Calcium-Gehalt ist gegenüber der K+S-Sole i.A. erhöht.

Der Salzgehalt des Lagerstättenwassers ist demgegenüber vergleichsweise gering. Die Darstellung gibt allerdings keinen Aufschluss über die abweichende Isotopenverteilung von Lagerstättenwasser und Salzsole.

Für die Gruppe der Schwermetalle ist besonders aufgrund der Toxizität und Konzentration hervorzuheben [L6, L7, L8]:

- Blei (Pb) mit einer Konzentration von durchschnittlich 9,0 mg/L, mit 14,3 Bq/L liegt auch ein relevanter Anteil als radioaktives Isotop Pb-210 vor

Die folgenden Schwermetalle weisen ebenfalls hohe Toxizitäten in ihren wasserlöslichen ionischen Verbindungen auf, liegen aber nur in Spuren, d.h. $\leq 0,01$ mg/L vor:

- Cr, Cu, Ni, Sb, Co, Se, Te, V, Sn, Zr.

Zu den toxisch relevanten Bestandteilen ist mit geringen, aber zu berücksichtigenden, Konzentrationen zu zählen:

- Hg 0,044 mg/L
- Tl 0,048 mg/L
- Zn 1,48 mg/L
- Cd 0,042 mg/L
- Mo 0,021 mg/L
- As 0,099 mg/L

Quecksilber (Hg) ist mit einer Gesamtkonzentration von durchschnittlich 44 µg/L vorhanden. Es ist anzunehmen, dass ein relevanter Anteil als metallisches Quecksilber möglicherweise adsorptiv an Schwebstoffen gebunden, vorliegt. Nach [L9] ist die Bildung Hg-organischer Verbindungen unwahrscheinlich.

Die Schwermetalle machen insgesamt nur eine jährliche Fracht von ca. 1,25 Mg aus, ihre Toxizität ist aber extrem von den Metallverbindungen und deren Löslichkeit abhängig.

Die Löslichkeit, und damit auch die Bioverfügbarkeit, nimmt bei allen Metallen mit sinkendem pH, d.h. im sauren Milieu, stark zu. So bilden viele Schwermetalle im alkalischen Bereich schwerlösliche Hydroxide oder Sulfide (s. Fällung von Schwermetallen), liegen aber bei pH-Werten im stärker sauren Bereich vollständig dissoziiert als Metallkationen vor; im Lagerstättenwasser liegt der pH-Wert bei 5,8 (leicht sauer). Metallkationen können gleichwertige Ionen im Elektrolythaushalt ersetzen und werden so besonders gut aufgenommen (hoher Biokonzentrationsfaktor).

Zur Bewertung human- und ökotoxischer Faktoren sei auf das Gutachten Sonderteil A verwiesen, in welchem auf geltende chemikalienrechtliche Einstufungen Bezug genommen wird.

2.2.2 Organische Verbindungen (Kohlenwasserstoffe, BTEX-Aromate)

Die Anteile organischer Verbindungen im Lagerstättenwasser lassen sich am ehesten über Summenparameter wie CSB (Chemischer Sauerstoffbedarf), BSB (Biochemischer Sauerstoffbedarf, i. d. R. innerhalb von 5 Tagen Abbauzeit) oder TOC (Total Organic Carbon), der Anteil von abscheidbaren Mineralöl-Kohlenwasserstoffen über den (M)KW-Gehalt nach der Einheitsvorschrift DEV H 53 definieren. Das BSB-CSB-Verhältnis ist zugleich ein Maß für den Grad des aeroben Bioabbaus, vgl. auch Kapitel 8 im Sonderteil A zu diesem Gutachten. Abwasser-/Abfallgrenzwerte werden häufig über diese Summenparameter festgelegt.

Für die ökotoxikologische Bewertung sind i.A. die Konzentrationen der toxisch relevanten organischen Verbindungen zu betrachten:

BTEX Summe Benzol, Toluol, Ethylbenzol, Xylole, von denen besonders das als cancerogen bekannte Benzol hervorzuheben ist

PAK polyaromatische Kohlenwasserstoffe, Lagerstättenwasser enthält nur Naphtalin

Von den genannten Verbindungsgruppen haben nur die BTEX im Lagerstättenwasser, einschließlich geringer C3-Aromaten-Anteile, eine (öko-)toxikologische Relevanz.

Die im Lagerstättenwasser enthaltenen Mineralöl-Kohlenwasserstoffe (MKW) liegen in einem Bereich oberhalb ihrer Wasserlöslichkeit, sodass sich durch Phasenbildung - evtl. mit extrahiertem BTEX - brennbare Flüssigkeitsschichten abscheiden können; ein Prozess, dem durch „Löslichkeitsvermittler“ wie wassermischbare Alkohole und Ketone entgegengewirkt wird. Der höhere Anteil an Glykolderivaten (mehrwertige Alkohole) dürfte der unzureichenden Phasentrennung bei der Glykoltrocknung des Gases entstammen.

Ökotoxikologisch ist das Lagerstättenwasser hinreichend über den „relativ hohen“ Anteil an BTEX, und darunter das Benzol selbst, bestimmt.

In der folgenden Tabelle 12 sind einige wichtige ökotoxikologische Daten für Benzol zusammengestellt.

Tabelle 12: Umweltdaten Benzol nach [L6]

Parameter	Wert
Wasserlöslichkeit bei 25 °C	1,77 g/L
Dampfdruck bei 20 °C	10.200 Pa
Siedepunkt	80,1 °C
CSB	3,07 g O ₂ /g Benzol (experimentell 19 – 33 % dieses Wertes)
TOC	92 %
Aerober Abbau in Kläranlagen	33 % nach 12 h
Verteilungskoeffizient Octanol-Wasser log P _{ow}	2,10
Löslichkeit in lipoiden Lösungsmitteln wie Aceton, Ether, Alkohol	∞
Biokonzentrationsfaktor $BCF = \frac{c(Fisch)}{c(Wasser)}$	19

Zur Bewertung human- und ökotoxischer Faktoren sei auf das Gutachten Sonderteil A verwiesen, in welchem auf geltende chemikalienrechtliche Einstufungen Bezug genommen wird.

2.2.3 Natürliche radioaktive Stoffe (NORM)

Radioaktivität bezeichnet den unter Aussendung von Strahlung erfolgenden Zerfall bestimmter Elemente. Geschieht dieser Zerfall von Natur aus, so spricht man von „natürlicher Radioaktivität“, muss der Zerfall durch künstliche Ereignisse, z.B. in einem Kernreaktor, erzeugt werden, so wird dies als „künstliche Radioaktivität“ bezeichnet [L10].

Natürlich radioaktive Stoffe sind zumeist in der Natur vorkommende schwere Atomkerne, die einer e-Funktion folgend unter Aussendung von α -Teilchen (doppelt positive geladene He-Kerne) mit langen Halbwertszeiten zerfallen. Die wesentlichen in der Natur vorkommenden radioaktiven Stoffe lassen sich durch Zerfallsreihen (Angabe der im Gleichgewicht stehenden Tochternuklide gemäß Anlage III, Tabelle 2 StrlSchV) beschreiben, z.B.:

U-238sec – Th-234, Pa-234m, U-234, Th-230, Ra-226, Rn-222, Po-218, Pb-214, Bi-214, Pb-210, Bi-210, Po-210, Po-214

Th-232sec - Ra-228, Ac-228, Th-228, Ra-224, Rn-220, Po-216, Pb-212, Bi-212, Tl-208, Po-212

Pb-210++ - Bi-210, Po-210

Außer den drei natürlichen Zerfallsreihen, die von Uran-235 (Zerfallsreihe bei U-238sec berücksichtigt), Uran-238 und Thorium-232 ausgehen, existieren nur wenige natürlich- α radioaktive Stoffe wie Kohlenstoff C-14, Kalium K-40. Neben den α -Teilchen können bei den Zerfallsprozessen auch β -Teilchen (Elektronen) und γ -Strahlung (hochenergetische Strahlung ähnlich Röntgenstrahlung) entstehen.

Die Zerfälle pro Sekunde (Aktivität) werden in der Einheit Bequerel Bq angegeben.

Bei der Untersuchung der Lagerstättenwässer wird die Aktivität folgender Isotope der Elemente Blei, Radium, Polonium und Uran in Bq/L bestimmt:

Pb-210, Po-210, Ra-226, Ra-228, U-234 und U-238

Nachfolgend sind in der Tabelle 13 Zerfallsreihe, Zerfallsart, Atommasse und Halbwertszeit der Isotope tabellarisch zusammengefasst.

Die Bestimmung der Aktivität für eine bestimmte Menge m (g) eines Isotops mit der Atommasse M (g/mol) und der Halbwertszeit $t_{1/2}$ errechnet sich über folgende Beziehung:

$$\text{Zerfallsaktivität (Bq)} = (m / M) \times N_A \times \ln(2) / t_{1/2}$$

mit $N_A = 6,022E+23 \text{ mol}^{-1}$

Beispielrechnung:

Aus der gemessenen Aktivität, z.B. für den produktionsgewichteten Mittelwert von 14,3 Bq/l für Pb-210, lässt sich auf den Massegehalt des Isotops zurückrechnen:

Die Konzentration von Pb-210 beträgt danach $2,24E-13 \text{ mg/L}$. Demnach liegen 0,0000000000025 % vom analytisch bestimmten Blei als radioaktives Isotop vor.

Tabelle 13: Zerfallsreihe, Zerfallsart, Atommasse und Halbwertszeit der im Lagerstättenwasser vorkommenden Isotope

	Zerfallsreihe	Zerfallsart	Atommasse	Halbwertszeit
Pb-210	Uran-Radium	α, β	209,98	22,3 a
Po-210	Uran-Radium	α	209,98	138 d
Ra-226	Thorium	α, β	226,03	1602 a
Ra-228	Thorium	β	228,03	5,7 a
U-234	Uran-Radium	α	234,04	245.500 a
U-238	Uran-Radium	α	238,05	4,47 Mrd a

Bei der gesundheitlichen Bewertung der Radioaktivität, vgl. auch [L11], ist zwischen somatischen Strahlenschäden (Schäden in Körperzellen), und genetischen Strahlenschäden (in Keimzellen, die sich ausschließlich auf die Nachkommen auswirken) zu unterscheiden. Bei der Bewertung ist weiterhin zu beachten, dass Erkenntnisse über die Strahlenwirkung zumeist auf unbeabsichtigten und beabsichtigten Radioaktivitätsfreisetzungen und Strahlenunfällen beruhen:

- Eine somatische Strahlenwirkung, z.B. durch kurzzeitige Ganzkörperbestrahlung, unter $0,2 \text{ J/kg}^1$ (20 rem, 0,2 Sv) lässt keine Wirkungen und Beschwerden erkennen, bis 1 J/kg (100 rem, 1 Sv) können bereits leichte Blutbildveränderungen auftreten, es sind aber "keine ernsten Schäden wahrscheinlich"; somatische Strahlenschäden aufgrund natürlicher Radioaktivität und Hintergrundbelastung sind auszuschließen.

¹ Auf Weichteile bezogene Äquivalentdosis nach Schultz,H.;Vogt,H.-G.: Grundzüge des praktischen Strahlenschutzes, Verlag Karl Thiemig, München 1977.

- Eine untere Grenze der Äquivalent-Dosis lässt sich für genetische Schäden nicht angeben, es wird aber “angenommen, dass die Wahrscheinlichkeit einer Erbgutschädigung unabhängig von der zeitlichen Folge der Bestrahlung etwa proportional zur insgesamt empfangenen Dosis zunimmt”.
- Für Deutschland – mit starken regionalen und individuellen Schwankungen - wird nach [L10] von einer natürlichen Strahlenbelastung von 2,4 mJ/kg*a bzw. mSv/kg*a (äußere Strahlenbelastung 0,7 mSv/a, innere Strahlenbelastung 1,7 mSv/a insbesondere durch eingeatmetes Radon in Gebäuden) ausgegangen.
- Nach AtG und speziell nach StrlSchV, § 97, werden Maßnahmen zum Schutz der Bevölkerung gefordert, wenn durch Verwertung oder Beseitigung überwachungsbedürftiger Rückstände für Einzelpersonen der Bevölkerung der Richtwert der effektiven Dosis von 1 mSv im Kalenderjahr überschritten wird.
- In den angegebenen Äquivalenzdosisraten ist die unterschiedliche Wirkung der Strahlenarten bereits berücksichtigt. Insbesondere α -Strahler sind in erster Linie durch Inkorporation wirksam, da sie anders als β -Teilchen (Elektronen) und γ -Strahlung bereits durch geringste Abschirmungsmaßnahmen von einer äußeren Körpereinwirkung abgehalten werden können. Zur unterschiedlichen Wirkung auf Gewebe vergleiche auch [L11].

Die in der nachfolgenden Tabelle 14 dargestellten Vergleichswerte zeigen die nur geringe Strahlenbelastung des Lagerstättenwassers, wenngleich starke Unterschiede zwischen den einzelnen Anfallstellen bestehen. Der Vergleich beispielsweise mit Trinkwasser zeigt, dass dort im Maximalfall deutlich höhere natürlich vorkommende Belastungen als im Lagerstättenwasser vorkommen und somit die Strahlenexposition bestimmen. Jede einzelne Strahlenbelastung trägt aber zur Gesamtdosisbelastung bei.

Tabelle 14: Vergleichswerte der NORM-Isotope im Lagerstättenwasser mit Umweltwerten

	Trinkwasser ¹⁾	LaWa ²⁾	Granit ³⁾	Ton/Lehm	Basalt ³⁾	Milch ³⁾	Nahrungsmittel ³⁾
Pb-210	Bq/l	Bq/l	Bq/kg	Bq/kg	Bq/kg	Bq/l	Bq/kg
Min	1,140	0,002					0,010
Max	621,000	59,000					0,115
Median	5,700					0,011	
Mittelwert		14,300					0,029
Po-210	Bq/l	Bq/l	Bq/kg	Bq/kg	Bq/kg	Bq/l	Bq/kg
Min	0,050	0,001					
Max	113,000	4,300					
Median	1,600						
Mittelwert		1,250					
Ra-226	Bq/l	Bq/l	Bq/kg	Bq/kg	Bq/kg	Bq/l	Bq/kg
Min	0,370	0,007	30,000	< 20,000	6,000		0,006
Max	260,000	36,500	500,000	90,000	36,000		0,042
Median	4,810					0,005	
Mittelwert		10,500	100,000	< 40,000	26,000		0,021
Ra-228	Bq/l	Bq/l	Bq/kg		Bq/kg	Bq/l	Bq/kg
Min	0,180	0,007					0,016
Max	22,300	29,700					0,069
Median	6,100					0,004	
Mittelwert		10,800					0,030

¹⁾ Aus: www.gesundheitsamt.de/alle/umwelt/physik/strahl/ion/ra/n_r/trinkwasser.htm

²⁾ Aus Analysenergebnisse RWE Dea AG [U31]

³⁾ Aus: Bundesamt für Strahlenschutz: Strahlenexposition durch natürliche Radionuklide in der Bundesrepublik Deutschland, Salzgitter 2009

Gellermann [U25] konnte in seinem Gutachten die gute Korrelation der NORM-Anteile mit der Salinität aufzeigen, vgl. nachfolgende Abbildung 8.

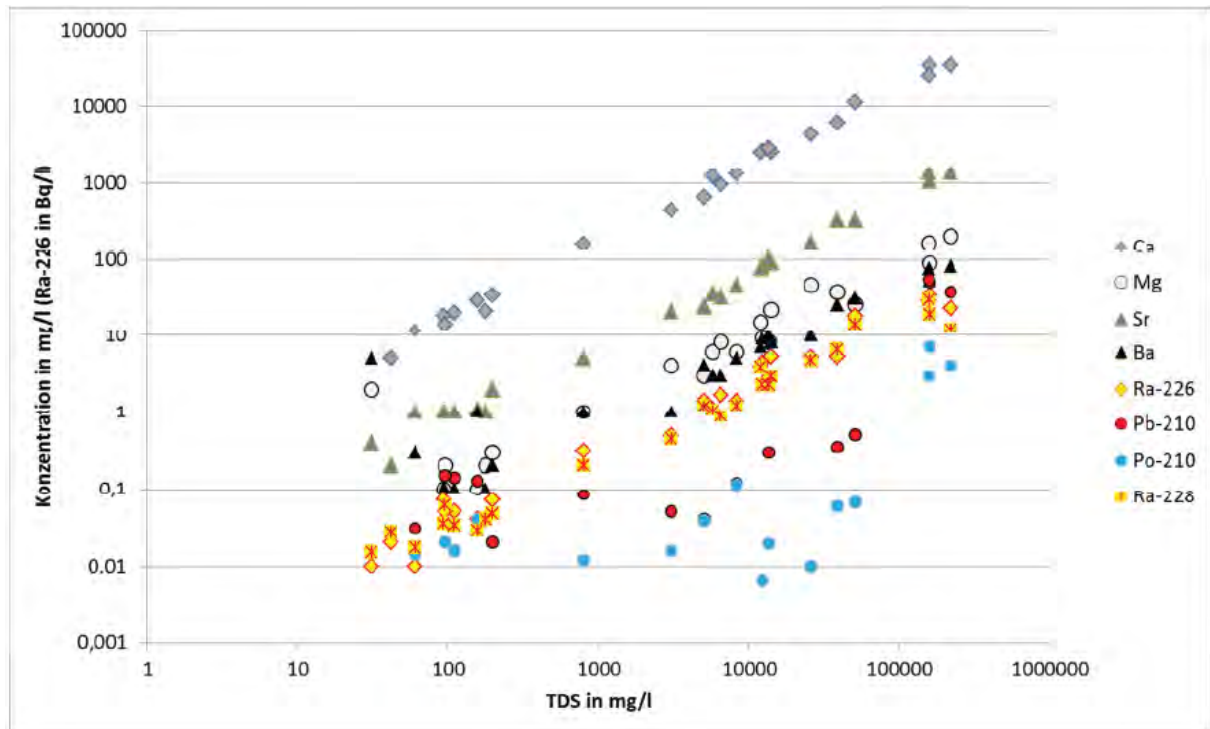


Abbildung 8: Aktivitätsverhältnis der Radiumisotope Ra-226/Ra-228 in Abhängigkeit von der Gesamtmineralisation (TDS: total dissolved solids)

Im Gegensatz zu den Konzentrationen sind die Aktivitätsverhältnisse der natürlichen Radionuklide nicht oder bestenfalls wenig vom Salzgehalt des Lagerstättenwassers abhängig.

2.2.4 Schwebstoffe / abfiltrierbare Stoffe

Die Trübung des Lagerstättenwassers entsteht durch das Vorhandensein dispergierter wasserunlöslicher organischer Stoffe wie MKW und suspendierte wasserunlösliche Feststoffe.

Letztere sind neben mineralischen Feststoffen (z.B. Quarzsande/Silikate) solche schwerlöslichen anorganischen Verbindungen, die in Konzentrationen oberhalb ihrer Löslichkeitsprodukte (K_L) vorliegen, z. B. Bariumsulfat.

Von Seiten der Abwassereinleitung wird unterschieden zwischen

- absetzbaren Stoffen (Absetzbarkeit in mL/L nach 0,5 h) und
- abfiltrierbaren Stoffen (differenziert nach Filterfeinheit)

Zur Unterscheidung des mineralischen bzw. organischen Charakters der Schwebstoffe kann der Glührückstand bestimmt werden (mineralischer Anteil).

Zur Charakterisierung des Feststoffanteils aus dem Lagerstättenwasser liegen die in Tabelle 15 angegebenen Untersuchungsergebnisse vor [U57]:

Tabelle 15: Untersuchungen der Feststoffanteile im Lagerstättenwasser durch Fa. Aquaconsult / RWE Dea AG

Bemerkung	Filtergröße [µm]	filtrierte Wassermenge [L]	Filterrück- stand [mg/L]	An Feststoffe gebund. KWST [mg/L] [%]		Feststoffe [mg/L] [%]		Anteil d. Fraktion
Während TKW- Beladung fraktionierte Filtration		22,0	2,4	0,3	14,2	2,0	85,8	
1. Filter	8	22,0	1,1	0,2	16,3	0,9	83,7	43,8%
2. Filter	5	22,0	0,7	0,1	12,4	0,6	87,6	30,6%
3. Filter	1,2	22,0	0,6	0,1	12,6	0,5	87,4	25,6%

Parameter									
1. Filterrückstand									
Die Trockenmasse der nach Filtration auf dem Filter abgeschiedenen anorganischen und organischen Substanzen									
2. An Feststoffe gebund. KWST									
Masse der mit Xylol entfernbaren Kohlenwasserstoffe									
3. Feststoffe									
Trockengewicht der aus 1. nach Waschen mit Xylol erhalten Feststoffe									

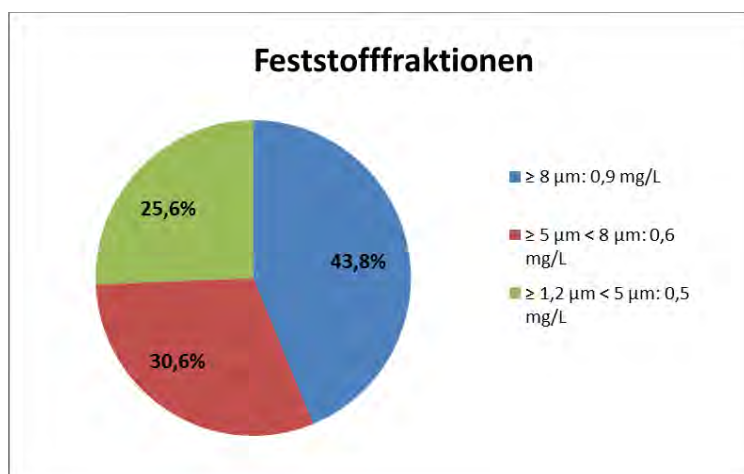


Abbildung 9: Feststofffraktionen im Lagerstättenwasser

Feinfraktionen unter 5 µm lassen sich nur noch sehr schwer oder überhaupt nicht sedimentieren, was für die Auswahl von Trennverfahren von Bedeutung ist (Sedimentation, Filtration).

Von toxikologischer Relevanz können die an den Partikeln adsorptiv gebundenen Schadstoffe sein, von denen beispielhaft die aufgrund der Hydrophobie besonders gut absorbierbaren MKW untersucht wurden.

Die Ergebnisse belegen, dass die untersuchten Proben des Lagerstättenwassers nur ca. 2,4 mg/L Feststoffpartikel > 1,2 µm enthalten (üblicherweise wird hier die Fraktion > 0,45 µm nach DIN 38409-2 bestimmt).

Hinweis 1: Für die verfahrenstechnische Auslegung wird nach Vorgaben von [U47] im Folgenden von einem Feststoffgehalt im Lagerstättenwasser von 100 mg/L ausgegangen! Die abfiltrierbaren Feststoffe enthalten adsorptiv durchschnittlich ca. 14 % MKW.

Hinweis 2: Ein solcher Anteil ist relevant für die Entsorgung als „gefährlicher Abfall“. Hierzu liegen aber keine belastbaren Untersuchungen vor, sodass dieser Aspekt der Entsorgung des Sediments im Folgenden nicht weiter berücksichtigt wird.

2.2.5 Regionale Charakteristik

Zwischen den einzelnen Bohrungen gibt es zum Teil beachtliche Unterschiede in der Zusammensetzung des Lagerstättenwassers, als Beispiele seien genannt:

- Hohe Salinitäten weisen Becklingen Z1 und Z2 (NaCl) und Bötersen Z2 und Z6 (Ca) auf, geringste Anteile an diesen Ionen zeigen Hemsbünde Z2 und Z4.
- Höchste Anteile der NORM, besonders an Ra-226 und Pb-210, sind in Bötersen Z6 anzutreffen, keine nennenswerten natürlichen Radioisotope zeigen hingegen Hemsbünde Z2 und Z4 sowie Westerholz Z1.
- Hemsbünde Z2 bis Z4 zählen zu den Bohrungen mit den geringsten Frachten an gelösten Stoffen im Lagerstättenwasser.
- Die Frachten an gelösten Stoffen im Lagerstättenwasser liegen je Anfallstelle zwischen 4,0 und 6.000 t/a.

Trotz dieser Unterschiede gibt es keine Merkmale, die sich bestimmten Regionen zuordnen lassen, vgl. nachfolgende Abbildungen 11 bis 16.

Insgesamt ist festzustellen, dass das Lagerstättenwasser zu ca. 12,5 % aus gelösten bzw. dispergierten, überwiegend anorganischen Substanzen besteht. Der Anteil an diesen Inhaltsstoffen teilt sich auf ca. 99,5 % Kationen/Anionen und 0,5 % BTEX (Benzol, Toluol, Xylole, Toluol) auf. Der in der Regel hohe Salzgehalt bestimmt sich im Wesentlichen (96 %) zu Calcium (Ca), Natrium (Na) und Chlorid (Cl).

Bei diesen Angaben über Stoffanteile wird auf die im Mai und Juli 2013 vorgelegten Übersichten [U47-48, U58] mit Berechnung der Jahresfrachten auf Basis produktionsgewichteter Konzentrationen der LaWa-Anteile aus den Anfallstellen Bezug genommen. Die Daten werden in einer Berechnung zusammengeführt [U60]. Diese Betrachtung entspricht der Auswahl eines Modellabwassers mit durchschnittlicher Zusammensetzung, wenn z.B. das Lagerstättenwasser zur zentralen Versenkung oder Behandlung zusammengeführt wird. Die Frage einer dezentralen Behandlung wird an späterer Stelle in Kapitel 7 behandelt.

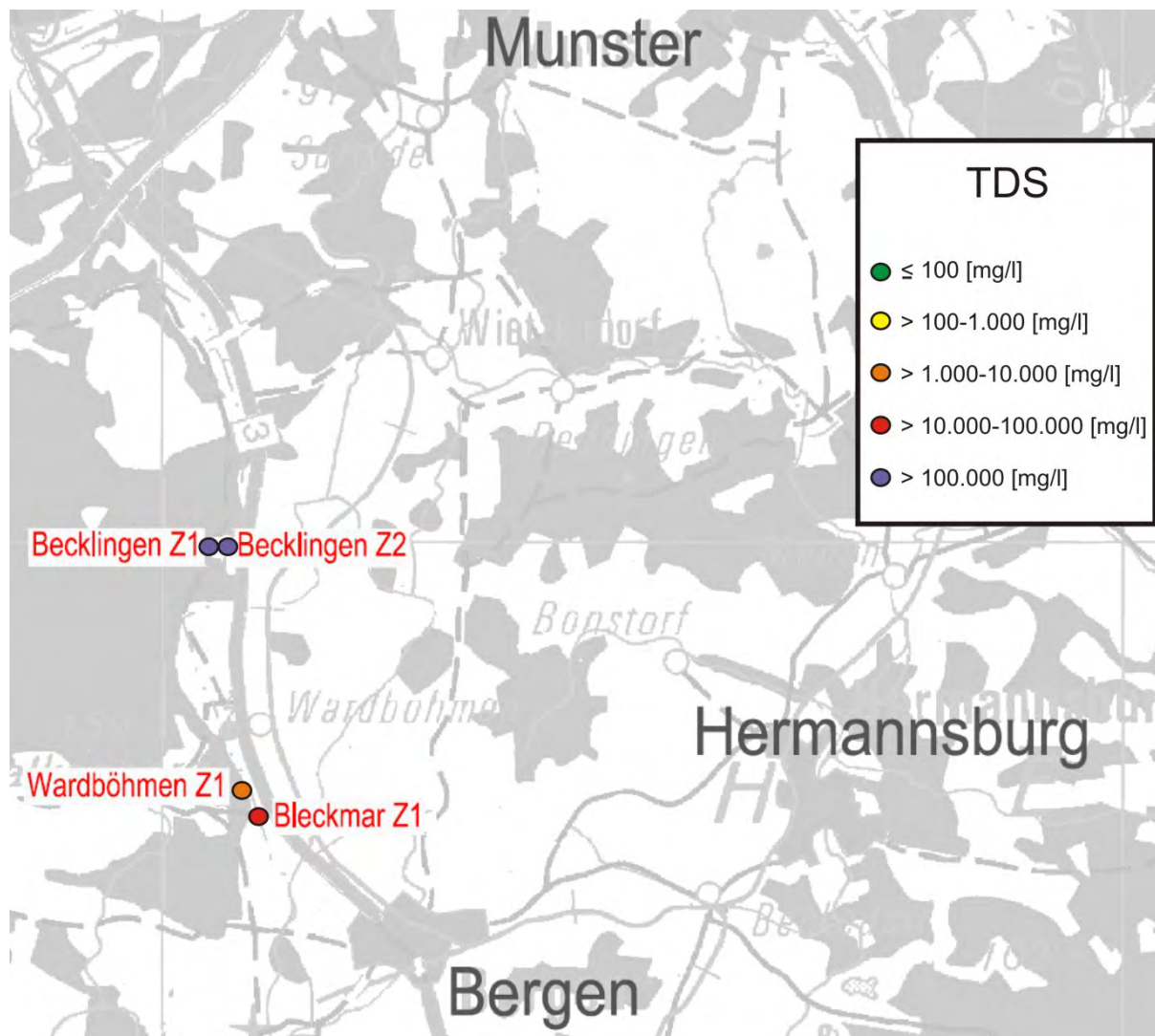


Abbildung 10: Verteilung der Salzgehalte (TDS: Total dissolved solids) im Lagerstättenwasser, Erdgasgebiet Celle und Heidekreis

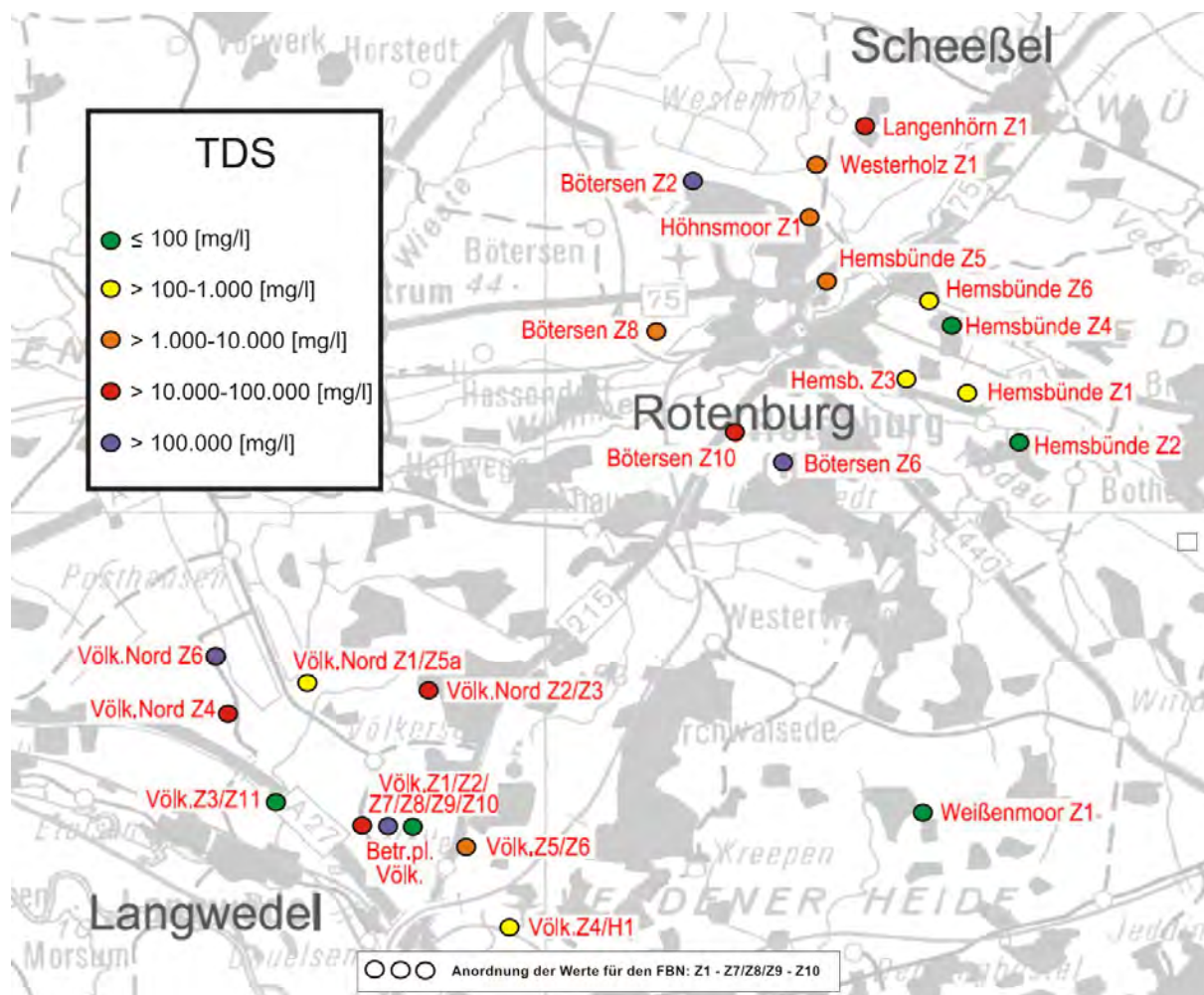


Abbildung 11: Verteilung der Salzgehalte (TDS: Total dissolved solids) im Lagerstättenwasser, Erdgasgebiet Rotenburg und Verden

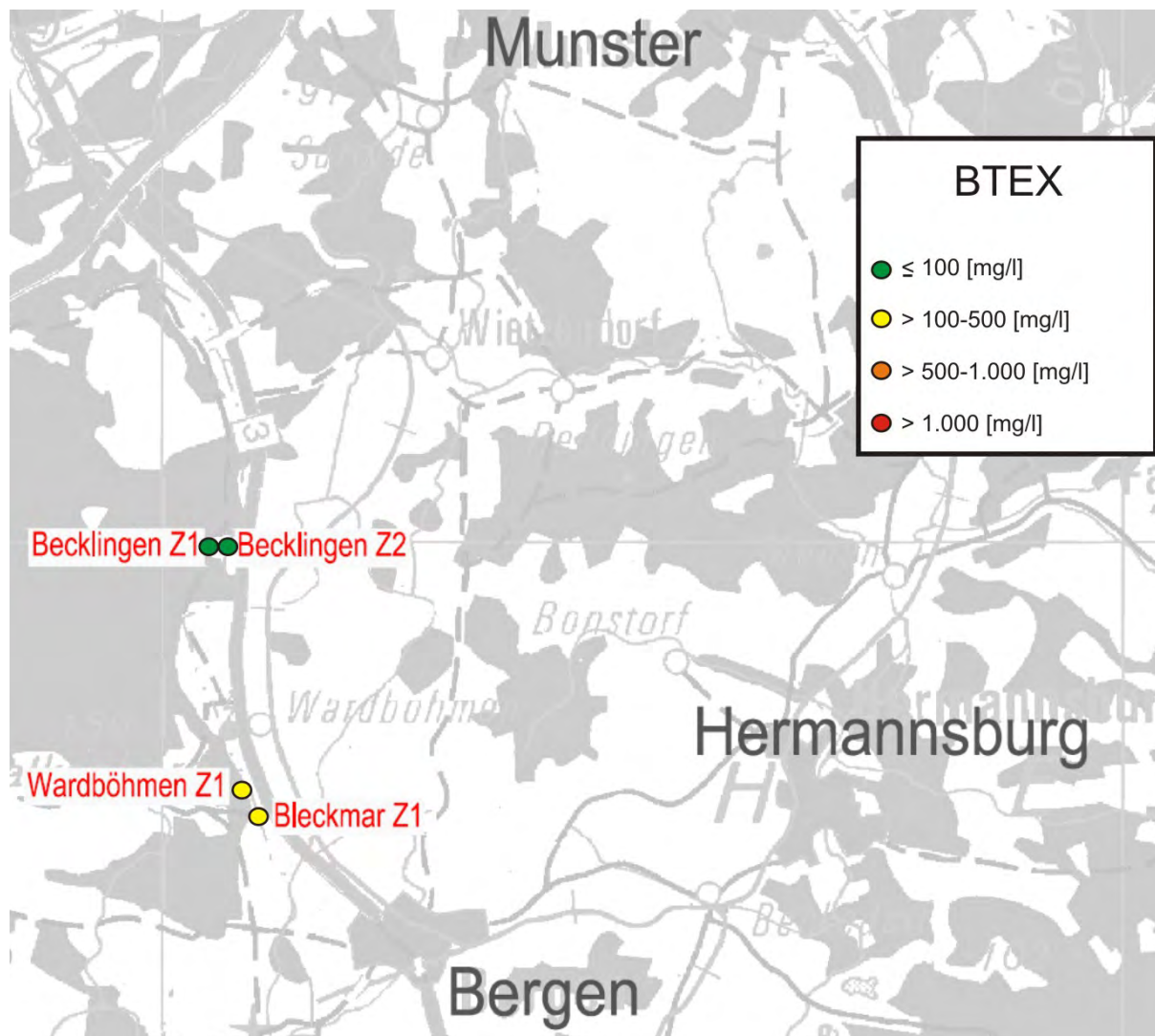


Abbildung 12: Verteilung der BTEX-Gehalte im Lagerstättenwasser, Erdgasgebiet Celle und Heidekreis

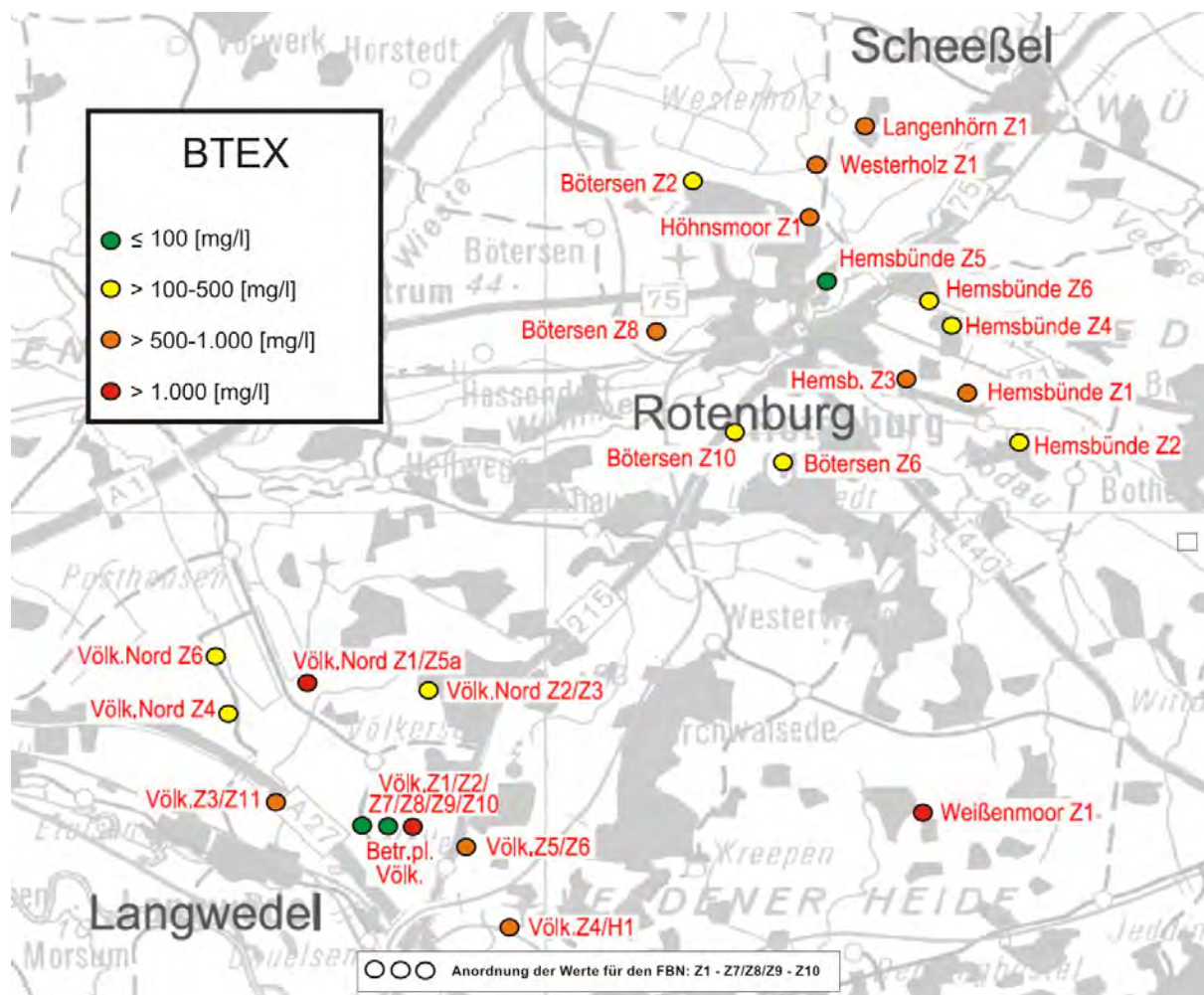


Abbildung 13: Verteilung der BTEX-Gehalte im Lagerstättenwasser, Erdgasgebiet Rotenburg und Verden

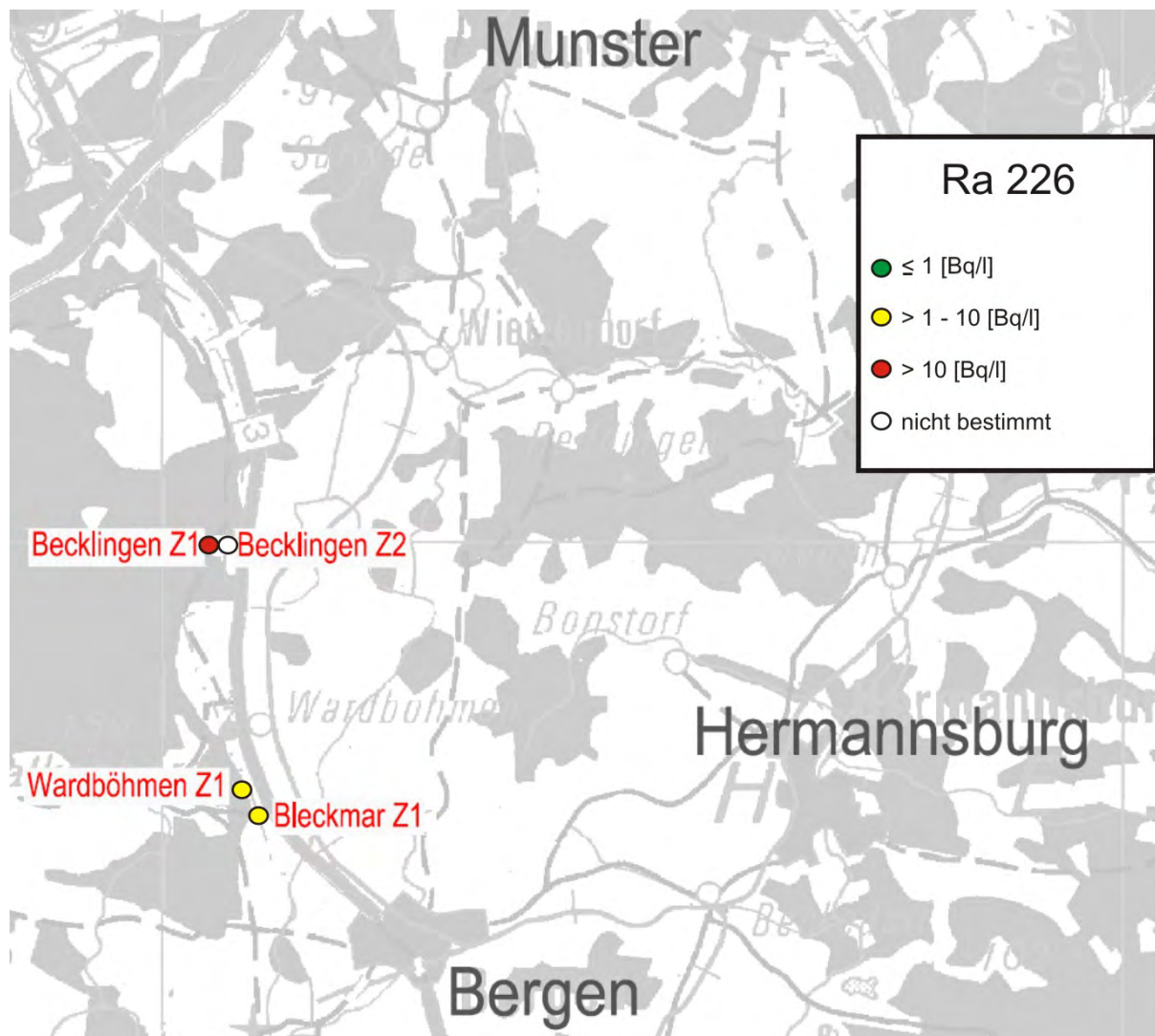


Abbildung 14: Verteilung von Radium-226 im Lagerstättenwasser, Erdgasgebiet Celle und Heidekreis

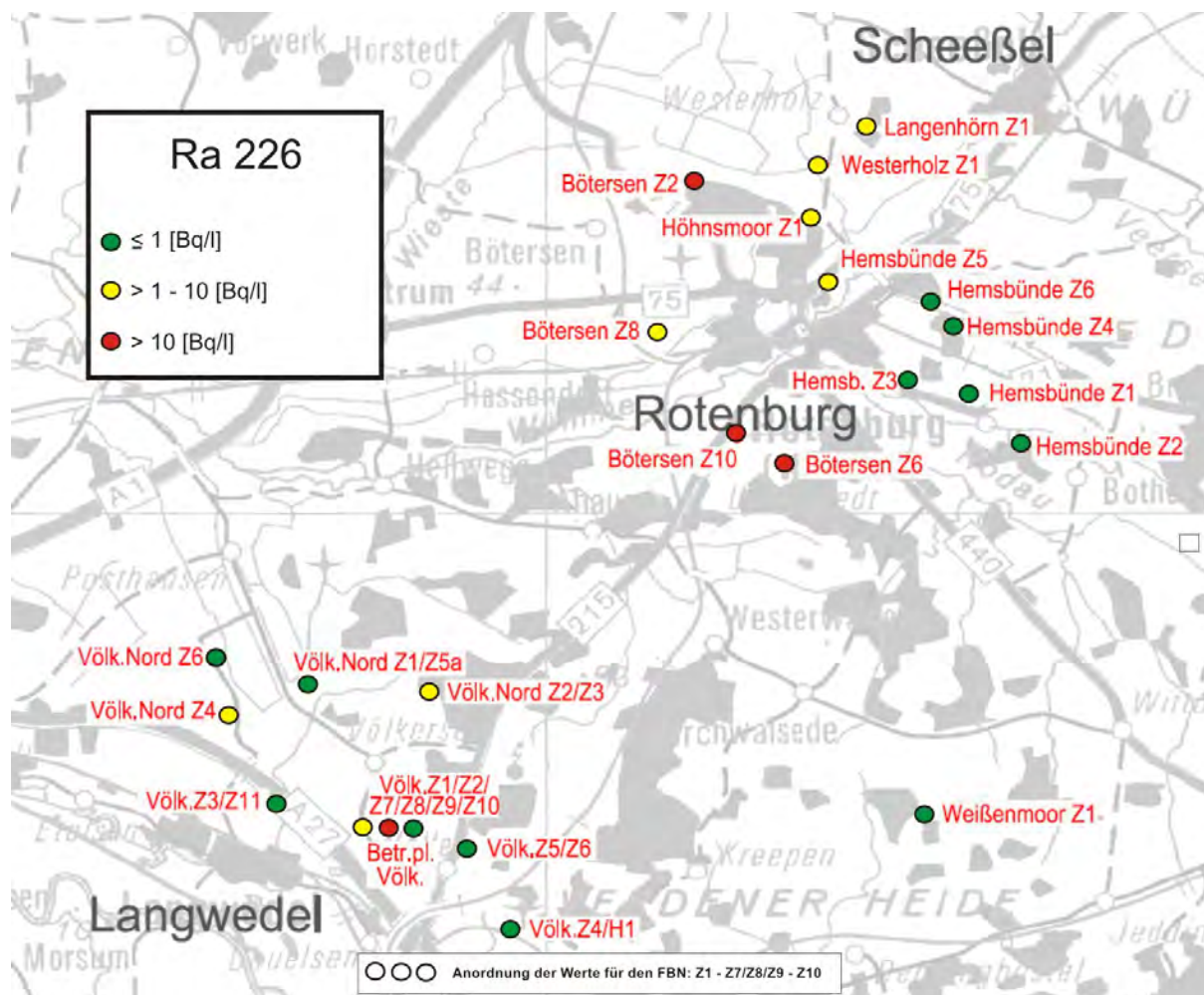


Abbildung 15: Verteilung von Radium-226 im Lagerstättenwasser, Erdgasgebiet Rotenburg und Verden

2.3 Rechtliche Rahmenbedingungen

Hinweis: Die zitierten Rechtsquellen befinden sich im separaten Verzeichnis am Ende der Studie.

Grundsätzlich ist für die gesamte Prozesskette

- der Anfall des Lagerstättenwassers bei der Förderung und Trocknung des Erdgases und die Bereitstellung in B9-Tankbehältern,
- der Transport zur Aufbereitung,
- die Aufbereitung des Lagerstättenwassers,
- die Injektion ins Rotliegende, der Einsatz als Flutungsmittel im Salzbergwerk oder die Direkt-/Indirekteinleitung,
- die Abfalltransporte zur Entsorgung und
- die Abfallentsorgung, insbesondere die Deponierung nicht verwertbarer Abfälle aus der Aufbereitung

die Frage nach den jeweils geltenden Umweltrechtsbestimmungen zu beantworten.

Der nachfolgende Überblick soll den Rechtsrahmen aufzeigen; eine Konkretisierung erfolgt im Zusammenhang mit der Darstellung der betrachteten Optionen in Kapitel 4.

Für Tätigkeiten im Zusammenhang mit der Gewinnung von Bodenschätzen (hier: Erdgas) besitzt das Bundesberggesetz BBergG eine konzentrierende Wirkung. Das in § 54 BBergG geregelte Zulassungsverfahren basiert im Wesentlichen auf einem Betriebsplan, an dessen vorgesehenen Maßnahmen die zuständige Bergbehörde auch solche Behörden und Planungsträger (z.B. Gemeinden) zu beteiligen hat, die hiervon berührt werden.

Bezüglich der im Rahmen bergbaulicher Tätigkeiten anfallenden Abfälle sind im Betriebsplan deren ordnungsgemäße Verwertung oder Beseitigung festzulegen.

Für die speziellen Anforderungen z.B. an Förderbohrungen gilt in landesrechtlicher Zuständigkeit die niedersächsische Tiefbohrverordnung BVOT.

Bei der Anwendung des Bergrechts ist zu beachten, dass dieses nur im Bereich bergrechtlicher Zuständigkeit gilt; Tätigkeiten und Anlagenbereiche, die sich nicht in der Zuständigkeit des Bergrechts befinden, z.B. Abfall- oder Abwasser-Aufbereitungsanlagen Dritter, unterliegen dem jeweiligen Einzelrecht für diese Betriebe oder Tätigkeiten.

Zu besseren Übersicht werden nachfolgend einzelne Umweltgesetze angeführt und deren Abgrenzung zum Bergrecht dargestellt:

Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG)

Die Vorschriften des KrWG gelten **nicht** für

„Abfälle, die unmittelbar beim Aufsuchen, Gewinnen und Aufbereiten sowie bei der damit zusammenhängenden Lagerung von Bodenschätzen in Betrieben anfallen, die der Bergaufsicht unterstehen und die nach dem Bundesberggesetz vom 13. August 1980 (BGBl. I S. 1310), das zuletzt durch Artikel 15a des Gesetzes vom 31. Juli 2009 (BGBl. I S. 2585) geändert worden ist, in der jeweils geltenden Fassung und den aufgrund des Bundesberggesetzes erlassenen Rechtsverordnungen unter Bergaufsicht entsorgt werden.“

Ähnliche Ausnahmen gelten auch für Stoffe, deren Beseitigung z.B. aufgrund der Strahlenschutzverordnung geregelt ist oder für Stoffe, sobald sie in Gewässer oder Abwasseranlagen eingeleitet oder eingebracht werden.

Sind im Rahmen der (externen) Entsorgung Einstufungen erforderlich, so gilt die Abfallverzeichnisverordnung (AVV) analog: Vergleiche hierzu auch die Abfälle unter Kapitel 1 der AVV „*Abfälle, die beim Aufsuchen, Ausbeuten und Gewinnen sowie bei der physikalischen und chemischen Behandlung von Bodenschätzen entstehen*“.

Ähnliches gilt für die Verbringung von Abfällen zur Beseitigung auf Deponien bezüglich der Deponieverordnung (DepV) zur Festlegung von Anforderungen an die Beschaffenheit, z.B. das Eluierverhalten von Abfällen; für Untertagedeponien sind hier i.A. keine Eluatgrenzen bestimmt, da eine Einlagerung ohne Witterungseinfluss zumeist in geschlossenen Fassgebinden zu erfolgen hat.

Wasserhaushaltsgesetz (WHG) bzw. Nieders. Landeswassergesetz (LWG)

Hierzu gibt es keine generelle Ausnahme aufgrund des Bergrechts.

Nach § 19 (2) und (3) entscheidet die Bergbehörde über die Erteilung der Erlaubnis, wenn im Betriebsplan die Benutzung von Gewässern vorgesehen ist, im **Einvernehmen** mit der zuständigen Wasserbehörde.

Die Mindestanforderungen für das Einleiten von Abwasser in Gewässer bestimmen sich nach der Abwasserverordnung (AbwV) für die in den dortigen Anhängen bestimmten Herkunftsbereiche. Ein spezieller Herkunftsbereich „Abwässer aus Bergbaubetrieben oder der Erdgasförderung“ existiert **nicht**. Daher sind die Anforderungen an die Direkteinleitung in ein Gewässer im Rahmen der jeweiligen Gewässerordnung in einer entsprechenden Erlaubnis zu regeln. Dabei kann auf Herkunftsbereiche mit zumindest teilweise vergleichbarer Abwasserzusammensetzung zurückgegriffen werden. Als im weitesten Sinne vergleichbar könnten gelten:

- Anhang 22 Chemische Industrie
- **Anhang 27 Behandlung von Abfällen durch CP-Anlagen sowie
Altölaufbereitung**
- Anhang 40 Metallverarbeitung
- Anhang 49 Mineralöhlhaltiges Abwasser
- Anhang 51 Oberirdische Ablagerung von Abfällen.

Anhang 27 ist für alle Abwässer aus entsprechenden CP-Anlagen, z.B. zur Aufbereitung von Lagerstättenwasser als flüssiger Abfall, anwendbar. Wegen der Mischzusammensetzung und der enthaltenen Kohlenwasserstoffe und Schwermetalle bieten sich für Grenzwertorientierungen auch die Anhänge 40 und 51 an.

Grundsätzlich sind bei der Einleitung in die Schmutzwasserkanalisation (Indirekteinleitung) die hierfür geltenden kommunalen Abwassersatzungen (hier exemplarisch *Satzung Verden*) zu beachten, die i.A. auf dem DWA-Merkblatt 115 basieren.

Es ist festzustellen, dass für den wesentlichen Parameter „Salzgehalt“, z.B. als Chlorid bestimmt, derzeit weder Grenzwerte für die Direkteinleitung noch für die Indirekteinleitung gelten und deshalb diese im Einzelfall nach den örtlichen Verhältnissen zu bestimmen sind; häufig erfolgen solche Festlegungen über die Konzentration an der Einleitestelle (z.B. 400 mg Chlorid/L) und die Begrenzung der Fracht (kg/a).

Im Zusammenhang mit Direkteinleitungen wird immer wieder der Bezug zur Trinkwasserverordnung (TrinkwV) hergestellt, die wesentliche Anhaltspunkte für tolerierbare Schadstoffgrenzwerte gegenüber Oberflächengewässern enthält. Seit 2011 lassen sich Anforderungen an den Erhalt bzw. die Verbesserung der Gewässergüte insbesondere aus der Oberflächengewässerverordnung (OGewV) ableiten. Für die Schadstoffe sind hieraus anhand von Qualitätskomponenten die Gewässer nach Gütemerkmalen kategorisierbar,

wobei den Pflanzenschutzmittelwirkstoffen, Schwermetallen und aromatischen Kohlenwasserstoffen besonderes Augenmerk gilt.

Für den Umgang mit wassergefährdenden Stoffen, die nach der Verwaltungsvorschrift (VVAwS) einzustufen sind, gelten die technischen und organisatorischen Schutzmaßnahmen der (Landes-) Verordnung zum Umgang mit wassergefährdenden Stoffen (VAwS), um den Besorgnisgrundsatz des Wasserrechts zu erfüllen. Hierzu steht in Kürze eine wesentliche gesetzliche Änderung durch eine Bundesverordnung an.

Atomgesetz (AtG) und Strahlenschutzverordnung (StrlSchV)

Die strahlenschutzrechtlichen Bestimmungen gelten uneingeschränkt auch für Bergbaubetriebe. Ihre konkrete Anwendung konzentriert sich aber für die natürlich vorkommenden radioaktiven Materialien (NORM) auf den Teil 3 der *StrlSchV*, über dessen § 97 in Verbindung mit Anlage XII überwachungsbedürftige Rückstände speziell als „Schlämme und Ablagerungen aus der Gewinnung, Verarbeitung und Aufbereitung von Erdöl und Erdgas“ definiert sind. Soweit „deren spezifische Aktivität für jedes Radionuklid der Nuklidkette U-238sec und Th-232sec unter 0,2 Becquerel durch Gramm (Bq/g) liegt“ gelten diese Rückstände nicht als solche im Sinne von Anlage XII, Teil A *StrlSchV*. Da die Überwachungsgrenzen nicht überschritten sind, ist auch eine Entlassung aus der Überwachung nicht erforderlich. Eine Abstimmung mit der zuständigen Behörde im Einzelfall ist zu empfehlen. Die Überwachungsgrenzen für eine Verwertung bzw. Beseitigung bestimmen sich nach Anlage XII, Teil B *StrlSchV*.

Für Abwässer mit NORM-Inhalten sieht die *StrlSchV* keine explizite Regelung vor. Dennoch werden im vorliegenden Gutachten für die ökologische Bewertung aus der *StrlSchV* folgende Regelungen als Erkenntnisquellen herangezogen:

- § 47 aus Teil 2 *StrlSchV* regelt den Umgang mit Abwasser mit radioaktiven Stoffen aus der „zielgerichteten Nutzung bei Tätigkeiten“ (Strahlenschutzbereiche) in Verbindung mit Anlage VII Teil D und den dort genannten maximalen Aktivitätskonzentrationen.
- § 71 Absatz 3 aus Teil 2 *StrlSchV* sieht Regelungen für Abwasser mit radioaktiven Stoffen vor, soweit diese das 60-fache der in Anlage VII Teil D Nr. 2 genannten Werte übersteigen.

- § 102 aus Teil 3 *StrlSchV* („Schutz von Mensch und Umwelt vor natürlichen Strahlenquellen bei Arbeiten“) regelt die „Überwachung sonstiger Materialien“ – mit der Konsequenz einer in der Regel analogen Betrachtung zu den Rückständen durch die zuständigen Behörden

Gefahrgutbeförderungsgesetz (GGBefG)

Das Gefahrgutbeförderungsgesetz (GGBefG) regelt die Beförderung gefährlicher Güter für alle Verkehrsträger und den damit verbundenen Verpackungen und Fahrzeugen. Von den Anwendungen dieses Gesetzes sind Beförderungen auf abgeschlossenem Gelände und im grenzüberschreitenden Verkehr mit anzuwendenden Vereinbarungen ausgeschlossen.

Konkretisiert wird das Gesetz durch die „Gefahrgutverordnung Straße, Eisenbahn, Binnenschifffahrt“ (*GGVSEB*), welche nicht für die Beförderung mit Seeschiffen gilt. Sie führt die im internationalen Bereich gültigen Vorschriften zur Beförderung gefährlicher Güter (ADR; RID, ADN) für innerstaatliche Beförderungen ein. Die Vorschriften sind damit auf alle (Gefahrgut)-TKW-Transporte im öffentlichen Bereich vollständig umzusetzen.

Chemikaliengesetz (ChemG)

Das Chemikaliengesetz (ChemG) gilt u.a. nicht für radioaktive Abfälle und in Gewässer oder Abwasseranlagen eingeleitete Abwässer. Eine generelle Beschränkung für den Bergbaubereich ist nicht erkennbar. Die insbesondere in Sonderteil A zu diesem Gutachten vorgenommenen Einstufungen nach Gefahrenmerkmalen dienen aber nicht dem Umgang oder dem Inverkehrbringen des „Lagerstättenwassers“ und seiner Aufbereitungsprodukte sondern vielmehr dem Vergleich ökotoxikologischer Kriterien.

Wie die Gefahrstoffverordnung (GefStoffV) i.A. auch nicht für private Haushalte gilt, so sind auch Betriebe, die dem Bundesberggesetz unterliegen, von der Verordnung gem. § 1(4) ausgenommen, allerdings nur soweit als dass im *BBergG* oder den Rechtsverordnungen, die aufgrund dieses Gesetzes erlassen worden sind, entsprechende Rechtsvorschriften zu den Regelungen der *GefStoffV* erlassen worden sind.

Immissionsschutzrecht (BImSchG, IED)

Das Bundesimmissionsschutzgesetz (BImSchG), einschl. der hierzu ergangenen Verordnungen (4.BImSchV, 12. BImSchV etc.), gilt unbeschadet der Konzentrationswirkung des *BBergG* und der Betriebspläne auch aufgrund einer ähnlichen Anforderungsstruktur. Dies betrifft in erster Linie die Anwendung des Standes der Technik in Bezug auf das untergesetzliche Regelwerk (z.B. *TA Luft*).

Hierbei ist zu beachten, dass der Stand der Technik über international vereinbarte Standards zur Besten Verfügbaren Technik (BVT) national gerade auch über die bevorstehende Umsetzung der Industrie Emissions Direktive (Richtlinie), (*IED, RL/2010/15/EU*) unter Ablösung der IVU-Richtlinie bestimmt wird. Obwohl laut RWE Dea AG derzeit in Niedersachsen keine Anlagen gem. IED betrieben werden, wird in diesem Zusammenhang auf den neuen Genehmigungstatbestand nach § 60 (3) Nr. 2 *WHG*: „eigenständig betriebene Abwasserbehandlungsanlagen, die Abwasser aus einer *IED*-Anlage einleiten“ hingewiesen. Dieser Sachverhalt betrifft Anlagen, in die ausschließlich Abwasser aus *IED*-Anlagen eingeleitet wird, z.B. bestimmte Industriekläranlagen.

Umweltverträglichkeitsprüfung (UVPG)

Das Gesetz über die Umweltverträglichkeitsprüfung (*UVPG*) gilt gemäß des § 3 (1a) explizit auch für „...Pläne und Programme aus den Bereichen...Industrie einschließlich Bergbau..., die in der Anlage 3 aufgeführt sind, sowie für sonstige Pläne und Programme, für die nach den §§ 14b bis 14d eine strategische Umweltprüfung (SUP) oder Vorprüfung durchzuführen ist“. Der Umgang mit dem Lagerstättenwasser ruft per se derzeit keine UVP-Pflicht hervor. Unabhängig davon ist eine Verschärfung der Maßstäbe entsprechend *UVPG* für den Umgang mit Lagerstättenwasser aufgrund der aktuell geführten Diskussion insbesondere zum Grundwasserschutz, zum Verbleib von Chemikalien und zu seismischen Ereignissen nicht auszuschließen.

2.4 Ist-Zustand / momentaner Umgang mit Lagerstättenwasser

Die Angaben entstammen im wesentlichen [U12, U54].

2.4.1 Transport (Leitungen, TKW)

Der Transport des Lagerstättenwassers kann prinzipiell über Rohrleitungen oder Tankwagen (TKW) erfolgen. Die RWE Dea AG hatte bis zum Jahre 2011 für das Erdgasfeld Völkersen ein Leitungsnetz installiert, mit dem das Lagerstättenwasser von den Gasförderplätzen aus dem Feld Völkersen zum zentralen Betriebsplatz in Völkersen transportiert wurde. Dieses Leitungsnetz wurde im Januar 2012 außer Betrieb genommen und ist inzwischen vollständig zurückgebaut worden.

Zurzeit wird das Lagerstättenwasser ausschließlich mit TKW transportiert. Das Transportaufkommen beträgt hierbei insgesamt ca. 600.000 km/Jahr [U27]. Die aufsummierten Transporte beinhalten sämtliche Fahrten, in denen LaWa transportiert wird (Last-Kilometer, Leerfahrten bleiben unberücksichtigt):

- Transport zur Versenkbohrung Wittorf Z1
- Transport zu verschiedenen externen Entsorgern
- Transport zu externen Disposalbohrungen

Der Transport erfolgt aufgrund einer möglichen Gefahr durch Reste an aufschwimmenden brennbaren Flüssigkeiten zurzeit als Gefahrgut der Klasse 3.

Bis zum Abtransport wird das Lagerstättenwasser nach einer Vorabscheidung von Hg-haltigem Schlamm im Zuge der Gastrocknung in einem sog. B9-Behälter sedimentiert und bis zur Entsorgung gelagert. Die Behälter B9 sind nach VAWS als Lagerbehälter mit einer Lagerung von WGK-3-Stoffen eingestuft, das Lagerstättenwasser selbst ist der WGK 1 zugeordnet, vgl. hierzu [U43-44] und **Gutachten Sonderteil A**.

2.4.2 Entsorgung

Bei der Entsorgung der Lagerstättenwässer werden von der RWE Dea AG prinzipiell erhöht saline (Salzgehalt: > 1g/L) und gering saline (Salzgehalt: < 1 g/L) Lagerstättenwässer unterschieden. Dies ist in erster Linie dadurch bedingt, dass zurzeit nur gering salines Wasser einer externen Aufbereitung zugeführt werden kann. Erhöht saline Wässer wurden 2013 ausschließlich in Disposalbohrungen versenkt.

Tabelle 16: Entsorgung von Lagerstättenwasser der RWE Dea AG in 2013

Entsorgung	Salinität	Anteil
Eigene Disposalbohrung, Wittorf Z1	erhöht salin	26 %
Externe Disposalbohrungen	erhöht salin und gering salin	49 %
Externe Entsorgung	gering salin	25 %

2.4.3 Versenkung

Die RWE Dea hat die Versenkung des Lagerstättenwassers in die Disposalbohrung Völkersen H1 eingestellt. Diese soll auch nicht wieder aufgenommen werden. Daneben betreibt die RWE Dea AG eine weitere Disposalbohrung (Wittorf Z1), die in den Kalkarenit (Obere Kreide) reicht. Diese Disposalbohrung wird von der RWE Dea AG langfristig nicht mehr genutzt und spielt beim zukünftigen Umgang mit dem Lagerstättenwasser keine Rolle mehr. Sie wird entsprechend innerhalb der Studie nicht als mögliche Option betrachtet.

Neben den eigenen Disposalbohrungen nutzt die RWE Dea AG zurzeit auch Bohrungen von Konsortialpartnern, um Lagerstättenwasser aus ihren Erdgasbohrungen zu versenken. Für das Jahr 2013 (Angaben der RWE Dea AG) sind die Mengen in der obigen Tabelle 16 zusammengestellt worden. Inwieweit hier auch zukünftig Kapazitäten zur Verfügung gestellt werden können, ist derzeit nicht vorhersehbar oder planbar. Die Option „Versenkung in Disposalbohrungen außerhalb des direkten Einflussbereiches der RWE Dea AG“ bleibt aus diesem Grund innerhalb der Studie unberücksichtigt. Gegebenenfalls sind bei der Bewertung dieser Option die gleichen Maßstäbe anzusetzen wie sie bei der Option 1 „Injektion des Lagerstättenwassers in die Bohrung VK-N Z3“ zugrunde gelegt werden.

2.5 Gefahreneinstufung und Ökotoxikologie

Die Gefahreneinstufung und die ökotoxikologische Bewertung des Lagerstättenwassers und dessen Aufbereitungsprodukten werden in einem separaten Gutachten dargestellt. Das Gutachten ist dieser Studie als **Sonderteil A** beigelegt.

Das Lagerstättenwasser wurde innerhalb des Sondergutachtens nach verschiedenen Rechtsvorschriften eingestuft – auch wenn diese im Einzelfall nicht unmittelbar auf den Umgang mit Lagerstättenwasser anzuwenden sind –, um hieraus Erkenntnisse für die ökologische (human- und ökotoxische) Bewertung zu gewinnen. Die Ergebnisse dieser Einstufung sind in der nachfolgenden Tabelle 17 zusammengefasst.

Tabelle 17: Einstufung des Lagerstättenwassers nach verschiedenen Rechtsvorschriften

Rechtsvorschrift	Einstufung
Chemikalienrecht (CLP)	Minimalkennzeichnung: H302 (gesundheitsschädlich bei Verschlucken), Signalwort: Achtung
Gefahrgutrecht	kein Gefahrgut
Wasserrecht	Wassergefährdungsklasse (WGK) 1, schwach wassergefährdend
Strahlenschutzverordnung	Radiologisch ggf. relevant nach Teil 3, bedingt Informationspflicht an Abwasserentsorger, sofern Summenwert Nuklide >60 nach Anlage VII, Teil D, Nr.2
Abfallrecht	Abfallschlüsselnummer (ASN) 01 04 07* (gefährliche Stoffe enthaltende Abfälle aus der physikalischen und chemischen Weiterverarbeitung von nichtmetallhaltigen Bodenschätzen) Abfallschlüsselnummer (ASN) 01 04 12 bei Unterschreiten einzelner Schadstoffgehalte möglich

Hinweis: ASN 01 04 12 möglich, wenn Ba < 10 mg/L, Pb < 1 mg/L und Hg < 0,02 mg/L (jeweils Eluatwerte)

2.6 Literaturbetrachtung und Studien zur Aufbereitung von Lagerstättenwasser

Da in eine ökologische Bewertung auch grundsätzliche Verfahrensalternativen einzubeziehen sind, ist zunächst ein Überblick über aktuelle Literatur zur Aufbereitung von Lagerstättenwasser erforderlich (vgl. Tabelle 18). Neben diesen Veröffentlichungen liegen weitere Unterlagen (Angebote, Bewertungen, Studien) der RWE Dea AG zu diesem Thema vor (Tabelle 19).

Tabelle 18: Aktuelle Literatur zur Aufbereitung von Lagerstättenwasser

L02	Tanner, D.: <i>Erstellung eines Konzeptes zur Aufbereitung von Lagerstättenwasser aus Rotliegend Lagerstätten (Diplomarbeit)</i> , Braunschweig, Dezember 2012
L03	DGMK u.a., Gock, E.; Kähler, J.; Bombka, H.-D.; Kleinitz, W.; Zettlitzer, M.; RWE Dea AG; Markurt, R.; Sewe, K.-U.; Burgstaller, C.: <i>DGMK Forschungsbericht 629-1 Machbarkeitsstudie zur Wasseraufbereitung in der Tailend-Phase der Gasförderung</i> , Hamburg, Mai 2007
L04	DGMK u.a., Gock, E.; Kähler, J.; Bombka, H.-D.; Kleinitz, W.; Zettlitzer, M.; RWE Dea AG; Markurt, R.; Sewe, K.-U.; Winter, I.: <i>DGMK Forschungsbericht 629-2 Wasseraufbereitung in der Tailendphase der Gasförderung</i> , Hamburg, August 2008
L44	Rosenwinkel, H.; Weichgrebe, D.; Olsson, O.: <i>Stand der Technik und fortschrittliche Ansätze zur Entsorgung des Flowback</i> Hannover, Mai 2012

Tabelle 19: Unterlagen der RWE Dea AG zur Aufbereitung von Lagerstättenwasser

U55	Konzeptstudie "LaWa Völkersen – Planung für primäre und sekundäre Aufbereitung" der Firma Aquaconsult, Hannover vom 05.07.2013 einschl. Kurzreport vom 26.04.2013
U03	Angebot 12-18-0057 der Fa. BAUER Water GmbH, 78665 Dunningen-Seedorf vom 25.05.2012 über eine Behandlungsanlage
U04 U05	Angebot V26/A006065 der Fa. VWS Deutschland GmbH (Veolia, Berkefeld), 04440 Zwenkau vom 23.08.2012 über eine Presswasseraufbereitung
U02	Angebot EO-WS-12-016 der Siemens AG Österreich, Wien über ein "Formation Water Treatment Concept"
U01	Dr. I. Randjelovic: "Future Production Water Treatment Facility in Völkersen Concept Study", power point presentation, RWE Dea AG June 2012

Grundsätzlich ist festzuhalten, dass die Aufbereitungsverfahren aus technischer Sicht für Abwasser und flüssige (wässrige) Abfälle gleich sind; die Unterscheidung, ob es sich beim Lagerstättenwasser um ein „Abwasser“ handelt oder um „Abfall“ ist vor allem von verwaltungsrechtlicher Bedeutung (Genehmigung/Erlaubnis, Anschluß- und Benutzungszwang, Art der Genehmigung der Aufbereitungsanlage/ 4. BImSchV etc.). Ökologisch ist seit der letzten WHG-Novelle ohnehin eine Gleichstellung erfolgt, wonach z.B. Abfälle auch als Abwasser (Kläranlage!) behandelt werden können, wenn diese Vorgehensweise ökologisch von Vorteil gegenüber der Behandlung als Abfall ist und die Umwelt entlastet.

Die Auswertung der vorgestellten Literatur führt zunächst zu der Erkenntnis, dass sowohl die spezielle Diplomarbeit [L02] als auch die DMGK-Forschungsberichte [L03, L04] die Frage der begleitenden NORM-Stoffe ausblenden. Die vorgeschlagenen Verfahren gehen deshalb nicht auf die Zielerfordernungen an die radioaktiven Bestandteile ein.

Auch das ISAH-Gutachten [L44] geht nur allgemein auf die Anreicherung von radioaktiven Begleitstoffen aus dem FlowBack oder Lagerstättenwasser insbesondere in Schlämmen biologischer Aufbereitungsstufen ein (DWA-Merkblatt M267) und verweist zum Umgang auf den WEG-Leitfaden „Arbeiten mit natürlicher Radioaktivität“ für das Arbeiten an Bohrplätzen und zur verfahrenstechnischen Lösung auf eine Übersicht der United States Environmental

Protection Agency (EPA) über Behandlungsmöglichkeiten von Abwässern mit natürlicher Radioaktivität.

Demgegenüber lag den zitierten Angeboten eine Ausschreibung [U6] zugrunde, die weitestgehend dem Spektrum der Inhaltstoffe entsprach, die auch dieser Studie zugrunde liegen.

Als Zielsetzung ist in allen Fällen von einer vollständigen Aufbereitung mit dem Ziel einer Einleitfähigkeit für die Indirekteinleitung des aufbereiteten Lagerstättenwassers auszugehen, gegebenenfalls auch die Möglichkeit einer Direkteinleitung in einen verfügbaren Vorfluter. Demgegenüber stellen die Zielvorgaben für eine Versenkung ins Rotliegende oder den Einsatz zur Flutung in aufgelassene Salzbergwerke andere Anforderungen an die Aufbereitung dar.

Um für die Einleitfähigkeit den Salzgehalt, die Schwermetalle, die organischen Schadstoffe (BTEX, KW) und die NORM-Bestandteile zu reduzieren, kommen aus dem Spektrum der mechanischen, physikalisch-chemischen, thermischen und biologischen Verfahren insbesondere folgende in Frage:

1. Mechanische Verfahren

- Sedimentation
- Leichtflüssigkeitsabscheider
- Filtration/Ultrafiltration
- Hydrozyklone

2. Physikalisch-chemische Verfahren

- Fällung / Flockung
- Adsorption
- Flotation
- (Dampf-)Strippung/Oxidation
- Ionenaustausch
- Osmose/Umkehrosmose

3. Thermische Verfahren

- Verbrennung
- Verdampfung/Kristallisation

4. Biologische Verfahren (nur in Zusammenhang mit Kläranlage)

Nachhaltiger Umgang mit Lagerstättenwasser - Studie

In den vorliegenden Verfahrensvarianten (vgl. Tabelle 19) werden die oben genannten Verfahren in unterschiedlicher Weise kombiniert:

Verfahrensvariante 1 (5-stufig):

Das Verfahrenskonzept geht zunächst von einer nicht näher beschriebenen Öl-Wasser-Trennung aus, bei der das abgetrennte Öl zur Verwertung anfällt. In der 2. Stufe erfolgt eine Filtration über Sandfilter mit Rückspülung zur Entfernung des Anteils absetzbarer Stoffe. Die Klaphase wird zur Entfernung des Eisenanteils in eine Belüftungsstufe (Oxidation) überführt, die einerseits zum Austrag von oxidiertem Eisen und andererseits zur Strippung flüchtiger Anteile führen soll. Der eisenhaltige Schlamm wird über Sandfilter abgetrennt, die Strippluft wird über A-Kohle gereinigt. Die so aufbereitete Wasserphase wird der 4. Prozessstufe, einem Aktivkohle-Adsorber zur Entfernung der Kohlenwasserstoffe zugeführt (2-stufig), um danach in der 5. und letzten Prozessstufe mittels 2-stufigem Ionenaustausch (spezifische organische Eisenverbindung) von Schwermetallen und Radionukliden befreit zu werden.

Verfahrensvariante 2 (5-stufig):

Als 1. Stufe des Prozesses ist eine 3-stufige Fällung/Flockung vorgesehen:

- 1. Belüftung*
- 2. pH-Anhebung mittels Natronlauge oder Calciumhydroxid auf pH 8*
- 3. Zusatz von Organosulfid zur Schwermetallfällung und Flockung mittels Eisenchlorid und polymerem Flockungshilfsmittel*

Als 2. Stufe schließt sich eine Sedimentation über einen Lamellen-Schräglklärer an, dessen Schlammaustrag über Dekantierung oder Kammerfilterpresse abgepresst wird (Rückführung von Kontaktschlamm in den 1. Reaktionsbehälter). In der 3. Stufe erfolgt eine Restfeststoffabtrennung über mit Reinwasser rückgespülte Mehrschichtfiltration. Schließlich erfolgt in der 4. Prozessstufe eine Füllkörper-Gegenstrom-Dampfstrippung mit Wärmerückgewinnung zur Entfernung der BTEX, wobei das flüchtige Mediengemisch kondensiert und über einen Phasentrenner geführt wird. Die wässrige Phase wird in einer 5. Stufe des Prozesses einer 2-stufigen A-Kohle-Adsorption zugeführt und anschließend erforderlichenfalls eine pH-Einstellung vorgenommen.

Verfahrensvariante 3 (4-stufig):

Das Konzept sieht trotz der hohen Salinität zunächst als 1. Stufe eine biologische Behandlung in Kombination mit einer Ultrafiltration mittels einer eigenen Verfahrensentwicklung PACT® vor.

Zur Aufkonzentrierung der Salinität auf 8 % soll als 2. Stufe eine Umkehrosmose folgen. Die darauf folgende 3. Stufe besteht aus der Verdampfung über einen Dünnschichtverdampfer, um schließlich in der 4. Stufe in einem FC-Kristallisator endbehandelt zu werden.

Um eine Verfahrensauswahl für die in der Studie untersuchten Optionen treffen zu können, wurden in einem parallel durchgeführten Projekt aus den oben genannten Verfahren bzw. Verfahrensvarianten Verfahrenskombinationen erarbeitet, vgl. o.g. Bericht „LaWa-Völkersen Konzeptstudie“ der Fa. aquaconsult, Hannover [U50, U55] und den Untersuchungsbericht der Fa. IAF – Radioökologie GmbH über „Fällungsmethoden zur Behandlung von Lagerstättenwässern“ [U56]. Diese Verfahrenskombinationen bilden die Grundlage für die hier betrachteten Aufbereitungsverfahren der jeweiligen Optionen für Behandlung und Verbleib des Lagerstättenwassers.

3 METHODIK ZUR AUSWAHL VON VERFAHRENSOPTIONEN

3.1 Grundsätze

Wie in Kapitel 5.1 und 5.2 näher beschrieben, wird zur ökologischen Bewertung der betrachteten/ausgewählten Optionen zur Aufbereitung und zum Verbleib des Lagerstättenwassers eine Kombination verschiedener Methoden unter Entwicklung eines eigenen Beurteilungssystems verwendet. Dabei ist sowohl die zeitliche Dringlichkeit aufgrund möglicher Entsorgungsengpässe bestimmend als auch das Fehlen hinreichender Daten, um eine vollständige Ökobilanz bzw. Umweltverträglichkeitsuntersuchung (UVU) für alle Varianten zu erarbeiten.

In der Konsequenz wird in der vorliegenden Studie häufig auf worst-case-Betrachtungen zurückgegriffen:

- Auswahl kombinierter Ionenpaare (Verbindungen) zur Bestimmung der maximal erwartbaren Human-/ Ökotoxizität, vgl. Sonderteil A zu diesem Gutachten,
- Betrachtung eines Lagerstättenwasser-Anfalls von ca. 130.000 m³/a, obwohl dieser Maximalwert ab 2014 bis 2030 abnimmt,
- Verzicht auf eine Differenzierung nach örtlich bestehenden Minderbelastungen des Lagerstättenwassers
- Verzicht auf ökonomische Kriterien/Einschränkungen

3.2 Betrachtungsrahmen

Grundsätzlich umfasst der Betrachtungsrahmen, der zur Beurteilung der Optionen zur Aufbereitung und zum Verbleib gewählt wird, die gesamte Prozesskette von der Bereitstellung des Lagerstättenwassers in sog. B9-Tanks unmittelbar nach der Gastrocknung über den Transport zur Aufbereitung, die Aufbereitung selbst und den Abtransport von Abfällen/Rückständen aus der Aufbereitung bis hin zur Verbringung des aufbereiteten Lagerstättenwassers zur Injektion, zum Einsatz als Flutungsmittel oder Einleitung bzw. Einbringung in einen Vorfluter oder die öffentliche Kanalisation. Auch letztere „Indirekteinleitung“ führt über eine Kläranlage wieder in einen Vorfluter, sodass der Betrachtungsrahmen hierüber zu schließen ist.

Andererseits entstehen bei der Aufbereitung überwachungsbedürftige Abfälle oder Rückstände. Eine Verwertung (stofflich, energetisch) bleibt zumeist auf die gebildeten (M)KW/BTEX-Fractionen beschränkt und wird an dieser Stelle nicht weiter bis zum Recyclat oder Brennstoffsubstitut betrachtet – dafür sind auch die Mengen zu gering.

Übrige Abfälle sind i.A. zu beseitigen, d.h. einer geordneten Deponierung zuzuführen (z.B. UTD je nach Schadstoffaufkonzentrierung). Hier endet der Betrachtungsrahmen dieser Studie.

Für die Bewertung erweist es sich als vorteilhaft, auf bestehende Einstufungskategorien spezieller Rechtsbereiche, zumal wenn sie auf ökotoxikologischen Kriterien beruhen, zurückzugreifen: CLP, WGK, Gefahrgutklasse etc..

Zielvorgaben für die Aufbereitung und den Verbleib des Lagerstättenwassers ergeben sich beispielhaft aus:

- dem Gefahrgutrecht lt. Klassifizierung für Transporte mit TKW auf öffentlichen Strassen
- der Abwasserverordnung und kommunalen Entwässerungssatzung für die Direkteinleitung bzw. die Einleitung in ein Kanalnetz (Indirekteinleitung)
- der Trinkwasserverordnung und den Geringfügigkeitsschwellenwerten der LAWA (Länderarbeitsgemeinschaft Wasser) für den Schutz des Grundwassers bzw. der Oberflächengewässerverordnung für die Beurteilung der veränderten Gewässergüte durch eine Direkteinleitung
- der Abfallverzeichnisverordnung und den Durchführungsbestimmungen zur Einstufung eines Abfalls für die Entsorgungsvorgänge aufgrund seiner Gefährlichkeitsmerkmale
- den Anlagenverordnungen (VAwS) der Länder gemäß des Wasserhaushaltsgesetzes zur Abstufung der Schutzmaßnahmen nach Wassergefährdungsklassen (Festlegung der erforderlichen technischen und organisatorischen Schutzmaßnahmen) anhand der Einstufungen nach der Bundesverwaltungsvorschrift zur Bestimmung der WGK von Gemischen
- der Strahlenschutzverordnung, insbesondere Teil 3 zum Umgang mit natürlicher Radioaktivität, Anlage XII, Teil A-C

3.3 Vor- und Nachteile einzelner Optionen, Ausschluss-Kriterien

Methodisch werden für alle Optionen (s. Kapitel 4) die wichtigsten Vorteile dargestellt und insbesondere die Ausschlusskriterien herausgearbeitet, die eine weitere Bearbeitung obsolet

machen würden und somit vorrangig bearbeitet werden, vgl. hierzu auch die Gutachten zur Felsmechanik und Bohrlochintegrität als **Sonderteile B und C** zu dieser Studie als grundlegende Voraussetzung für die Realisierung einer Injektion ins Rotliegende.

Im Bereich der Injektionsoption wird auch eine technische und ökologische Bewertung verschiedener Aufarbeitungsoptionen (Tellerseparator, Ultrafiltration, Fällung und Hydrozyklon/Walnusschalenfilter) im **Sonderteil D** zu dieser Studie vorgenommen.

3.4 Technische/rechtliche Zielvorgaben

Diese Studie basiert auf den Ausgangsüberlegungen einer Aufbereitung des Lagerstättenwassers entweder mit dem Ziel einer Injektion in tiefe Gesteinsschichten oder einer Aufbereitung zur Einleitung in ein Gewässer bzw. eine Kläranlage oder auch die Möglichkeit des Einsatzes als Flutungsmittel zur Stabilisierung stillgelegter Salzbergwerke.

Für die Injektion steht neben der untersuchten Bohrlochintegrität die Verhinderung einer Injektionsstörung durch Zulagerung oder Ablagerung von Feststoffpartikeln und eine damit einhergehende Verringerung der Permeabilität innerhalb der Lagerstätte im Rotliegenden im Vordergrund. Hier werden vor allem die abscheidbaren (M)KW und die abfiltrierbaren Stoffe als zu minimieren angesehen.

Rechtlich gesehen ist diese Lösung am ehesten mit den ohnehin bergrechtlich vorhandenen Betriebsplänen vereinbar.

Die folgende Abbildung zeigt die Ausgangsüberlegung mit einer noch nach unterschiedlich radioaktiver Belastung geclusterten Aufbereitung:

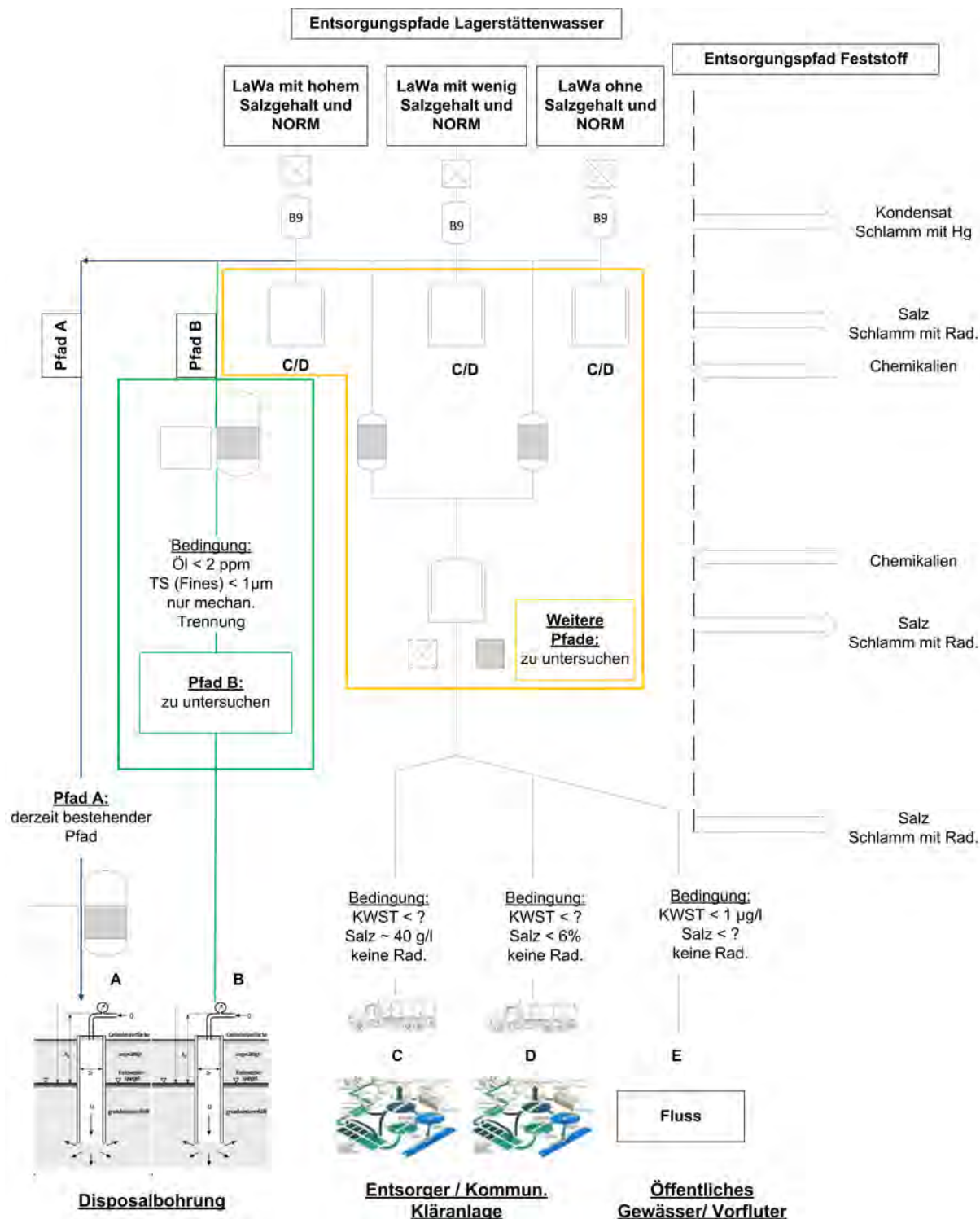


Abbildung 16: Zu untersuchende Entsorgungspfade, Prozesswerte vorläufig [U49]

Neben den technischen Überlegungen stehen im Folgenden die rechtlichen Zielvorgaben im Vordergrund:

- Die Abfalldeponierung von Aufbereitungsabfällen
- Die Anforderungen an Frachten und Konzentrationen einer Direkteinleitung (Vorfluter)
- Die Anforderungen einer Indirekteinleitung (Schmutzwasserkanal) im Rahmen und außerhalb des Rahmens kommunaler Satzungsvorgaben (individuelle Einleitervorgaben)
- Die zusätzlichen Vorgaben hinsichtlich der strahlenschutzrechtlichen Überwachung von NORM-Rückständen und -Abwässern

3.4.1 Anforderungen an die Abfalldeponierung

Bei einer Verdampfung des Lagerstättenwassers bleibt als Rückstand ein verunreinigtes Salzgemisch übrig.

Führt man die gleichen Betrachtungen, wie im **Sonderteil A** beim Lagerstättenwasser vorgenommen und beschrieben, für dieses Stoffgemisch durch, so ergeben sich für die chemikalienrechtliche Einstufung hinsichtlich der oralen Toxizität ebenfalls die Einstufung in die Kategorie 4² und für die dermale Toxizität keine Einstufung.

Gemäß den Formeln für die Gemischberechnung ergibt sich keine erforderliche Einstufung zur Kennzeichnung nach gefahrstoffrechtlichen Bestimmungen als akut wassergefährdend sowohl für Fische als auch für Krebse. Das Salzgemisch wäre auf Basis der Bewertung möglicher chemischer Verbindungen nicht als umweltgefährdend einzustufen.

Eine Einstufung des Verdampfungsrückstandes (nicht-flüchtige gelöste und ungelöste Bestandteile des Lagerstättenwassers) anhand der (hypothetischen) chemischen Verbindungen in eine Wassergefährdungsklasse gemäß dem Leitfaden VwVwS bzw. VwVwS2 ergibt Anteile von ca. 0,08 % WGK-3-Stoffen, ca. 1,4 % WGK-2-Stoffen und ca. 98,5 % WGK-1-Stoffen. Nach den Einstufungsgrenzen von 0,2 % WGK-3, 5 % WGK-2 und über 3 % WGK-1 eines Gemisches als WGK 1 ergibt sich für den Verdampfungsrückstand von Lagerstättenwasser somit eine Einstufung in die **WGK 1**. Dabei ist zu beachten, dass die WGK keine eigentliche Stoffkenngröße darstellt, sondern eine

² In der EU wurden aus dem GHS 4 der 5 Gefährdungskategorien übernommen, wobei Kat. 4 einer akuten Toxizität z.B. anhand der LD50-Werte zwischen 300 und 2.000 mg/kg Körpergewicht entspricht.

technische Kenngröße zur Abstufung von Schutzmaßnahmen beim Umgang mit wassergefährdenden Stoffen ist.

Eine Bewertung der Ablagerungsfähigkeit der Rückstände aus der Aufbereitung von Lagerstättenwasser folgt in Bezug auf eine Deponierfähigkeit nicht den ökotoxischen Kriterien der vorhandenen Verbindungen oder gar einer WGK-Einstufung, sondern der Eluierbarkeit einzelner Stoffe oder Ionen. Um eine Abschätzung der Deponierfähigkeit der Inhaltsstoffe des Lagerstättenwassers vornehmen zu können, wird die Aufbereitung durch Verdampfung des Lagerstättenwassers (s. Option 3a) gewählt, bei welchem das Lagerstättenwasser einschließlich der flüchtigen (organischen) Komponenten vollständig verdampft wird und ein Verdampfungsrückstand zurückbleibt.

Für den Verdampfungsrückstand wird anhand der vorliegenden Kationen- und Anionen-Konzentrationen der Schadstoffanteil in % und mg/kg für jeweils die Trockenmasse (TM) und einen Wassergehalt von 5 bzw. 10 % bestimmt.

Die nachfolgende Tabelle 20 gibt diese Daten wieder (geringfügige Abweichungen der Summe basieren auf der Darstellung nur der relevanten Massenanteile der Metalle).

Nachhaltiger Umgang mit Lagerstättenwasser - Studie

Tabelle 20: Zusammensetzung der Feststoffe bei verschiedenen Wassergehalten in dem Verdampfungsrückstand

	Menge/Fracht		Anteil im Feststoff in %			Anteil im Feststoff in mg/kg (ppm)		
			TM	5 % WG	10 % WG	TM	5 % WG	10 % WG
Kalium	120.000	kg/a	1,26	1,19	1,13	12.500	11.900	11.300
Natrium	1.740.000	kg/a	18,1	17,2	16,3	181.000	172.000	163.000
Calcium	1.790.000	kg/a	18,7	17,7	16,8	187.000	177.000	168.000
Magnesium	8.980	kg/a	0,094	0,089	0,084	936	890	843
Lithium	4.210	kg/a	0,044	0,042	0,039	438	416	395
Strontium	77.800	kg/a	0,811	0,770	0,730	8.110	7.700	7.300
Arsen	11,9	kg/a	0,000	0,000	0,000	1,24	1,18	1,12
Blei	1.080	kg/a	0,011	0,011	0,010	113	107	102
Cadmium	5,02	kg/a	0,000	0,000	0,000	0,523	0,497	0,470
Chrom ges.	0,16	kg/a	0,000	0,000	0,000	0,017	0,016	0,015
Kupfer	1,11	kg/a	0,000	0,000	0,000	0,116	0,110	0,104
Nickel	0,87	kg/a	0,000	0,000	0,000	0,091	0,086	0,082
Quecksilber	5,32	kg/a	0,000	0,000	0,000	0,555	0,527	0,499
Zink	178	kg/a	0,002	0,002	0,002	18,5	17,6	16,7
Barium	4.130	kg/a	0,043	0,041	0,039	431	409	388
Bor	1.780	kg/a	0,019	0,018	0,017	185	176	167
Eisen	3.590	kg/a	0,037	0,036	0,034	374	355	336
Molybdän	2,57	kg/a	0,000	0,000	0,000	0,267	0,254	0,241
Selen	0,33	kg/a	0,000	0,000	0,000	0,035	0,033	0,031
Chlorid	5.770.000	kg/a	60,1	57,1	54,1	601.000	571.000	541.000
Sulfat	24.200	kg/a	0,252	0,239	0,227	2.520	2.390	2.270

Nachhaltiger Umgang mit Lagerstättenwasser - Studie

	Menge/Fracht		Anteil im Feststoff in %			Anteil im Feststoff in mg/kg (ppm)		
			TM	5 % WG	10 % WG	TM	5 % WG	10 % WG
Nitrat	1.077	kg/a	0,011	0,011	0,010	112	107	101
Fluorid	572	kg/a	0,006	0,006	0,005	59,7	56,7	53,7
Cyanid ges.	0,6	kg/a	0,000	0,000	0,000	0,063	0,060	0,056
Iodid	1.190	kg/a	0,012	0,012	0,011	124	117	111
Brom	51.000	kg/a	0,532	0,505	0,479	5.320	5.050	4.790
Hydrogen-carbonat	6.780	kg/a	0,070	0,060	0,057	706	598	567
Silicat	1.260	kg/a	0,013	0,013	0,012	132	125	119
Gesamtmasse	9.600.000	kg/a	100	95	90	1.000.000	950.000	900.000
			%	%	%	mg/kg	mg/kg	mg/kg
Masse mit 5 % Wasseranteil	10.100.000	kg/a						
Masse mit 10 % Wasseranteil	10.700.000	kg/a						

Die Deponieverordnung *DepV* regelt für die Deponierung von Abfällen Grenzwerte, die sich zumeist auf Eluatwerte beziehen. In der folgenden Tabelle sind die Eluatwerte für die Stoffe angegeben, für die auch Konzentrationswerte im Lagerstättenwasser bzw. Verdampfungsrückstand vorliegen.

Um einen Vergleich zwischen den Gehalten im Feststoff (TM) und den erwartbaren Eluatgehalten mit den gesetzlichen Grenzwerten vorzunehmen, wird angenommen, dass unter den Bedingungen einer Eluatherstellung aus Feststoffen im Labor nach DIN EN 12457-4:2003-01 ein Flüssigkeits-/Feststoffverhältnis von 10 L/kg gewählt wird [L12].

Die nachfolgende Tabelle 21 stellt unter der Annahme dieses extremen Elutionsverhältnisses und einer vollständigen Auflösung des Verdampfungsrückstandes eine Konzentration des Feststoffes in der Lösung in mg/L dar und vergleicht diese mit den Elutionsgrenzwerten der *DepV* (worst-case-Betrachtung).

Nachhaltiger Umgang mit Lagerstättenwasser - Studie

Tabelle 21: Entsorgung von Rückständen aus der Lagerstättenwasseraufbereitung (gelb = ber. Eluatwert hält gesetzte Grenze ein)

Parameter	RWE Dea Analysen des Lagerstättenwassers			Eluatkriterien				
	Prod.bez. Mw	Feststoff TM	Berechneter Eluatwert (1:10)	DK 0	DK I	DK II	DK III	DK IV
	mg/l	mg/kg	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	
pH	5,81			5,5-13	5,5-13	5,5-13	4,0-13	
Gesamtgehalt gelöster Feststoffe				≤ 400	≤ 3.000	≤ 6.000	≤ 10.000	
DOC				≤ 50	≤ 50	≤ 80	≤ 100	
Phenole				≤ 0,1	≤ 0,2	≤ 50	≤ 100	
As	0,099	1,24	0,12	≤ 0,05	≤ 0,2	≤ 0,2	≤ 2,5	
Cd	0,042	0,523	0,052	≤ 0,004	≤ 0,05	≤ 0,1	≤ 0,5	
Cu	0,009	0,063	0,006	≤ 0,2	≤ 1,0	≤ 5,0	≤ 10	
Ni	0,007	0,091	0,009	≤ 0,04	≤ 0,2	≤ 1,0	≤ 4,0	
Zn	1,48	18,5	1,85	≤ 0,4	≤ 2,0	≤ 5,0	≤ 20	
Mo	0,021	0,268	0,027	≤ 0,05	≤ 0,3	≤ 1,0	≤ 3,0	
Sb	0,001	0,015.	0,002	≤ 0,006	≤ 0,03	≤ 0,07	≤ 0,5	
Se	0,003	0,034	0,003	≤ 0,01	≤ 0,03	≤ 0,05	≤ 0,7	
Ba	34,4	431	43,1	≤ 2	≤ 5	≤ 10	≤ 30	
Pb	9,00	113	11,3	≤ 0,05	≤ 0,2	≤ 1	≤ 5	
Cr, ges.	0,001	0,017	0,002	≤ 0,05	≤ 0,3	≤ 1	≤ 7	
Hg	0,044	0,554	0,055	≤ 0,001	≤ 0,005	≤ 0,02	≤ 0,2	
Cl	48.000	601.000	60.100	≤ 80	≤ 1.500	≤ 1.500	≤ 2.500	
SO4	201	2.520	252	≤ 100	≤ 2.000	≤ 2.000	≤ 5.000	
CN ⁻	0,005	0,063	0,006	≤ 0,01	≤ 0,1	≤ 0,5	≤ 1,0	
F ⁻	4,76	59,6	5,96	≤ 1	≤ 5,0	≤ 15,0	≤ 50,0	
Summe Kationen	31.100							
Summe Anionen	48.700							
Ges-Salinität	79.800							

Kritisch für eine (obertägige) Deponierung sind unter der oben beschriebenen Worst-case-Betrachtung damit die folgenden Parameter:

Barium Ba

Blei Pb

Chlorid Cl,

die die Grenzen der Deponieklasse III teilweise um ein Mehrfaches überschreiten und damit die Unterbringung in einer Untertagedeponie erforderlich wäre.

Für eine Untertagedeponie der „DK IV“ existieren in der DepV keine Einschränkungen hinsichtlich der Konzentration der einzulagernden Stoffe, vielmehr werden diese in den jeweiligen Deponieordnungen bestimmt. Zu beachten ist, dass in Untertagedeponien *expressis verbis* keine Abfälle mit radioaktiven Eigenschaften eingelagert werden dürfen. Bei den Untertagedeponien der Klasse IV sind das beim Betreiber K+S AG den Annahmebedingungen [L13, L14] zufolge:

„Für die Annahme in Untertage-Deponie oder -Verwertung dürfen die Abfälle z.B. nicht

- radioaktiv,*
- flüssig,*
- infektiös,*
- geruchsbelästigend oder*
- biologisch abbaubar sein*
- nicht identifizierte oder neue chemische Abfälle*
- ganze oder zerteilte Altreifen*
- biologisch abbaubare (organische) Abfälle*
- Abfälle, die zu erheblichen Geruchsbelästigungen führen*
- Abfälle, die unter Ablagerungsbedingungen (30° C) durch Reaktionen untereinander oder mit dem Gestein zu Volumenvergrößerungen, oder zu einer Bildung selbstentzündlicher, toxischer (> 10x AGW/MAK-Wert) oder explosiver Stoffe oder Gase (Gase > 10 % UEG1) oder zu anderen gefährlichen Reaktionen führen*
- Abfälle, die unter Ablagerungsbedingungen (30° C) explosionsgefährlich, hoch oder leicht entzündlich sind, einen stechenden Geruch freisetzen oder keine ausreichende Stabilität gegenüber den geomechanischen Bedingungen aufweisen*

sein“.

Eine Überprüfung der Anforderungen im Einzelfall ist unerlässlich.

3.4.2 Anforderungen an NORM-belastete Rückstände

Aus den Analysendaten der RWE Dea AG [U19-22], vgl. auch Tabelle 4, stammen folgende Aktivitäten bzw. Frachten radioaktiver Nuklide in den Lagerstättenwässern:

Tabelle 22: Produktionsbezogene Mittelwerte und Frachten je Isotop

	Produktions- gewichteter Mittelwert	Fracht	Ermittelter Maximalwert
Isotop	Bq/L	MBq/a	Bq/L
U-238	0,003	0,39	0,006
U-234	0,004	0,43	0,006
Ra-226	10,5	1.260	36,5
Pb-210	14,3	1.720	59,0
Po-210	1,25	150	4,00
Ra-228	10,8	1.290	29,7

Bezogen auf eine Gesamtfracht von ca. 9.600 Mg/a ergeben sich umgerechnet die in der folgenden Tabelle 23 angegebenen spezifischen Aktivitäten in Bq/g.

Tabelle 23: Spezifische Aktivität pro Isotop im Vergleich zum Maximalwert für Rückstände nach Anlage XII StrlSchV

	Spez. Aktivität im Verdampfungsrückstand	Anlage XII, Teil A, Schwellenwert für Definition als Rückstand nach § 97 StrlSchV, je Nuklid
Isotop	Bq/g	
U-238	4 E-05	0,2
U-234	4,5 E-05	
Ra-226	0,131	
Pb-210	0,179	
Po-210	0,016	
Ra-228	0,134	

Die Einordnung einer strahlenschutzrechtlichen Überwachungsbedürftigkeit eines Rückstandes im Sinne § 97 *StrlSchV* kann auch auf Schlämme aus der Aufbereitung von Lagerstättenwasser anhand Anlage XII Teil A *StrlSchV* bezogen werden.

In Teil 3 *StrlSchV* wird der Schutz von Mensch und Umwelt vor natürlichen Strahlungsquellen bei Arbeiten behandelt. In Kapitel 3, Schutz der Bevölkerung bei natürlich vorkommenden radioaktiven Stoffen, definiert der § 97 Überwachungsbedürftige Rückstände. In Anlage XII (Verwertung und Beseitigung überwachungsbedürftiger Rückstände), Teil A (Liste der zu berücksichtigenden Rückstände), werden Schlämme und Ablagerungen aus der Gewinnung, Verarbeitung und Aufbereitung von Erdöl und Erdgas genannt, die aus einem industriellen Prozess stammen. Keine Rückstände i.S.d. § 97 sind diese Materialien, wenn deren spezifische Aktivität für jedes Nuklid der Nuklidkette U-238 sec (hier: U-234, Ra-226, Pb-210 und Po-210) und Th-232 sec (hier: Ra-228) unter 0,2 Becquerel pro Gramm liegt. Tabelle 23 zeigt, dass diese spezifische Aktivität von keinem der genannten Isotope erreicht wird. Es handelt sich somit schon allein aus diesem Grund nicht um einen Rückstand im Sinne von § 97 *StrlSchV* oder um ein sonstiges Material nach § 102 *StrlSchV*, für das zur Einstufung einer Unbedenklichkeit wiederum die Überwachungsgrenzen der Anlage XII Teil B herangezogen werden.

In Teil B (Überwachungsgrenzen für Rückstände nach Teil A), wird die Überwachungsgrenze bei untertägiger Verwertung oder Deponierung angegeben. Für "repräsentativ ermittelte Werte $C_{U_{238} \max}$ und $C_{Th_{232} \max}$ der größten spezifischen Aktivitäten der Radionuklide der Nuklidketten U-238sec und Th-232sec in Becquerel durch Gramm (Bq/g)" gilt die nachfolgende Beziehung:

$$C_{U_{238} \max} + C_{Th_{232} \max} \leq C$$

mit der Überwachungsgrenze $C = 5 \text{ Bq/g}$ für untertägige Deponierung (Anl. XII, Teil B Nr.3).

Bis zu dieser Überwachungsgrenze können Rückstände (und sonstige Materialien) – ohne Antrag auf Entlassung aus der strahlenschutzrechtlichen Überwachung – in einer dafür zugelassenen untertägigen Deponie (nach Maßgabe der jeweiligen Deponieordnung) entsorgt werden. Für die strahlenschutzrechtliche Überwachung gelten die Kriterien nach Anlage XII Teil B. Beim Überschreiten dieser Überwachungsgrenzen kann gegebenenfalls ein Antrag aus der dann obligatorischen strahlenschutzrechtlichen Überwachung gestellt werden.

3.4.3 Anforderungen an die Direkteinleitung

Der Abschnitt 2 des Wasserhaushaltsgesetzes *WHG* (§§ 54 ff.) bestimmt Anforderungen an die Beseitigung von Abwasser, u.a. an das Einleiten in Gewässer. Nach § 57 (1) gilt:

Eine Erlaubnis für das Einleiten von Abwasser in Gewässer (Direkteinleitung) darf nur erteilt werden, wenn

1. die Menge und Schädlichkeit des Abwassers so gering gehalten wird, wie dies bei Einhaltung der jeweils in Betracht kommenden Verfahren nach dem Stand der Technik möglich ist,
2. die Einleitung mit den Anforderungen an die Gewässereigenschaften und sonstigen rechtlichen Anforderungen vereinbar ist und
3. Abwasseranlagen oder sonstige Einrichtungen errichtet und betrieben werden, die erforderlich sind, um die Einhaltung der Anforderungen nach den Nummern 1 und 2 sicherzustellen.

Mit § 55 (3) erfolgt sogar eine weitgehende Gleichstellung mit flüssigen Stoffen, die kein Abwasser sind:

Flüssige Stoffe, die kein Abwasser sind, können mit Abwasser beseitigt werden, wenn eine solche Entsorgung der Stoffe umweltverträglicher ist als eine Entsorgung als Abfall und wasserwirtschaftliche Belange nicht entgegenstehen.

Als konkretisierendes Rechtsregelwerk ist in erster Linie die Abwasserverordnung *AbwV* anzusehen, in der u.a. Anforderungen an Abwasser nach dem Stand der Technik einzelner dort genannter Herkunftsbereiche festgelegt sind. Für Lagerstättenwasser wird kein spezifischer Herkunftsbereich aufgeführt.

Die im Rahmen der Gewässerbewirtschaftung und –nutzung erteilten Erlaubnisse einer Einleitung orientieren sich neben den Anforderungen der Abwasserverordnung (*AbwV*) und den BVT-Mitteilungen in erster Linie an den konkreten Gewässerbedingungen und weiteren Nutzungen (*Oberflächengewässerverordnung OGewV*). Bemerkenswert ist, dass bestimmte Parameter wie z.B. der Salz- bzw. Chloridgehalt überhaupt nicht geregelt und vollständig der individuellen Erlaubnis überlassen sind. Dabei können andere Erlaubnisse ebenso zum Maßstab werden wie die Besorgnis eines Grundwasserschadens und die Anwendung von z.B. Grenzwerten der *TrinkwV*, Geringfügigkeitsschwellenwerte der *LAWA GFS* oder eben die *OGewV*.

Um Zielwerte einer LaWa-Aufbereitung mit dem Ergebnis der Direkteinleitung (vgl. Option 3a, Verdampfung des LaWa und Direkteinleitung des über A-Kohle gereinigten Kondensates) formulieren zu können, wird vor allem auf Festlegungen aus "vergleichbaren Herkunftsbereichen" zurückgegriffen; die Werte nach Trinkwasserverordnung lassen sich zum Vergleich gegenüberstellen. Zum Vergleich werden hier die Anhänge 40 (Metallverarbeitung) und 51 (Oberirdische Ablagerung von Abfällen) und 27 (Abwasser aus CP-Behandlung von Abfällen) herangezogen, da hier Anforderungen an gemischte Abwassereinleitungen mit verschiedenen Schadstoffen recht gut erfasst werden.

Die Tabelle 25 enthält darüberhinaus auch die Anforderungen an eine Indirekteinleitung (öffentliche Kanalisation), auf die im Folgekapitel eingegangen wird.

Häufig werden die Erlaubnisse einer Direkteinleitung mit Konzentrationsvorgaben, z.B. für die Einleitestelle und Frachtbegrenzungen, verbunden (Tabelle 24, zitiert nach [L5]).

Tabelle 24: Bestehende Erlaubnisse von Solen-Direkteinleitungen in Niedersachsen

Herkunft Sole	Haldenabwasser	Produktions- /Haldenabwasser	Haldenabwasser
Genehmigte Einleitmenge (m³/a)	56.300	800.000	200.000
2009: tatsächliche Einleitmenge (m³/a)	37.525	477.038	41.336
2009: tatsächliche Salzfracht (Mg)	9.094	56.795	-
Einleitestelle	Elbe	Leine	Innerste
Auflagen	Zuflussbegrenzung z.B. 10 m³/h abhängig v. Elbwasserdurchsatz > bzw. < 300 m³/s	4.800 m³/d 800.000 m³/a	630 m³/d 200.000 m³/a Cl⁻ < 400 mg/L unterh. Einleitstelle, C (Cl⁻) < 350 mg/L

Tabelle 25: Vergleich der Stoffgehalte [mg/L] im Lagerstättenwasser (Bezug: Mittelwerte für die einzelnen Anfallstellen) mit Vorschriften zur Einleitung [U31, U48, U58]

mg/L	Bandbreite LaWa	Anhang 40 direkt	Anhang 40 vor Verm.	Anhang 51 direkt	Anhang 51 vor Verm.	Anhang 27 vor Verm.	Ind-Einleitung DWA M115	Ind-Einleit. Stadt Verden
pH	4,5 – 6,7						6,5-10	6,5-10
Lf (mS/cm)	0,2 – 203							
Dichte g/mL	0,99 – 1,16							
Chlor, frei	< 0,03 – 1,2		0,5			0,5		
CSB	210 – 9.500	100-400		200 (95%)	< 400			
BSB5	64 – 740			20				
abf. Stoffe	< 1 – 59							
absetzb. St mL/L	< 0,1						1-10	10
lipoph. Stoffe	0,6 – 440						300	
Ammonium -N	2,3 – 9,6	20-100		N-ges.: 70				NH ₄ : 200
Ba	0,024 – 81,4		2					
Ca	3,84 – 46.400							
Fe	2,1 – 110	3						
K	0,75 – 3.150							
Li	< 0,0042 – 196							
Mg	0,04 – 212							
Na	2,43 – 42.800							
Sr	0,13 – 1.400							
Al	< 0,01 – 1,1	2-3						
As	< 0,0005 – 0,86		0,1		0,1	0,1	0,5	1
Pb	< 0,001 – 31		0,5		0,5	0,5	1	2
Cd	< 0,0003 – 0,26		0,1-0,2 (0,3 - 1,5 kg/t)		0,1	0,2	0,5	0,5
Cr ges	< 0,001 – 0,007				0,5	0,5	1	3
Cr VI	< 0,005		0,1		0,1	0,1	0,2	0,5
Hg ges.	0,015 – 0,120		0,05 (0,03 kg/t)		0,05	0,05	0,1	0,05
Cu	< 0,001 – 0,031		0,5		0,5	0,5	1	2
Ni	0,0017 – 0,031		0,5		1	0,1	1	3
Zn	0,02 – 9,2		2		2	2	5	5
Sb	< 0,001 – 0,0028						0,5	
B	2,0 – 73							

Nachhaltiger Umgang mit Lagerstättenwasser - Studie

mg/L	Bandbreite LaWa	Anhang 40 direkt	Anhang 40 vor Verm.	Anhang 51 direkt	Anhang 51 vor Verm.	Anhang 27 vor Verm.	Ind-Einleitung DWA M115	Ind-Einleit. Stadt Verden
Co	< 0,001 – 0,0094		1				2	
Mn	0,057 – 51							
Mo	< 0,001 – 0,12							
P ges	< 0,01 – 1,5	2		3			50	
Se	< 0,001 – 0,01		1					1
Si	< 0,05 – 27							
Te	< 0,001 – 0,059							
Ti	< 0,01 – 0,1							
Tl	< 0,001 – 0,25							
V	< 0,001 – 0,031							
Sn	< 0,001 – 0,022		2					5
Zr	< 0,001 – 0,02						5	
Sulfat SO ₄	0,6 – 522						600	600
Chlorid Cl	13,3 – 138.500							
Chromat	< 0,0015							
Nitrat-N	< 0,066 – 4,2							
Nitrat	0,29 – 18,6							
Nitrit-N	< 0,003	5		2				NO ₂ ⁻ : 20
Fluorid F	< 0,15 – 20	20-50					50	60
Cyanid ges.	< 0,005							20
Cyanid l. freis.	< 0,005		0,2-1		0,2	0,1	1	1
Jodid J	< 0,16 – 40							
Bromid Br	0,38 – 888							
HCO ₃								
Härte °dH	1,1 – 3,6							
dito mg/L	23 – 98							
ortho-Phosphat	< 0,1 - 0,28							
Silikat SiO ₂	< 0,11 – 58							
Sulfid l. freis.	< 0,04 – 0,06		S ²⁻ : 1		S ²⁻ : 1	1	S ²⁻ : 2	S ²⁻ : 2
Formiat	26,5 – 388							
Acetat	11,5 – 9.662							
Glykol-säure	15 – 201							
Summe Kationen	18 – 83.700							
Summe Anionen	32 – 143.000							

Nachhaltiger Umgang mit Lagerstättenwasser - Studie

mg/L	Bandbreite LaWa	Anhang 40 direkt	Anhang 40 vor Verm.	Anhang 51 direkt	Anhang 51 vor Verm.	Anhang 27 vor Verm.	Ind-Einleitung DWA M115	Ind-Einleit. Stadt Verden
Gesamt-salinität	57 – 226.000							
n-C5 – C10	< 1 – 2,2							
TOC	21,4 – 2.000						org. LM 10.000	
Phenol-Index	1,3 – 4,7						100	
AOX	< 0,2 – 0,33		1		0,5	1	1	
KW n. H53	0,034 – 93	10		10		20	20-100	20
BTEX	24,5 – 1.000					1		
davon Benzol	18 – 744							
C3-Aromaten	0,95 – 8,8							
Styrol	< 0,001 – 0,29							
Cumol	0,041 – 0,74							
PAK (= Naphthalin)	0,085 – 1,8							
LHKW	< 0,001						0,5	5
Tox. Metallhydrate	-							0,3 mL/L
G _{Ei}	-	2-6		2	2	2		
G _{D(aphni)}	-				4	4		
G _{L(euchtb)}	-				4	4		
Bq/L								
U-238	0,001 – 0,0055							§ 43 (3) 2. StrlSchV
U-234	0,001 – 0,0055							
Ra-226	0,018 – 36,5							
Pb-210	0,018 – 59							
Po-210	0,001 – 4							
Ra-228	0,017 – 29,7							
Legende:								
	LaWa-Bandbreite unterschreitet Regelungswert (Grenzwert eingehalten)							
	LaWa-Bandbreite unterschreitet/überschreitet Regelungswert (Bereich überprüfen)							
	LaWa-Bandbreite überschreitet Regelungswert							
	Regelungswert ist in den genannten Regelwerken nicht festgelegt (Festlegung ist ggf. erforderlich)							
	Regelungswert ist in den genannten Regelwerken nicht festgelegt (LaWa-Bandbreite ist abwassertechnisch unkritisch, keine Festlegung erforderlich)							

Entscheidend für die Erlaubnis der Direkteinleitung ist die Sicherstellung, dass keine nachteilige Veränderung des betreffenden Gewässers erfolgt. Hierzu kann neben den Erkenntnissen aus der *TrinkwV* auf die Oberflächengewässerverordnung *OGewV* zurückgegriffen werden, die Kriterien zur Bestimmung der Gewässergüte bestimmt. Anhand von Umweltqualitätsnormen lassen sich die Konzentrationsbereiche einzelner Schadstoffe im jeweiligen Gewässer überwachen. Sie sind mithin ein wichtiges Kriterium („Immissionswert“) zur Wirkungsabschätzung einer Direkteinleitung in Hinsicht auf die Veränderung der Gewässerqualität. Die folgende Tabelle 26 enthält einige Umweltqualitätsnormen für Stoffe, die auch Bestandteil im Lagerstättenwasser sind:

Tabelle 26: Umweltqualitätsnormen nach *OGewV*, Anlage 7 zur Beurteilung des chemischen Zustandes eines Gewässers anhand ausgewählter LaWa-Inhaltsstoffe

Stoff	Oberirdische Gewässer ohne Übergangsgewässer	Übergangsgewässer und Küstengewässer	Oberirdische Gewässer ohne Übergangsgewässer	Übergangsgewässer und Küstengewässer
Bezug Qualitätsnorm	Jahresdurchschnittswert µg/L	Jahresdurchschnittswert µg/L	Zulässige Höchstkonzentration µg/L	Zulässige Höchstkonzentration µg/L
Benzol	0,6	0,6	2	2
Cd, Cd-Verb.	< 0,8 (Klasse 1) bis 0,25 (Klasse 5)	0,2	< 0,45 (Klasse 1) bis 1,5 (Klasse 5)	< 0,45 (Klasse 1) bis 1,5 (Klasse 5)
Pb, Pb-Verb.	7,2	7,2	Nicht anwendbar	Nicht anwendbar
Hg, Hg-Verb.	0,05	0,05	0,07	0,07
Naphthalin	2,4	1,2	Nicht anwendbar	Nicht anwendbar
Ni, Ni-Verb.	20	20	Nicht anwendbar	Nicht anwendbar

3.4.4 Anforderungen an die Indirekteinleitung

Der Abschnitt 2 des Wasserhaushaltsgesetzes (§§ 54 ff.) bestimmt Anforderungen an die Beseitigung von Abwasser, u.a. an das Einleiten in die öffentliche Kanalisation (Indirekteinleitung). Nach § 58 (1) gilt:

(1) Das Einleiten von Abwasser in öffentliche Abwasseranlagen (Indirekteinleitung) bedarf der Genehmigung durch die zuständige Behörde, soweit an das Abwasser in der Abwasserverordnung in ihrer jeweils geltenden Fassung Anforderungen für den Ort des Anfalls des Abwassers oder vor seiner Vermischung festgelegt sind. Durch Rechtsverordnung nach § 23 Absatz 1 Nummer 5, 8 und 10 kann bestimmt werden,

1. unter welchen Voraussetzungen die Indirekteinleitung anstelle einer Genehmigung nach Satz 1 nur einer Anzeige bedarf,

2. dass die Einhaltung der Anforderungen nach Absatz 2 auch durch Sachverständige überwacht wird.
Weitergehende Rechtsvorschriften der Länder, die den Maßgaben des Satzes 2 entsprechen oder die über Satz 1 oder Satz 2 hinausgehende Genehmigungserfordernisse vorsehen, bleiben unberührt. Ebenfalls unberührt bleiben Rechtsvorschriften der Länder, nach denen die Genehmigung der zuständigen Behörde durch eine Genehmigung des Betreibers einer öffentlichen Abwasseranlage ersetzt wird.
- (2) Eine Genehmigung für eine Indirekteinleitung darf nur erteilt werden, wenn
 1. die nach der Abwasserverordnung in ihrer jeweils geltenden Fassung für die Einleitung maßgebenden Anforderungen einschließlich der allgemeinen Anforderungen eingehalten werden,
 2. die Erfüllung der Anforderungen an die Direkteinleitung nicht gefährdet wird und
 3. Abwasseranlagen oder sonstige Einrichtungen errichtet und betrieben werden, die erforderlich sind, um die Einhaltung der Anforderungen nach den Nummern 1 und 2 sicherzustellen.
- (3) Entsprechen vorhandene Indirekteinleitungen nicht den Anforderungen nach Absatz 2, so sind die erforderlichen Maßnahmen innerhalb angemessener Fristen durchzuführen.
- (4) § 13 Absatz 1 und § 17 gelten entsprechend. Eine Genehmigung kann auch unter dem Vorbehalt des Widerrufs erteilt werden.

Damit ist – auch unter Beachtung der Überlassungs- und Beseitigungspflicht des Abwassers – für die meisten Einleitungen in die Schmutzwasserkanalisation die kommunale Satzung zur Abwasserbeseitigung maßgeblich, wobei aufgrund örtlicher Verhältnisse der Kläranlage auch abweichende Konzentrationen/Frachten genehmigt werden können, wenn die Direkteinleitung aus der Kläranlage ihrerseits nicht gefährdet ist. So begrüßen einige Kläranlagen offenbar auch im Zulauf (die nicht explizit geregelte) Salzkonzentrationen bis zu einigen Gramm pro Liter aufgrund der Verbesserung der biologischen Abbauleistungen und des Schlammabsetzverhaltens.

Die in der vorliegenden Studie verwendete Satzung zur Abwasserbeseitigung der Stadt Verden */Satzung Verden/* basiert, wie die meisten kommunalen Satzungen, auf den Merkblättern der Deutschen Vereinigung für Wasserwirtschaft */DWA-M115-1, DWA-M115-2/*, stellt aber zu einzelnen Parametern zusätzliche Anforderungen. Das Merkblatt wendet sich an die Indirekteinleitung nicht häuslicher Abwässer:

Die Anforderungen des Arbeitsblattes ATV-A 115 vom Oktober 1994 an die Einleitung nicht häuslichen Abwassers in öffentliche Abwasseranlagen wurden unter Berücksichtigung der technischen Entwicklung der Abwasserableitung, Abwasserreinigung, Schadstoffvermeidung und Wassereinsparung sowie neuer Rechtsvorschriften aktualisiert und im Juli 2005 als Merkblatt DWA-M 115-2 „Indirekteinleitung nicht häuslichen Abwassers – Teil 2: Anforderungen“ veröffentlicht.

Mit Stand Juli 2005 wurden insbesondere alle im Anhang A.1 zusammengefassten Richtwerte überprüft. Einige Parameter, die nicht mehr relevant bzw. nicht mehr sinnvoll erschienen (direkt abscheidbare schwerflüchtige lipophile Stoffe, direkt abscheidbare Kohlenwasserstoffe, Gesamtcyanid) wurden gestrichen. Parameter, die im Zusammenhang mit der Klärschlammverbrennung von Bedeutung sein können (Mangan, Thallium, Vanadium), wurden neu in die Liste aufgenommen, jedoch ohne Nennung eines Richtwertes, da die entsprechenden Satzungsgrenzwerte anhand einer Bilanzierung im Sinne der 17. BImSchV festzulegen sind. Letzteres gilt auch für Antimon, dessen Richtwert im Übrigen beibehalten wurde. Barium, Selen und Silber werden ohne Nennung eines Richtwertes erwähnt, da diese Parameter im Allgemeinen keine Probleme in öffentlichen Abwasseranlagen bereiten. Auch hierfür sind ggf. an die örtliche Situation angepasste Grenzwerte festzulegen. Geändert bzw. modifiziert wurden die Richtwerte für schwerflüchtige lipophile Stoffe, organische halogenfreie Lösemittel und Sulfat. Neu aufgenommen wurden die Parameter „Aerobe biologische Abbaubarkeit“ und „Nitrifikationshemmung“. Um dem Satzungsgeber

mehr Möglichkeiten für eine den örtlichen Gegebenheiten angepasste Ausgestaltung der Benutzungsbedingungen für die öffentliche Abwasseranlage aufzuzeigen, werden im Anhang A.1 in der Spalte „Bemerkungen“ ausführlichere Hinweise als bisher gegeben. Ferner werden im Anhang A.2 zu jedem Parameter die anzuwendenden Untersuchungsverfahren angegeben. Der bisherige Anhang A.3 ist entgegen dem Gelbdruck nicht mehr Bestandteil des Merkblattes. Hingewiesen sei auf die BVT-Merkblätter der Europäischen Union. Eine Überprüfung des Merkblattes im Rahmen der Aktualitätsprüfung des DWA-Regelwerkes ergab die Notwendigkeit der Anpassung und Aktualisierung des Merkblattes hinsichtlich der Gültigkeit der zitierten technischen Regeln; die Inhalte entsprechen aber im Grundsatz der Version aus dem Jahr 2005.

Einleitungen in private Abwasserbehandlungsanlagen Dritter zur Behandlung gewerblichen Abwassers sind nach § 59 WHG den öffentlichen Abwasserbehandlungsanlagen in der Genehmigungspflicht gleichgestellt, können aber bei entsprechenden Vertragsverpflichtungen von der Genehmigungspflicht befreit werden.

Maßgeblich in allen Fällen ist die Einhaltung der Ablaufwerte in den Vorfluter, vgl. auch Anhang 1 AbwV.

Auf die landesrechtlichen Regelungen in Form von Indirekteinleiterverordnungen wird hingewiesen, die aber insofern keine materiellen Änderungen hinsichtlich des Standes der Technik enthalten, sondern die landesrechtliche Bezugnahme auf die Anforderungen der Abwasserverordnung herstellen.

In Tabelle 27 sind die Anforderungen nach DWA M115 sowie nach der Entwässerungssatzung der Stadt Verden aufgeführt. Nimmt man Letztere zum Maßstab, so müssen, gemessen an der Bandbreite der geregelten und analysierten Parameter, folgende Reduktionsfaktoren („Verdünnungen“) durch geeignete Vorbehandlungsverfahren erreicht werden, um eine auf Basis der Entwässerungssatzung genehmigungsfähige Einleitung zu erhalten. Dabei darf „Verdünnung“ nicht als Prinzip der Schadstoffverdünnung missverstanden werden, sondern versteht sich als der Reduktionsfaktor des Schadstoffes durch die Vorbehandlung.

Tabelle 27: Notwendige Reduktion einzelner Schadstoffe zur Indirekteinleitfähigkeit, alle Angaben in mg/L, Ausnahme: pH-Wert und absetzbare Stoffe (Bezug: Einzelanalysen)

mg/L	Bandbreite LaWa	Durchschnitt LaWa (PGM aus Tab. 4)	Ind-Einleitung Stadt Verden	Notwendiger Reduktionsfaktor bezogen auf	
				Bandbreite	PGM
pH	4,5 – 7,8	5,8	6,5-10	Entf./Neutralisation	
absetzb. St. mL/L	< 0,10	0,10	10	erfüllt	erfüllt
Ammonium-N	2,3 – 9,6	5,4	NH ₄ : 200	erfüllt	erfüllt
As	< 0,0005 – 0,86	0,099	1	erfüllt	erfüllt
Pb	< 0,001 – 31	9,0	2	1 bis 15	4,5
Cd	< 0,0003 – 0,26	0,04	0,5	erfüllt	erfüllt
Cr ges	< 0,001 – 0,018	0,001	3	erfüllt	erfüllt
Cr VI	< 0,005	0,005	0,5	erfüllt	erfüllt
Hg ges.	< 0,015 – 0,330	0,044	0,05	1 bis 6,6	erfüllt
Cu	< 0,001 – 0,031	0,009	2	erfüllt	erfüllt
Ni	0,0017 – 0,031	0,007	3	erfüllt	erfüllt
Zn	0,02 – 9,2	1,48	5	1 bis 1,8	erfüllt
Se	< 0,001 – 0,01	0,003	1	erfüllt	erfüllt
Sn	< 0,001 – 0,022	0,01	5	erfüllt	erfüllt
Sulfat SO₄	< 0,5 – 1647	201	600	1 bis 2,7	erfüllt
Chlorid Cl	1,4 – 138.500	48.000	1000 ³	1 bis 139	48
Nitrit-N	<0,003	0,003	NO ₂ ⁻ 20	erfüllt	erfüllt
Fluorid F	< 0,15 – 20	4,76	60	erfüllt	erfüllt
Cyanid ges.	< 0,005	0,005	20	erfüllt	erfüllt
Cyanid I. freis.	< 0,005	0,005	1	erfüllt	erfüllt
Sulfid I. freis.	< 0,04 – 0,064	0,04	S ²⁻ : 2	erfüllt	erfüllt
KW n. H53 (MKW)	1,1 – 151	8,52	20	1 bis 7,5	erfüllt
LHKW	0,012 - 0,024	< 0,02	5	erfüllt	erfüllt
Tox. Metallhydroxide	n.b.		0,3 mL/L		

Die Tabelle 27 lässt erkennen, dass für die Einleitung in die Kläranlage der Stadt Verden die meisten geregelten Parameter im Lagerstättenwasser bereits einleitfähig wären bzw. nur

³ angenommener, nicht festgelegter Konzentrationswert

wenige Parameter in den Lagerstättenwassern solcher Anfallstellen zu reduzieren wären, die in diesen Parametern entsprechend erhöhte Konzentrationen aufweisen. Die Vorbehandlung des Lagerstättenwassers kann sich bei der Betrachtung des produktionsgewichteten Mittelwertes des Lagerstättenwassers (vgl. Tabelle 4) im Falle einer Indirekteinleitung also nur auf folgenden Parameter konzentrieren:

- Blei

Bei der Betrachtung des Lagerstättenwassers aus einzelnen Anfallstellen (vgl. Bandbreite in Tabelle 27) sind darüberhinaus folgende Parameter zu beachten:

- Quecksilber
- Zink
- Sulfat
- Abscheidbare KW nach H53

Ferner muss davon ausgegangen werden, dass das Lagerstättenwasser aufgrund allgemeiner Anforderungen ("keine giftigen, übelriechenden ... Stoffe, die eine weitere Behandlung beeinträchtigen") die Einleitfähigkeit aufgrund folgender Parameter nicht oder nur nach Abstimmung im Einzelfall erfüllen kann:

- BTEX
- Chlorid/Salzgehalt
- NORM (s. nächstes Kapitel)

3.4.5 Anforderungen an NORM-belastetes Abwasser

Entscheidend für die Erlaubnis einer Direkteinleitung ist auch hier die Sicherstellung, dass keine nachteilige Veränderung des betreffenden Gewässers erfolgt. Dieser (wasser-)rechtliche Besorgnisgrundsatz ist ein strenger Maßstab, der beispielsweise eine Schadstoffeinleitung in das Grundwasser nahezu ausschließt (§ 48 WHG). Das Gutachten Gellermann [U25] schlussfolgert, dass für eine Direkteinleitung natürlicher radioaktiver Stoffe (NORM) in das Grundwasser die Maßstäbe der Trinkwasserverordnung herangezogen werden können. Wie in Sonderteil A zu diesem Gutachten erläutert, müssen bei der Übertragung dieses Maßstabes auf eine Direkteinleitung demnach die sogenannten Summenwerte der Quotienten aller Nuklidkonzentrationen bezogen auf die Referenzwerte

$C_i/C_{i,Ref}$ nach *TrinkwV* mengenunabhängig den Trinkwassergrenzwert einhalten, also < 1 sein. Dies wird vom Lagerstättenwasser in der produktionsgewichteten mittleren Zusammensetzung bei weitem nicht erreicht, ist aber bei dem aus Verdampfung entstehenden Kondensat erwartbar.

Für Abwasser mit erhöhten Konzentrationen natürlich vorkommender Radionuklide, das in die Kanalisation eingeleitet werden soll (Indirekteinleitung), geben die Werte der Anlage VII Teil D *StrlSchV* eine Orientierung. Dabei ist darauf hinzuweisen, dass die zugehörige Begrenzung von Ableitungen nach § 47 *StrlSchV* hier rechtlich nicht anzuwenden ist. Gegebenenfalls heranziehbar ist auch § 71 Abs. 3 *StrlSchV*, dem (implizit) ein Dosisrichtwert von 1 mSv zugrunde liegt. Hieraus resultiert beispielsweise eine Mitteilungspflicht für den Inhaber einer Abwasseranlage soweit das 60-fache der in Anlage VII Teil D Nr. 2 *StrlSchV* genannten maximalen Aktivitätskonzentrationen und Frachten überschritten werden.

Für die ökologische Bewertung bei der Indirekteinleitung von NORM-haltigem Abwasser wird in diesem Gutachten eine Frachtbetrachtung zugrunde gelegt, die sich an Anlage VII Teil D Nr. 2 *StrlSchV* orientiert und eine Gesamtbewertung von Abwassereinleitungen im Sinne § 47 (5) *StrlSchV* ermöglicht.

3.4.6 Maßstäbe für Langfristigkeit / Nachhaltigkeit

Der Begriff der Nachhaltigkeit wurde im Sinne eines langfristig angelegten verantwortungsbewußten Umgangs mit einer Ressource erstmals von Hans von Carlowitz 1713 in seinem forstwissenschaftlichen Werk „*Silvicultura oeconomica*“ nachgewiesen, in welchem er fragte *“wie eine sothane Conservation und Anbau des Holtzes anzustellen / daß es eine continuirliche beständige und **nachhaltige** Nutzung gebe / weil es eine unentbehrliche Sache ist / ohne welche das Land in seinem Esse nicht bleiben mag”* [zitiert nach wikipedia].

Wenngleich der Begriff der Nachhaltigkeit seit etwa dem Jahr 2000 und einer verstärkten Verwendung in der Politik zunehmend zu einem “Modewort” geworden ist, so sind Kriterien einer langfristigen Wirkungsbetrachtung doch von ökologisch hoher Relevanz.

In der vorliegenden Studie sollen unter diesem Begriff neben der Ressourcenrelevanz der betrachteten Optionen (Verbrauch von Energie, Flächen und Hilfsstoffen/Betriebsmitteln) insbesondere Anforderungen an den Verbleib des (aufbereiteten) Lagerstättenwassers und der aus der Aufbereitung resultierenden Abfälle und deren Umweltauswirkungen verstanden werden. Ausgehend von der naturwissenschaftlichen Tatsache, dass die vorhandenen Schadstoffe nicht "verschwinden" können, stellt sich bei allen Optionen die Frage, wie die "Verfügbarkeit" des Schadstoffes gegenüber dem Ökosystem möglichst reduziert werden kann, wobei das wasserrechtliche Verbot einer "nachteiligen Veränderung" zum Maßstab wird. Damit soll langfristig einer nachteiligen Veränderung der Umwelt entgegen gewirkt werden. Lässt man die "Nulloption" in einer technisch geprägten Gesellschaft außer Acht (keine Erdgasförderung), so sind die Folgen dieses Handelns (hier: Umgang mit dem zwangsläufig anfallenden Lagerstättenwasser) vor dem Hintergrund geringstmöglicher ökologischer Folgewirkungen zu bewerten. Zu den Wertmaßstäben vergleiche auch den *IEMAS-Leitfaden*.

Spricht man in diesem Zusammenhang in dieser Studie von "Schadstoffreduzierung" so ist damit i.A. das Überführen in eine andere Erscheinungsform oder eine Umwandlung in eine toxisch weniger relevante Schadstoffform gemeint. Am Beispiel der (Schwer)metalle ist die Reduzierung und Umwandlung anhand einer Fällung beschreibbar: Das zumeist in ionischer Form in Lösung (Abwasser) vorliegende toxische Schwermetall wird in eine schwerlösliche Verbindung (Fällungsprodukt) überführt und abgetrennt (Abfall). Eine Nachhaltigkeit ist aber erst dann gegeben, wenn zum einen für die Abtrennung nicht mehr Schadstoffe eingesetzt oder erzeugt werden mussten, als beseitigt wurden, und zum anderen eine Verringerung der (Bio-)verfügbarkeit z.B. durch langfristige Sicherung des Abfalls (Deponie) gewährleistet wird.

Die Bioverfügbarkeit ist dabei ganzheitlich für das Ökosystem zu betrachten, da ansonsten auch die Verdünnung eine probate Lösung wäre. Aufgrund von Eigenschaften des Schadstoffes wie Mobilität, Abbaubarkeit/Persistenz, Akkumulierbarkeit kann die Verteilung als ein weiteres Indiz der Nachhaltigkeit angesehen werden. In dieser Studie wird unter dem Begriff "Verteilung" eine Aufteilung auf verschiedene Umweltkompartimente oder Erscheinungsformen des Schadstoffes verstanden.

Die Ersteller dieser Studie legen Wert auf die Feststellung, dass mit den folgenden Kriterien kein Anspruch auf einen vollständigen "Nachhaltigkeitskatalog" erhoben wird, vielmehr wird

Nachhaltiger Umgang mit Lagerstättenwasser - Studie

ein Bewertungsraster verwendet, dass beim Vergleich der vorliegenden Optionen eine Relativbewertung der langfristigen Umweltkriterien ermöglichen soll:

- Gibt es eine (nachteilige) Veränderung (stoffliche Zusammensetzung, Folgeschäden wie Aufsalzung etc.) der Verbleiborte durch das aufbereitete Lagerstättenwasser und/oder durch die bei der Aufbereitung anfallenden Abfälle?
- Ist die (langfristige) Stabilität der Verbleiborte gewährleistet (Kontrollierbarkeit, statische Beeinträchtigung)?
- Ist die ausreichende Kapazität der Verbleiborte gesichert oder kann diese ohne ökologisch relevante Belastung geschaffen werden?

Da die erzeugten Abfälle kein zukünftiges Ressourcenpotential (Wertstoffe, urban mining) erwarten lassen, wurde auf das Nachhaltigkeitskriterium der späteren Rückholbarkeit der Abfälle zur zukünftigen Aufbereitung verzichtet.

Zu den übrigen Kriterien (Ressourcenverbrauch, Emissionen und Schadstofffreisetzung, Schadstoffverbleib und –verteilung, Grundwasserschutz) wird auf Kapitel 5 verwiesen.

4 AUSWAHL UND BESCHREIBUNG DER BETRACHTETEN OPTIONEN

Zur Betrachtung technischer Alternativen zur Behandlung und zum Verbleib von Lagerstättenwasser bieten sich folgende Konzepte an:

- Die Injektion in tiefen Gesteinsschichten mit Vorbehandlung zur Sicherstellung der technischen Anforderungen an die Injektion, einschl. Entsorgung der Abfälle aus der Vorbehandlung,
- Die Aufbereitung mit Chemisch-Physikalischen (CP)-Verfahren der Behandlung von Abwasser oder flüssigen Abfällen, mit dem Ziel eines direkt (Vorfluter) oder indirekt (kommunale oder industrielle Kläranlage) einleitbaren Abwassers und der Entsorgung der entstehenden Aufbereitungsabfälle,
- Die Verwertung durch Flutung des salzhaltigen Lagerstättenwassers in einem stillgelegten Salzbergwerk zur Bergwerksstabilisierung,
- Verfahren wie die Entsorgung des Lagerstättenwassers als Abwasser oder als flüssiger Abfall **durch Dritte** führen ökologisch gesehen wieder zu einem CP-Verfahren und werden deshalb dort mit betrachtet; dies gilt auch für Varianten, an denen diese Behandlung nicht zentral, sondern dezentral oder regional aufgeteilt erfolgt.

Unter Heranziehung der oben genannten Kriterien werden folgende Optionen betrachtet:

- Injektion in das Rotliegende (Option 1)
- Verwertung in einem stillgelegten Salzbergwerk (Option 2)
- Obertägige Aufbereitung und nachfolgende Indirekt-/Direkteinleitung mit den Varianten einer Verdampfung des Lagerstättenwassers (Option 3a) oder einer mehrstufigen CP-Behandlung (Option 3b)

Folgende Optionen werden nicht betrachtet:

- Injektion in den Kalkarenit, da RWE Dea Alternativen zur bisherigen Praxis sucht
- Einleitung in die Nordsee über eine Rohrleitung („Pipeline“), da hier eine Umsetzbarkeit nicht absehbar ist

Die Angaben zu den dargestellten Aufbereitungsverfahren entstammen den vorgelegten Fließplänen und Masse-/Energiebilanzen [U52, U55, U56, U59], die zum Teil noch auf den Analysensets aus 2012 bzw. Anfang 2013 basieren und somit noch nicht dem Parameterumfang der GBA-Analysen aus Mai 2013 umfassen. Sie können deshalb aufgrund der unterschiedlichen Konzentrationsvorgaben von den sonst verwendeten produktionsgewichteten Mittelwerten abweichen [U26, U28-29, U31]. Die vorgelegten Daten gehen in die eigenen Berechnungen ein und werden ggf. durch fundierte Schätzungen ergänzt, soweit keine nachvollziehbaren Daten überliefert worden sind.

Für alle Optionen werden folgende Betrachtungen vorgenommen:

1. Vorteile der Option
2. Voraussetzungen, Ausschlusskriterien
3. Rechtsvorgaben
4. Transport
5. Aufbereitung (Verfahrenstechnik)
 - a. Verfahrensbeschreibung
 - b. Verfahrensschema (Fließbild)
 - c. Verbleib der Schadstoffe
 - d. Einsatzstoffe
 - e. Energiebedarf
 - f. Jährliche Abfallmenge
6. Verbleib
7. Optimierungsmöglichkeiten/offene Fragen

4.1 Option 1: Injektion

Bei dieser Option wird das Lagerstättenwasser über eine Bohrung in den verwässerten Bereich einer Erdgaslagerstätte im Feld Völkersen injiziert. Als Bohrung ist hierfür die Völkersen-Nord Z3 vorgesehen, für die diese Option der Injektion konkret geprüft wird. Die

entwickelten Prüfkriterien können aber prinzipiell auch auf andere Bohrungen angewendet werden.

Für die Injektion des Lagerstättenwassers über die bereits vorhandene Bohrung Völkersen-Nord Z3 muss diese um ca. 500 m erweitert werden, um den Injektionshorizont, der in der Bohrung Völkersen-Nord Z3 unterhalb einer Tiefe von ca. 5000 m angetroffen wird, zu erreichen.

Zusätzlich müssen für das zu injizierende Lagerstättenwasser aus technischen Gründen folgende Bedingungen erfüllt sein [U49-50]

- Kohlenwasserstoffgehalt < 2 mg/l
- Abfiltrierbare Stoffe: < 5 mg/l
- Korngrößen: < 2 µm

Um diese Bedingungen zu erreichen, muss das Lagerstättenwasser aufbereitet werden. Als Standort für eine zentrale Aufbereitung ist in diesem Fall der Sondenplatz Völkersen-Nord Z3 vorgesehen. Für diese Aufbereitung wurden verschiedene technische Konzepte entwickelt und verglichen, die die Machbarkeit der Aufbereitung belegen. Diese werden in einer separaten Stellungnahme (Sondergutachten als Anhang D) bezüglich ihrer ökologischen Auswirkungen bewertet.

4.1.1 Vorteile der Option 1

Die Vorteile dieser Option sind im Folgenden aufgeführt. Diese Aufzählung dient zunächst nur zur ersten Einschätzung der Option. Grundlage für die Bewertung der Optionen sind die vergleichenden Darstellungen in Kapitel 5.

Vorteile (tw. als Ergebnis gesonderter Überprüfung):

- Verbleib des Lagerstättenwassers in > 5000 m Tiefe, außerhalb nutzbarer Grundwasservorkommen
- Rückführung der Schadstoffe zur Quelle, keine nachteilige Veränderung des Zielortes
- Geringes Abfallaufkommen
- Geringes Aufkommen von Schadstofftransporten (Abfälle)
- Starke Begrenzung der räumlichen Schadstoffverteilung

4.1.2 Voraussetzungen, Ausschluss-Kriterien

Folgende Voraussetzungen müssen für diese Option gegeben sein:

- a) Die Lagerstätte muss bezüglich ihrer Kapazität und Permeabilität geeignet sein.
- b) Es dürfen keine negativen felsmechanischen Auswirkungen mit der Injektion verbunden sein.
- c) Es muss sichergestellt sein, dass der Bereich, in den injiziert werden soll, frei von Störungszonen ist, um einen sicheren Verbleib des Lagerstättenwassers zu gewährleisten.
- d) Die Bohrung Völkersen-Nord Z3 muss integer sein.

Die unter a) bis c) genannten Voraussetzungen werden in einem separaten Gutachten untersucht und bewertet. Dieses Gutachten ist Bestandteil der vorliegenden Studie (**Sonderteil B**). Nach dieser Untersuchung erfüllt der Havelsandstein im Rotliegenden die oben genannten Voraussetzungen.

Die unter d) genannte Voraussetzung wird in einem separaten Gutachten untersucht und bewertet. Auch dieses Gutachten ist Bestandteil der vorliegenden Studie (**Sonderteil C**). Nach dieser Untersuchung ist die Bohrung Völkersen-Nord Z3 integer.

4.1.3 Rechtsvorgaben

Für den Abtransport des Lagerstättenwassers von den Anfallstellen sind die gefahrgutrechtlichen Bestimmungen des Straßentransportes (GGVSEB) zu beachten; nach dem **Sonderteil A** zu dieser Studie ergibt sich anhand der produktionsgewichteten Konzentrationsmittelwerte eine Einstufung, die keinen Gefahrguttransport erforderlich macht.

Für die Aufbereitung und die Injektion in tiefe Gesteinsschichten, d.h. an Orte, von denen das Lagerstättenwasser (Formationswasser) und das Erdgas herkommen, gelten grundsätzlich die Vorgaben des Bergrechts (*BBergG, BVOT*) im Rahmen eines genehmigten Betriebsplanes. Aufgrund des oberirdischen Betriebes von Anlagen zum Umgang mit wassergefährdenden Stoffen (z.B. Sammelbehälter) und des Durchteufens von Grundwasser führenden Schichten bei der Injektion werden insbesondere auch wasserrechtliche Belange

berührt (*WHG/NWG, VAWS*). Die rechtlichen Anforderungen werden im Rahmen von Betriebsplänen auf Grundlage insbesondere des Bergrechts und des Wasserrechts im Detail festgelegt, einschl. der Schutzbestimmungen in Wasserschutzgebieten.

Im Rahmen des *BImSchG* und des UVP-Gesetzes (*UVP-G*) sind insbesondere die *UVP-V Bergbau* und deren Vorgaben und Festlegungen zu beachten.

Bei der Entsorgung der Abfälle, die bei der Aufbereitung des Lagerstättenwassers zur Injektion anfallen, ist hier davon auszugehen, dass diese als bergbauliche Abfälle bzw. Rückstände anzusehen sind; in jedem Fall sind bei einer Entsorgung auf einer Deponie die gefahrgutrechtlichen Bestimmungen für den Transport sowie die Vorgaben der *DepV* und der *StrlSchV*, Anlage XII, zu beachten.

4.1.4 Transport

Der Transport des Lagerstättenwassers von den einzelnen Anfallstellen zur Injektionsbohrung soll weitestgehend mit TKW erfolgen. Ein teilweiser Transport über Leitungen ist möglich. Bei knapp 4.900 Fahrten pro Jahr werden ca. 78.000 km einfache Fahrtstrecke zurückgelegt.

Die Abfalltransporte sind nahezu vernachlässigbar (< 100 Mg/a).

4.1.5 Aufbereitung

Hinsichtlich der Versenkbarkeit ins Rotliegende werden insbesondere technische Vorgaben an die Beschaffenheit des Lagerstättenwassers formuliert. Da nur wenige Erfahrungswerte an die Permeabilität und Verschlusneigung der Gesteinskapillaren vorliegen, werden aus technischer Sicht von der RWE Dea AG folgende Zielwerte vorgegeben:

1. Abscheidbare Kohlenwasserstoffe max. 2 ppm (mg/L)
2. Abfiltrierbare Stoffe max. 5 mg/L bei einer Korngrößenobergrenze von 2 µm
3. Zur Zeit keine Vorgaben für bestimmte Schwermetalle wie Blei oder Zink, die bei den Injektionsbedingungen zu Ablagerungen führen könnten

Um die Zielwerte für direkt abscheidbare Kohlenwasserstoffe (angenommener Zulaufwert 10 mg/L) und die Begrenzung der Korngröße und Konzentration abfiltrierbarer Stoffe

(angenommener Zulaufwert 100 mg/L) zu erreichen, bieten sich laut einer Studie der Fa. Aquaconsult [U49-50, U55] verschiedene Verfahrenstechniken an, vgl. hierzu die Auswahl und Bewertung in **Sonderteil D** dieser Studie. Die abscheidbaren KW schließen auch geringe Anteile an BTEX ein, die in der (M)KW-Phase gelöst sind.

Die Wasserlöslichkeit bei 25 °C liegt für Toluol bei 0,53 g/L, für Benzol bei 1,77 g/L [L6] und damit jeweils oberhalb der durchschnittlichen BTEX-Anteile im Lagerstättenwasser, so dass diese ohne Berücksichtigung des Salzgehaltes und der Wechselwirkung mit anderen Stoffen weitgehend gelöst vorliegen dürften.

Die vorgelegten technischen Konzepte zur Lagerstättenwasservorbehandlung für die Versenkung werden in einem separaten Gutachten einer ökologischen Bewertung unterzogen (**Sonderteil D**).

Sowohl die technisch-ökonomische Bewertung durch die Fa. Aquaconsult als auch die ökologische Bewertung (**Sonderteil D**) kommen zum Ergebnis, dass drei der betrachteten Verfahren (Ultrafiltration, Tellerseparator und Hydrozyklon/Walnusschalenfilter) ein sehr ähnliches Ergebnis erzielen und somit zunächst als annähernd gleichwertig betrachtet werden können. Nur die Flotation fällt bei beiden Bewertungen deutlich ab. Bei der folgenden Darstellung wird die Option 1 anhand des Aufbereitungsverfahrens mittels **Tellerseparator** betrachtet, da der Tellerseparator sowohl bei der technisch-ökonomischen als auch bei der ökologischen Bewertung innerhalb der drei bevorzugten Optionen eine mittlere Bewertung erhalten hat. Der Tellerseparator führt ohne Flockungsmiteinsatz unmittelbar zu einer 3-Phasentrennung: fest, flüssig-wässrig und flüssig-organisch.

Verfahrensbeschreibung

Die Verfahrensauswahl wird maßgeblich bestimmt

- vom Dichteunterschied fest/flüssig (Wasser),
- vom Dichteunterschied Leichtflüssigkeit/Wasser,
- von der Löslichkeit der Leichtflüssigkeit und des Feststoffes,
- von der Grenzkorngröße des Feststoffes.

Fest-Flüssig und Flüssig-Flüssig-Trennungen zählen zu den Grundoperationen der Aufbereitung von Abwasser oder flüssigen Abfällen.

Kriterien für die Verfahrensauswahl und ökologische Bewertung sind ausführlich in **Sonderteil D** erläutert. Der beispielhaft ausgewählte Tellerseparator führt zu folgendem Verfahrensablauf:

Das Lagerstättenwasser wird je nach Salzgehalt in einen 240 m³ Pufferspeicher für hoch oder leicht salines Wasser gepumpt, in dem eine erste Sedimentation stattfindet. Aus dem Pufferspeicher werden Sediment und Leichtflüssigkeiten entnommen und in separaten Tanks gespeichert. Das Lagerstättenwasser aus beiden Behältern gelangt über einen weiteren Separationsbehälter (240 m³) zur Einstellung einer konstanten Konzentration an Schadstoffen zu einem 0,5 mm Schutzfilter und danach in den 3-Phasen-Tellerseparator. Durch Zentrifugalkraft und unterschiedliche Dichten zwischen Feststoff und Flüssigphase wird eine Trennung herbeigeführt, wobei neben fester und wässriger Phase auch Kohlenwasserstoffe abgeschieden werden. Die feste Phase, 260 m³/a mit TS-Konzentration 50 – 100 g/l, wird zusammen mit dem Sediment aus dem Pufferspeicher in einem 6 m³ Tankbehälter gelagert und einer Kammerfilterpresse zugeführt. Die hier anfallenden 230 m³ Flüssigphase mit einem TS-Gehalt von ca. 5 g/l werden wieder dem Pufferspeicher für hochsalines LaWa zugeführt und der Feststoff wird extern entsorgt. Die wässrige Phase aus dem Tellerseparator mit einer Feststoffkonzentration kleiner 1 mg/l, einem Kohlenwasserstoffgehalt kleiner 2 mg/l und einer Korngröße kleiner 2 µm, wird in einen Speicher als Pumpvorlage zur Injektion gepumpt. Die Reinigung des Tellerseparators erfolgt neben Spülungen mit Prozesswasser wöchentlich durch eine Spülung mit Natronlauge.

Verfahrensschema

Auf der folgenden Seite ist das Verfahren zur Aufbereitung des Lagerstättenwassers am Beispiel des Einsatzes eines Tellerseparators in einer Skizze schematisch dargestellt.

Die Verfahrensabläufe unterscheiden sich nicht, obwohl die Pufferbehälter am Zulauf der Behandlung eine Unterscheidung für „leicht“ und „hoch“ salines Lagerstättenwasser vorsehen.

Konzept 1- Teller-Separator

➤ Grundfließbild

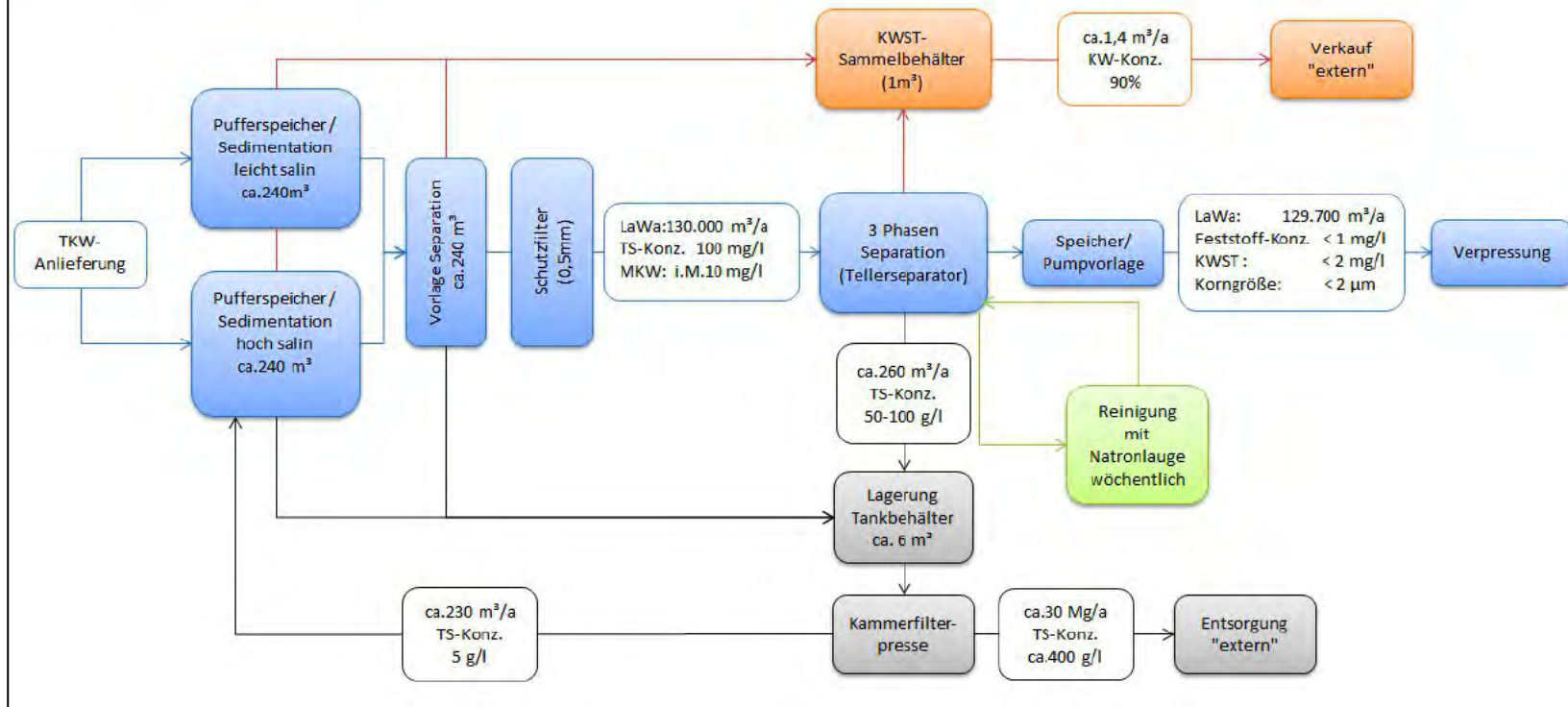


Abbildung 17: Aufbereitungskonzept für die Aufbereitung des Lagerstättenwassers zur Injektion, Teller-Separator [U55]

Verbleib der Schadstoffe

Im zu injizierenden Lagerstättenwasser (129.700 m³/a) sollen weniger als 2 ppm Kohlenwasserstoffe und unter 1 mg/l Feststoffe mit einer Korngröße unter 2 µm enthalten sein. Das Lagerstättenwasser enthält weiterhin noch die ursprünglichen Schwermetalle, BTEX, Salze und radioaktiven Isotope. Ein geringer Teil der adsorptiv gebundenen Schwermetalle bleibt im Schlamm enthalten, der extern entsorgt werden muss. Durch die regelmäßige Reinigung des Tellerseparators fallen jährlich 50 m³ verunreinigte Natronlauge an. Die abgeschiedenen Kohlenwasserstoffe werden separat gesammelt und in 90%-iger Konzentration verwertet (1,4 m³/a).

Einsatzstoffe

50 m³ Natronlauge zu Reinigungszwecken.

Energiebedarf

Der Bedarf an elektrischer Energie beträgt bei diesem Verfahren 970.000 kWh jährlich für Strom zum Betrieb der Pumpen, Presse und des Separators. Thermische Energie wird nicht benötigt.

Jährliche Abfallmenge

An Abfällen fallen nach den Vorgaben aus [U47, U49, U50] jährlich an:

- 50 m³ verunreinigte Natronlauge
- 1,4 m³ Kohlenwasserstoffe (90%-ig)
- 30 Mg Schlamm (TS 40 %)

Tabelle 28: Abfallaufkommen bei der Aufbereitung des LaWa zur Injektion (Option 1)

	LaWa (gemäß Auslegungsvorgabe)	Einheit	Aufber. LaWa	KW-Tank	Schlamm
Menge	130.000	m³/a, Mg/a	129.700	1,4 (90 %)	30
Schwermetalle	1.250	kg/a	1.250		
Salze	9.600	Mg/a	9.600		
BTEX	52.200	kg/a	52.200		
KW	891	kg/a	< 260	> 630	
NORM	4.360	MBq/a	4.360		

4.1.6 Verbleib

Das Lagerstättenwasser ist nach geringer Aufbereitung zur Vermeidung technischer Hindernisse bei der Injektion zur Injizierung ins Rotliegende vorgesehen.

Die wenigen aufgrund weitestgehend mechanischer Aufbereitung (Tellerseparator) anfallenden Abfälle werden recycelt ((M)KW) bzw. nach Schlammmentwässerung deponiert.

4.1.7 Optimierungsmöglichkeiten / offene Fragen

Optimierungspotentiale ergeben sich vor allem bei der Trocknung des geförderten Erdgases durch eine gezieltere Behandlung des Lagerstättenwassers an den Bohrstellen bzw. an der ZGTA. Dies betrifft auch die anlagentechnischen Vorkehrungen des ExSchutzes insbesondere durch überlagertes Erdgas im B9-Behälter, vgl. Kapitel 7.1.1 sowie eine optimierbare kontinuierliche Abtrennung der Leichtphase, wobei bislang eine prophylaktische Einstufung des TKW-transportierten Lagerstättenwasser in die Gefahrgutklasse 3 (brennbare Flüssigkeiten) für erforderlich gehalten wurde, vgl. auch [U51].

Hinsichtlich der Aufbereitungsverfahren wird auf die Alternativen und deren im Gutachten, Sonderteil D vorgenommene ökologische Bewertung hingewiesen.

4.2 Option 2: Bergbauliche Verwertung, z.B. ehemalige Salzlagerstätten

Bei dieser Option wird das Lagerstättenwasser in ein Salzbergwerk eingeleitet (Flutung). Hierfür ist noch kein konkretes Salzbergwerk vorgesehen. Beispielfhaft wurde diese Option für das Salzbergwerk Mariagluck in Höfer bei Celle betrachtet. Die Förderung in diesem Salzbergwerk ist eingestellt worden, dort findet zurzeit eine Flutung zum Teil mit (aufgesalzenem) Süßwasser statt. Die (möglichen) Flutungshorizonte liegen in dem Salzbergwerk Mariagluck in einer Tiefe von ca. 800 m. Für die Einleitung von Lagerstättenwasser aus der Erdgasförderung in dieses Bergwerk liegt weder eine behördliche Genehmigung noch eine Zustimmung des Bergwerksbetriebes (K+S AG) vor. Trotzdem wird zunächst für die vergleichende Bewertung innerhalb dieser Studie von einem konkreten Salzbergwerk ausgegangen, für das diese Option der Flutung geprüft wird. Die entwickelten Prüfkriterien können aber prinzipiell auch auf andere Salzbergwerke angewendet werden.

Für die Verwertung des Lagerstättenwassers zur Flutung in einem Salzbergwerk muss dieses nach gutachterlicher Einschätzung weitestgehend frei von Kohlenwasserstoffen sein, da diese sich als Phase absetzen oder ausgasen können.

Um diese Bedingungen zu erreichen, muss das Lagerstättenwasser aufbereitet werden. Als Standort für eine zentrale Aufbereitung ist ein Standort in der Nähe des Betriebsplatzes der RWE Dea AG in Völkersen vorgesehen. Sowohl für die Option 2 als auch für die Option 3 wurde für eine Aufbereitungsanlage ein Standort in der Nähe der Kläranlage Verden angenommen, da eine Festlegung auf einen genauen Standort, z.B. den Betriebsplatz Völkersen, noch nicht feststand. Für die Option 2 ist auch der Betrieb einer entsprechenden Aufbereitung am Bergwerksstandort denkbar, bedeutet aber eine Festlegung auf ebendiesen.

4.2.1 Vorteile der Option 2

Die Vorteile dieser Option sind im Folgenden aufgeführt. Diese Aufzählung dient auch hier zunächst nur zur ersten Einschätzung der Option. Grundlage für die Bewertung der Optionen sind die vergleichenden Darstellungen in Kapitel 5.

Vorteile (ggf. noch zu prüfen):

- Verbleib des Lagerstättenwassers in > 500 m Tiefe, außerhalb nutzbarer Grundwasservorkommen

- Erhöhung der Stabilität des Bergwerks
- Einsparung von Frischwasser
- Geringes Aufkommen von Abfällen und entsprechenden Schadstofftransporten

4.2.2 Voraussetzungen, Ausschluss-Kriterien

Folgende Voraussetzungen müssen für diese Option gegeben sein:

- a) Die Salzlagerstätte muss eine ausreichende Kapazität besitzen und mindestens für den Zeitraum bis 2030 nutzbar sein.
- b) Es muss sichergestellt sein, dass der Schacht, der für die Flutung genutzt werden soll, keinen Austritt von Wasser in das umgebende Gebirge ermöglicht.
- c) Es darf beispielsweise durch Konvergenz auch zukünftig nicht zu einer Auspressung des eingebrachten Lagerstättenwassers in höhere Grundwasserhorizonte kommen.

4.2.3 Rechtsvorgaben

Für den Abtransport des Lagerstättenwassers von den Anfallstellen und auch für den Weitertransport des teilweise aufbereiteten Lagerstättenwassers zum Salzbergwerk (Flutung) sind die gefahrgutrechtlichen Bestimmungen des Straßentransportes (*GGVSEB*) zu beachten; nach Sonderteil A zu diesem Gutachten gibt sich anhand der produktionsgewichteten Konzentrationsmittelwerte eine Einstufung, die keinen Gefahrguttransport erforderlich macht.

Für die Aufbereitung und den Einsatz zur Flutung in einem aufgelassenen Salzbergwerk gelten, soweit auch die Aufbereitung im Rahmen eines Betriebsplanes erfolgt, grundsätzlich die Vorgaben des Bergrechts (*BBergG, BVOT*). Für die Bergwerksflutung sind die Vorgaben des dortigen genehmigten Betriebsplanes zur Verfüllung zu beachten. Aufgrund des oberirdischen Betriebes von Anlagen zum Umgang mit wassergefährdenden Stoffen (z.B. Sammelbehälter) werden insbesondere auch wasserrechtliche Belange berührt (*WHG/LWG, VAWS*). Die rechtlichen Anforderungen werden im Rahmen von Betriebsplänen auf Grundlage insbesondere des Bergrechts und des Wasserrechts, einschl. der Schutzbestimmungen in Wasserschutzgebieten, im Detail festgelegt.

Im Rahmen des *BImSchG* und des UVP-Gesetzes (*UVPG*), insbesondere der *UVP-V Bergbau* sind deren Vorgaben und Festlegungen zu beachten.

Bei der Entsorgung der Abfälle, die bei der Aufbereitung des Lagerstättenwassers zur Flutung anfallen, ist zu prüfen, inwieweit diese noch als bergbauliche Abfälle bzw. Rückstände anzusehen sind; in jedem Fall sind bei einer Entsorgung auf einer Deponie die gefahrgutrechtlichen Bestimmungen für den Transport sowie die Vorgaben der *DepV* und der *StrlSchV*, Anlage XII, zu beachten.

4.2.4 Transport

Der Transport des Lagerstättenwassers von den einzelnen Anfallstellen zur zentralen Aufbereitung soll weitestgehend mit TKW erfolgen. Ein teilweiser Transport über Leitungen ist möglich. Bei knapp 4.900 Fahrten pro Jahr werden ca. 91.000 km einfache Fahrtstrecke zurückgelegt.

Die Abfalltransporte sind mit voraussichtlich < 100 Mg/a (vorwiegend MKW, auch Schlamm und BTEX) vernachlässigbar.

Kritisch ist bei dieser Option der erneute Transport des aufbereiteten Lagerstättenwassers zum Flutungsort zu bewerten, wenn die Aufbereitung nicht ebendort stattfindet. Dieser Transport bewirkt ein zusätzliches Transportaufkommen für ca. 120.000 m³/a in Höhe von 475.200 km (Entfernung Völkersen-Mariagluck 99 km).

Bei einer Aufbereitung des Lagerstättenwassers am Bergwerkstandort Höfer verringert sich das Transportaufkommen auf insgesamt ca. 450.000 km.

4.2.5 Aufbereitung

Verfahrensbeschreibung

Es wird davon ausgegangen, dass weder die im Lagerstättenwasser enthaltenen Schwermetallkonzentrationen noch die NORM-Anteile einem Einsatz als Flutungsmittel

entgegenstehen, am ehesten noch eine Aufsalzung erforderlich erscheint, um die statisch stabilisierenden Sole-Konzentrationen zu erreichen.

Als bedenklich erscheinen allein die organischen Schadstoffgehalte an BTEX und KW, die auch vor dem Hintergrund einer Brand- und Explosionsgefahr zu bewerten sind, deren Entfernung das Ziel des folgenden Verfahrensvorschlages ist.

Nach der vorliegenden Konzeptstudie [U55] wird hierzu ein 4-stufiges Aufbereitungsverfahren vorgeschlagen, das in den ersten beiden Stufen zunächst aus einer **Sedimentation** (Sedimentationsbecken) und **Leichtflüssigkeitsabscheidung** besteht.

Das so vorbehandelte Lagerstättenwasser wird in einer 3. Verfahrensstufe mittels **Ultrafiltration** von weiteren suspendierten Feststoffen befreit. Die anfallenden Schlämme werden über eine Kammerfilterpresse entwässert, die Leichtphase zur Verwertung separiert.

Das Permeat der Ultrafiltration wird in der 4. Prozessstufe einer **Dampfstrippkolonne** zugeführt, aus der die anfallenden Phasen über einen Phasentrenner abgetrennt werden. Die wässrige Phase steht dann zum Einsatz als Flutungsmittel zur Verfügung.

Im Einzelnen:

Das Lagerstättenwasser wird je nach Salzgehalt in einem 240 m³ Pufferspeicher für hoch oder leicht salines Wasser gepumpt, in dem eine erste Sedimentation stattfindet. Aus dem Pufferspeicher werden Sediment und Leichtflüssigkeiten entnommen und in separaten Tanks gespeichert. Das Lagerstättenwasser aus beiden Behältern gelangt über zwei Schwerkraftabscheider mit Skimrinne und als Permeat einer Ultrafiltration zur weiteren Feststoffabtrennung, in eine 20 m³ Pumpvorlage. Die schwere Phase aus den Schwerkraftabscheidern, 260 m³/a mit TS-Konzentration 50 g/l, wird in einer 6 m³-Vorlage gelagert und einer Kammerfilterpresse zugeführt. Die hier anfallenden 230 m³/a Flüssigphase werden dem Pufferspeicher für hochsalines Lagerstättenwasser zugeführt, und 30 m³/a (TS-Gehalt 400 g/l, 40 %) Feststoffe werden extern entsorgt. Das Lagerstättenwasser aus den Schwerkraftabscheidern wird der Ultrafiltration zugeführt. Die Filtrerrückstände gelangen zurück in einen der Schwerkraftabscheider. Das Permeat wird über eine 20 m³ Pumpvorlage in einen Reinwasserspeicher gepumpt und über eine Förderpumpe in die Dampfstrippkolonne befördert. Die wässrige Phase aus der Strippkolonne wird zur Flutung verbracht. Der Kohlenwasserstoffgehalt wird hier als kleiner 2 ppm angegeben (Zulauf: 10 ppm) und der BTEX-Gehalt wird als kleiner 2,1 mg/l (Zulauf: 450 mg/l) angegeben. Die spez. Aktivität von 14 Bq/L und der Hg-Gehalt von 62 µg/L entsprechen unverändert dem Zulauf, weichen aber von den produktionsgewichteten Mittelwerten ab. Die Abluft der Strippkolonne gelangt durch einen Kühler in einen

Phasentrenner, in dem die BTEX abgeschieden und in einem Container für die externe Entsorgung und/oder die Verwertung bereitgestellt werden. Die Flüssigphase aus dem Phasentrenner wird in den Reinwasserbehälter vor der Dampfstrippkolonne zurückgeführt. BTEX werden in einem Container zur Entsorgung bereitgestellt (hier: Angabe des Frachtwertes aus den produktionsgewichteten Mittelwerten). Auf die Betrachtung der im Verfahrensschema als zusätzliche Option eingezeichnete Aktivkohlereinigung des Lagerstättenwassers wird verzichtet, da diese Behandlungsstufe für den Einsatz zur Flutung nicht notwendig erscheint.

Verfahrensschema

Auf der folgenden Seite ist das Verfahren zur Aufbereitung des Lagerstättenwassers in einer Skizze schematisch dargestellt.

Nachhaltiger Umgang mit Lagerstättenwasser - Studie

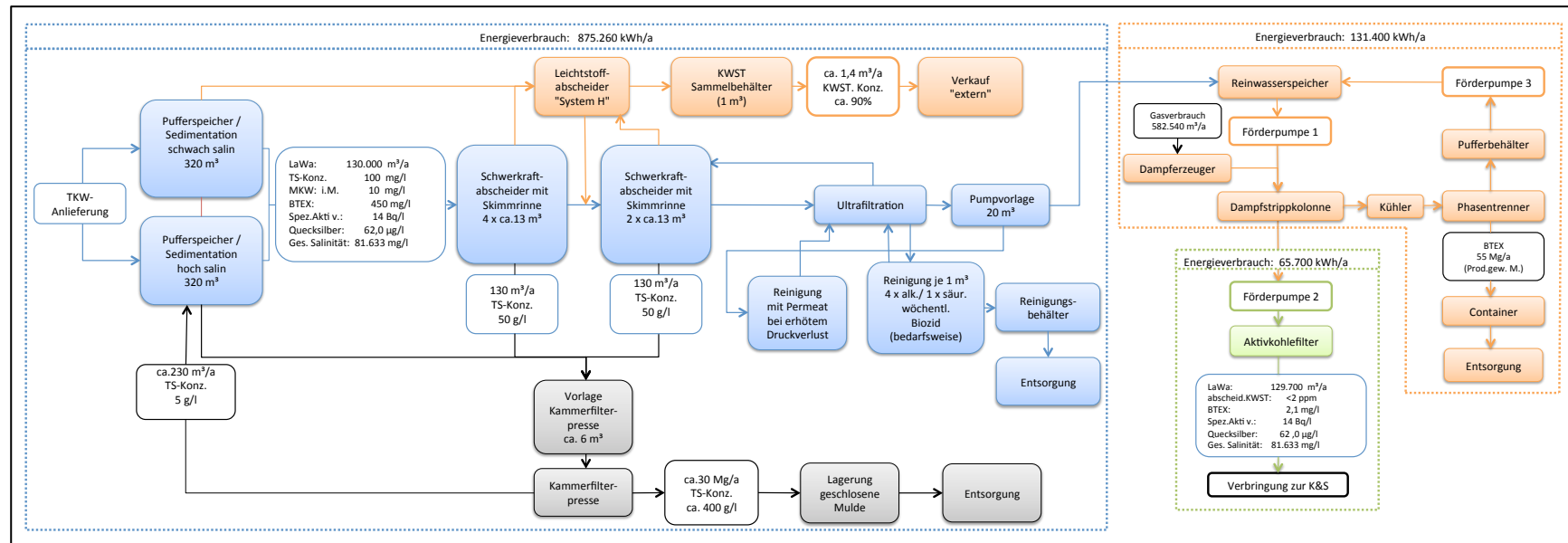


Abbildung 18: Aufbereitungskonzept für die Aufbereitung des Lagerstättenwassers zur Verwertung in einem Salzbergwerk [U55]

Verbleib der Schadstoffe

Das Lagerstättenwasser, mit dem ein Bergwerk geflutet werden soll (129.700 m³), enthält Schwermetalle, inkl. Quecksilber, Salze und natürliche radioaktive Isotope. Durch die Strippung werden die BTEX-Gehalte im Lagerstättenwasser auf 2,1 mg/l reduziert, die BTEX werden extern entsorgt (55 Mg/a bzw. 61 Mg/a 90 %ig). Die Kohlenwasserstoffe aus dem Leichtstoffabscheider (1,4 m³/a, Konz. 90 %) werden verwertet. Die beladene Aktivkohle wird extern regeneriert.

Einsatzstoffe

Als Reinigung des UF-Moduls wird angegeben: "Reinigung je 1 m³ / 4x alkalisch, 1x säur. / wöchentl. / Biozid (bedarfsweise)"; in der Massenbilanz wird dies mit 2,5 m³/a angegeben.

Energiebedarf

Der Bedarf elektrischer Energie für Strom beträgt für den Bereich Speicher, Schwerkraftabscheider, Ultrafiltration und Pumpen 875.260 kWh/a (einschließlich 65.700 kWh für die nachgeschaltete Aktiv-Kohle-Stufe) und für den Teil Stripkolonne und Phasentrenner 131.400 kWh/a. Neben den aufsummierten 1.006.660 kWh/a werden zur Dampferzeugung 582.540 m³ Gas pro Jahr benötigt, das entspricht einer thermischen Energie von 5.242.860 kWh (Heizwert).

Jährliche Abfallmenge

An Abfällen fallen lt. Fließbild jährlich an:

- 1,4 m³ Kohlenwasserstoffe (90%-ig)
- 61 Mg BTEX (90 %-ig)
- 30 Mg Schlamm (TS-Konz. 400 g/l)
- 2,5 m³/a Reinigungslösung (?)

Die Reinigungslösung fällt nur bei Einsatz einer Ultrafiltration an, vgl. auch **Sonderteil D** und ist hier möglicherweise zu niedrig angesetzt worden.

Tabelle 29: Abfallaufkommen bei der Aufbereitung des LaWa zur Flutung (Option 2)

	LaWa (gemäß Auslegungsvorgabe)	Einheit	Aufber. LaWa	KW-Tank	Press-rückstand	Rückstand aus Phasentrenner
Menge	130.000	m³/a Mg/a	129.700	1,4 (90%)	30 TS Konz. 400 g/L	ca. 61 (90%)
Schwer-metalle	1.250	kg/a	1.250			
Salze	9.600	Mg/a	9.600			
BTEX	52.200	kg/a	273			51.975
KW	891	kg/a	< 260	> 630		
NORM	4.360	MBq/a	4.360			

4.2.6 Verbleib

Für die Verfüllung und Stabilisierung ausgeförderter Salzbergwerke werden in der Regel Solen eingesetzt, um eine Restlaugung des Salzes durch das eingebrachte Flutungswasser zu vermeiden. Das Lagerstättenwasser sollte sich aufgrund des hochsalinen Charakters zumindest unter Beachtung der Restlaugbarkeit (8 %ig gegenüber Sättigung) und unter Mischung mit anderen Solen/Salzlückständen als Flutungsmittel eignen. Die relativ geringen Mengen (ca. 127.000 m³/a) gegenüber den benötigten Flutungsvolumina lassen eine Verwendung als geeignet und unproblematisch erscheinen, zumal nach Aufbereitung (Entfernung flüchtiger Inhaltsstoffe wie MKW und BTEX) keine Gefahr der Bildung explosiver Dampf-Luftgemische mehr besteht. Die NORM-Gehalte sollten gegenüber dem Salzstock keine nachteilige Änderung bedingen, wenngleich dieser Nachweis aussteht.

Für diese Option ist derzeit weder die Genehmigungsfähigkeit prüfbar noch die Bereitschaft des möglichen Betreibers erkennbar.

4.2.7 Optimierungsmöglichkeiten / offene Fragen

Beim eingesetzten Aufbereitungsverfahren ist zu prüfen, inwieweit zum einen auf die Ultrafiltration verzichtet werden kann oder ob diese zum Schutz der Dampfstrippung zwingend erforderlich ist. Zum anderen sind für die nachgeschaltete Aktiv-Kohle-Reinigung vor der Flutung keine hinreichenden Gründe erkennbar.

Abgesehen von den bereits unter Option 1 genannten Optimierungen des Vorbehandlungsverfahrens an den Anfallstellen bzw. der ZGTA (B9-Behälter) sind ohne weitere Kenntnis der spezifischen Rahmenbedingungen der Flutung keine weiteren Optimierungsmaßnahmen erkennbar, zumal eine aufwändigere Aufbereitung den Vorteil einer auf die BTEX/MKW-Entfernung begrenzten Aufbereitung aufheben würde.

4.3 Option 3a: Aufbereitung des Lagerstättenwasser durch Verdampfung und Kondensation mit dem Ziel der (Direkt-)einleitung

Bei dieser Option wird das Lagerstättenwasser an einem zentralen Standort, vorzugsweise in der Nähe eines geeigneten Vorfluters (angenommen wurde ein Standort in der Nähe der Kläranlage Verden) so weit aufbereitet, dass das dabei entstehende Abwasser („aufbereitetes Lagerstättenwasser“) direkt in den Vorfluter eingeleitet werden kann. Nach dem Konzept [U55] kommt hierfür nur die Verdampfung des Lagerstättenwassers mit anschließender Reinigung über Aktivkohle zur Entfernung der flüchtigen Inhaltsstoffe (BTEX, MKW, Glykole u.ä.) in Betracht.

Das entstehende Wasser ist auslegungsgemäß frei von MKW, BTEX, Salzen, Schwermetallen und NORM.

4.3.1 Vorteile der Option 3a

Die Vorteile dieser Option sind im Folgenden aufgeführt. Diese Aufzählung dient auch hier zunächst nur zur ersten Einschätzung der Option. Grundlage für die Bewertung der Optionen sind die vergleichenden Darstellungen in Kapitel 5.

Vorteile (tw. als Ergebnis gesonderter Überprüfung):

- Gezielte Aufkonzentrierung der Schadstoffe durch die Aufbereitung des Lagerstättenwassers
- Vollständige Reinigung des Lagerstättenwassers
- Kontrollierbare Direkteinleitung des abgereinigten Lagerstättenwassers

4.3.2 Voraussetzungen, Ausschluss-Kriterien

Folgende Voraussetzungen müssen für diese Option gegeben sein:

- a) Die Technik zur Aufbereitung des Lagerstättenwassers muss verfügbar und sicher sein.
- b) Es muss ein Vorfluter zur Verfügung stehen, in den das abgereinigte Lagerstättenwasser eingeleitet werden kann.

- c) Es muss ausreichend Deponieraum für die anfallenden Abfallgemische zur Verfügung stehen.

4.3.3 Rechtsvorgaben

Für den Abtransport des Lagerstättenwassers von den Anfallstellen bzw. der ZGTA sind die gefahrgutrechtlichen Bestimmungen des Straßentransportes (GGVSEB) zu beachten; nach **Sonderteil A** zu diesem Gutachten ergibt sich anhand der produktionsgewichteten Konzentrationsmittelwerte eine Einstufung, die keinen Gefahrguttransport erforderlich macht.

Bei Betrieb einer externen, d.h. nicht mehr im unmittelbaren Zusammenhang mit der bergbaulichen Tätigkeit stehenden Aufbereitung ist davon auszugehen, dass die Aufbereitungsanlage nach den Kriterien des Abfallrechts (KrWG) in Verbindung mit dem Genehmigungsrecht (Baurecht, BImSchG/4. BImSchV) zu genehmigen ist.

Für die Behandlung von gefährlichen Abfällen der Klassifizierung 01 04 07* nach AVV gelten beispielsweise für den Anlagenbetreiber folgende immissionsschutzrechtliche Genehmigungsschwellen für Abfallbehandlungsanlagen:

Auszug aus Anhang zur 4. BImSchV, Spalte 1- und Spalte-2-Anlagen:

8.8	Anlagen zur chemischen Behandlung, insbesondere zur chemischen Emulsionsspaltung, Fällung, Flockung, Neutralisation oder Oxidation, von a) gefährlichen Abfällen, auf die die Vorschriften des Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetzes Anwendung finden, oder b) nicht gefährlichen Abfällen, auf die die Vorschriften des Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetzes Anwendung finden, mit einer Durchsatzleistung von 50 Tonnen Einsatzstoffen oder mehr je Tag	Anlagen zur chemischen Behandlung, insbesondere zur chemischen Emulsionsspaltung, Fällung, Flockung, Neutralisation oder Oxidation, von nicht gefährlichen Abfällen, auf die die Vorschriften des Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetzes Anwendung finden, mit einer Durchsatzleistung von 10 Tonnen bis weniger als 50 Tonnen Einsatzstoffen je Tag
8.10	Anlagen zur physikalisch-chemischen Behandlung, insbesondere zum Destillieren, Kalzinieren, Trocknen oder Verdampfen, von a) gefährlichen Abfällen, auf die die Vorschriften des Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetzes Anwendung finden, mit einer Durchsatzleistung von 10 Tonnen Einsatzstoffen oder mehr je Tag oder b) nicht gefährlichen Abfällen, auf die die Vorschriften des Kreislaufwirtschafts-	Anlagen zur physikalisch-chemischen Behandlung, insbesondere zum Destillieren, Kalzinieren, Trocknen oder Verdampfen, von a) gefährlichen Abfällen, auf die die Vorschriften des Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetzes Anwendung finden, mit einer Durchsatzleistung von 1 Tonne bis weniger als 10 Tonnen Einsatzstoffen je Tag oder b) nicht gefährlichen Abfällen, auf die die Vorschriften des Kreislaufwirtschafts-

Für die Einleitung von Abwasser aus diesem Aufbereitungsprozess nach entsprechender Vorbehandlung (117.500 m³ Kondensat/a) in ein Gewässer (Vorfluter, Direkteinleitung) ist eine wasserrechtliche Erlaubnis erforderlich.

Diese Studie ist urheberrechtlich geschützt. RWE Dea AG wurden die ausschließlichen Nutzungsrechte an dieser Studie übertragen. Jegliche Vervielfältigung oder Verbreitung dieser Studie ist nur mit vorheriger schriftlicher Zustimmung der RWE Dea AG gestattet.

auf Einzelfallentscheidungen der zuständigen Wasserbehörde, die den Schutz des Gewässers zu gewährleisten hat (OGewV). Die Verfügbarkeit eines geeigneten Fließgewässers vorausgesetzt, werden an die Direkteinleitungen im Rahmen einer wasserrechtlichen Erlaubnis zur Gewässerbenutzung in der Regel Anforderungen nach den (regionalen) Wasserbewirtschaftungsplänen gestellt. Das Wasserhaushaltsgesetz (WHG) und die Abwasserverordnung (AbwV) des Bundes geben insoweit nur Rahmenbedingungen vor.

Aufgrund des oberirdischen Betriebes von Anlagen zum Umgang mit wassergefährdenden Stoffen (z.B. Sammelbehälter) werden insbesondere auch wasserrechtliche Belange der Anlagensicherheit berührt (WHG/LWG, VAWs).

Bei der Entsorgung der Abfälle, die bei der Aufbereitung anfallen, gelten ebenfalls die Bestimmungen des KrWG i.V. mit der Anlagengenehmigung. Es handelt sich nicht mehr um bergbauliche Abfälle. Ferner sind bei einer Entsorgung auf einer Deponie die gefahrgutrechtlichen Bestimmungen für den Transport sowie die Vorgaben der DepV und der StrlSchV, Anlage VII, zu beachten.

Kann das Lagerstättenwasser noch im Zusammenhang mit einer bergrechtlich genehmigten Anlage unter einem gültigen Betriebsplan aufbereitet werden, so wäre dort auch die Ableitung in einen Vorfluter im Einvernehmen mit der (oberen) Wasserbehörde zu regeln.

4.3.4 Transport

Der Transport des Lagerstättenwassers von den einzelnen Anfallstellen zur zentralen Aufbereitung (Raum Verden) soll weitestgehend mit TKW erfolgen. Ein teilweiser Transport über Leitungen ist möglich. Bei knapp 4.900 Fahrten pro Jahr werden ca. 91.000 km einfache Fahrtstrecke zurückgelegt.

4.3.5 Aufbereitung

Verfahrensbeschreibung

Der im Rahmen der Konzeptstudie [U55] vorgelegte Verfahrensvorschlag sieht eine 3- bis 4-stufige Prozessführung vor, wobei das Lagerstättenwasser zunächst über eine **Schwerkraftabtrennung (Sedimentation)** von absetzbaren Feststoffen und abscheidbaren

Leichtflüssigkeiten (**Abscheider**) gereinigt wird. Über einen 0,8 mm Schutzfilter gelangt das vorbehandelte Lagerstättenwasser in zwei **Zwangsumlaufverdampfer** sowie in einer 3. Stufe in 8 **Vakuumverdampfer**. Die vereinigten Kondensate können über einen Aktivkohlefilter für eine Direkteinleitung zur Verfügung stehen.

Neuere Entwicklungen zur Nutzung dieses energieintensiven Prozesses setzen zumindest dann auf energieeffiziente Gas- und Dampfturbinen-Kraftwerkstechnik (GUD), wenn der feste Rückstand verwertet werden kann.

Im Einzelnen:

Das Lagerstättenwasser wird in drei 240 m³ Pufferspeicher gepumpt, in dem eine erste Sedimentation und Abscheidung von Leichtflüssigkeiten stattfindet. In dem Pufferspeicher abgesetzte Partikel werden extern entsorgt. Die Leichtflüssigkeitsphase gelangt in einen Leichtstoffabscheider „System H“, von wo aus Kohlenwasserstoffe in einem separaten Tank gesammelt werden und die Wasserphase wieder dem Pufferspeicher zugeführt wird. Das Lagerstättenwasser aus beiden Behältern gelangt über einen 0,8 mm Schutzfilter in zwei Zwangsumlaufverdampfer. Das in den Verdampfern entstehende Kondensat (85.700 m³/a) wird einer Vorlage zur Einleitung zugeführt. Das Lagerstättenwasser aus den Zwangsumlaufverdampfern kommt in einen 35 m³ Pufferspeicher, dort wird es in acht Vakuumverdampfer gepumpt, in denen es in 31.800 m³/a Kondensat und 12.500 m³/a Schlamm mit einer TDS-Konzentration von 850 g/l getrennt wird. Das Kondensat wird in der Vorlage zur Einleitung mit dem Kondensat der Zwangsumlaufverdampfer zusammengeführt. Die 117.500 m³ Kondensat gelangen über einen Aktivkohlefilter (Wechselgebinde) zur Direkteinleitung.

Verfahrensschema

Auf der folgenden Seite ist das Verfahren zur Aufbereitung des Lagerstättenwassers in einer Skizze schematisch dargestellt.

Nachhaltiger Umgang mit Lagerstättenwasser - Studie

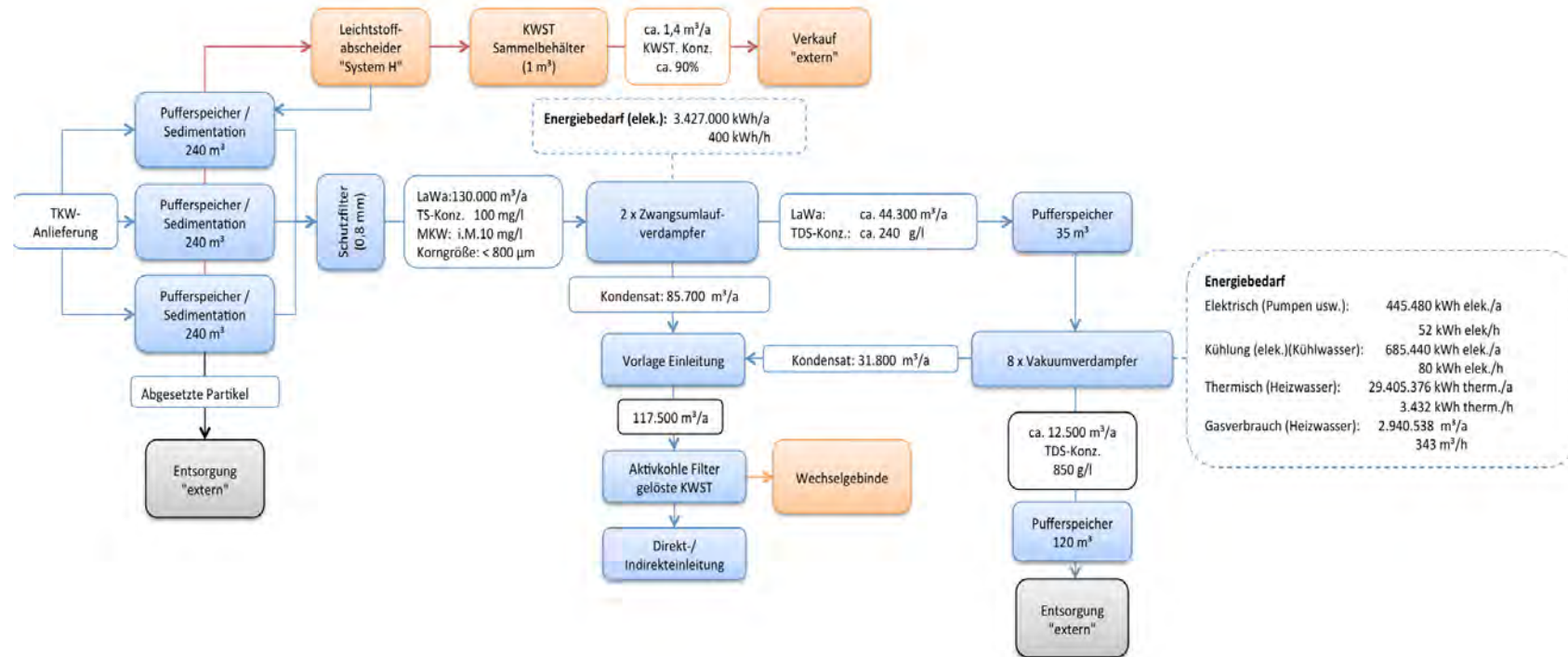


Abbildung 19: Aufbereitungskonzept für die Aufbereitung des Lagerstättenwassers zur Direkteinleitung (Eindampfung) [U50]

Verbleib der Schadstoffe

Das Lagerstättenwasser, das nach der Vorbehandlung als Kondensat aus der Verdampfung (117.550 m³) direkt eingeleitet werden soll, hält vorgabegemäß die Direkteinleitergrenzwerte ein. Die Kohlenwasserstoffe und BTEX werden vor der Direkteinleitung im Aktivkohlefilter adsorbiert, und Salze, Schwermetalle, inkl. Quecksilber, sowie radioaktive Stoffe werden im Verdampfungsrückstand zurückgehalten. Abscheidbare Kohlenwasserstoffe werden separat erfasst und in 90%-iger Konzentration verwertet (1,4 m³/a).

Einsatzstoffe

120 Mg/a Aktivkohle, es werden keine weiteren Zusatzstoffe eingesetzt.

Energiebedarf

Der Bedarf an elektrischer Energie für Strom zum Betrieb der Puffer, Zwangsumlaufverdampfer und Filter (3.427.000 kWh/a) sowie für Kühlung 685.440 kWh/a und Pumpen 445.480 kWh/a (zusammen 1.130.920 kWh/a) beträgt insgesamt 4.557.920 kWh jährlich. Dazu kommt ein Energieverbrauch für Gas zu Heizzwecken von 2.940.538 m³/a, das entspricht 26.464.842 kWh/a (Heizwert).

Jährliche Abfallmenge

Als Abfälle fallen jährlich an:

- 12.500 m³ Verdampfungsrückstände (TDS-Konz. 850 g/l)
- 172,9 Mg beladene Aktivkohle (120 Mg Aktiv-Kohle mit ca. 52,9 Mg BTEX/(M)KW-Reste)
- 1,4 m³ Kohlenwasserstoffe (90%-ig)

Tabelle 30: Abfallaufkommen bei der Aufbereitung des LaWa zur Direkteinleitung (Verdampfung, Option 3a)

	LaWa (gemäß Auslegungs- vorgaben)	Ein- heit	Aufber. LaWa	KW- Tank	Aktivkohle	Rückstand
Menge	130.000 m³/a		117.500 m³/a	1,4 m³/a 90 %	172.912 kg/a inkl. 120.000 kg Aktivkohle/a	12.500 m³/a TS 850 g/L 10.625 Mg/a
Schwer- metalle	1.248	kg/a				1.248
davon Pb	1.209	mg/a				1.209
Salze	9.602	Mg/a				9.602
	73,86	g/L				
BTEX	52.248	kg/a			52.248	
	402 mg/L				435 g/kg	
KW	891	kg/a		> 630	< 260	
	6,85 mg/L				2,1 g/kg	
NORM	4.362	MBq/a				4.362
	33,55	Bq/L				

4.3.6 Verbleib

Durch das Verfahren der Verdampfung (Destillation) werden alle gelösten Inhaltsstoffe bis auf die flüchtigen organischen Inhaltsstoffe, die entweder zuvor durch Phasentrennung entfernt werden (MKW) oder vor der Einleitung durch Aktivkohle adsorbiert werden (BTEX, Glykole etc.), im Verdampfungsrückstand aufkonzentriert. Das so "aufbereitete Lagerstättenwasser" kann als Abwasser erfahrungsgemäß unter Beachtung der Einleitenvorgaben (u.a. Anhang 27 AbwV) direkt einem Vorfluter zugeführt werden. Während die organischen Inhaltsstoffe für ein weiteres Recycling aufgearbeitet werden können, sind die Schwermetalle, Salze und radioaktiven Bestandteile als Gemisch zu beseitigen (Deponierung unter Beachtung insbesondere auch der strahlenschutzrechtlichen Vorgaben).

Damit konzentriert sich die Umweltbelastung wesentlich auf den Verbleib des bei der Aufbereitung anfallenden Verdampfungsrückstandes.

4.3.7 Optimierungsmöglichkeiten / offene Fragen

Sieht man von der in Kapitel 7.1.1 beschriebenen Optimierung der Vorbehandlung des Lagerstättenwassers an den Anfallstellen bzw. an der ZGTA ab, so konzentriert sich eine Optimierung des energieintensiven Verfahrens auf die Energieeffizienzsteigerung. Interessant ist in diesem Zusammenhang die teilweise öffentlich geführte Diskussion um die Aufbereitung solehaltiger Haldenabwässer der Fa. K+S in Hessen und den gutachterlich vorgeschlagenen Einsatz von energieeffizienter Gas- und Dampfturbinen-Kraftwerkstechnik (GUD) [L24].

4.4 Option 3b: Aufbereitung des Lagerstättenwassers durch chem.-phys. und thermische Behandlung mit dem Ziel der Indirekteinleitung

Bei dieser Option wird das Lagerstättenwasser in einer CP-Anlage so weit gereinigt, dass es anschließend einer kommunalen oder industriellen Kläranlage zugeführt werden kann (Indirekteinleitung). Die Aufbereitung findet vorzugsweise zentral in der Nähe der betreffenden Kläranlage statt. Als Zielort für das aufbereitete Lagerstättenwasser wird bei dieser Option die Kläranlage Verden angenommen. CP-Anlagen sind bekanntermaßen in unterschiedlicher Verfahrenskombination Bestandteil der Anlagenstandorte für die Aufbereitung von Flüssigabfällen und verfügen in der Regel über gesonderte Absprachen mit den angeschlossenen oder belieferten Kläranlagen zur kontinuierlichen oder chargenweisen Beschickung unter Begrenzung von einzelnen Schadstoffkonzentrationen und -frachten.

Um die Einleitfähigkeit aller in den Indirekteinleiterverordnungen bzw. Entwässerungssatzungen geregelten Parameter zu gewährleisten, ist die Behandlung mit klassischen Aufbereitungsverfahren sehr aufwändig. In der Regel erfolgt in den CP-Anlagen ein Verschnitt mit anderen Teilströmen, wenn sich hieraus eine Synergie ergibt (pH-Neutralisation, Fällungsmittelsparung u. ä.); eine Erreichung der Zielwerte durch Verdünnung ist unzulässig.

Die hier in die Betrachtung einbezogenen Aufbereitungsverfahren wurden von der Fa. Aquaconsult erarbeitet [U55] und mit Erkenntnissen industrieller Anbieter von Abwasseraufbereitungsanlagen sowie mit Erkenntnissen aus Untersuchungen zur Trennbarkeit von NORM-Stoffen aus salinen Medien [U56] kombiniert.

Auf einige vorgelegte Verfahrensvorschläge und deren RWE-interne Bewertung wird in diesem Zusammenhang hingewiesen [U1-U8]. Die vorgelegte Diplomarbeit [L2] kommt zwar ebenfalls zu einem kombinierten Aufbereitungsvorschlag und schlägt als Möglichkeit auch dezentrale Lösungen vor, lässt aber die wesentliche und insbesondere auch ökologisch notwendige Entfernung der NORM-Stoffe außer Betracht.

Als ausschlaggebend für die Realisierbarkeit des hier dargestellten mehrstufigen Aufbereitungsverfahrens erweist sich die Trennbarkeit der radioaktiven Nuklide von Alkali- und Erdalkalimetallen (Salzbildner), vgl. hierzu [U56, U59], sowie die Tatsache, dass eine Reihe von Gehalten im Lagerstättenwasser bereits die Anforderungen an eine Indirekteinleitung erfüllen, siehe hierzu Tabelle 25.

4.4.1 Vorteile der Option 3b

Die Vorteile dieser Option sind im Folgenden aufgeführt. Diese Aufzählung dient zunächst nur zur ersten Einschätzung der Option. Grundlage für die Bewertung der Optionen sind die vergleichenden Darstellungen in Kapitel 5.

Vorteile (tw. als Ergebnis gesonderter Überprüfung):

- Es findet eine gezielte, wenn auch nur bedingt selektive Schadstoffelimination (Co-Fällung) statt.
- Eine kontinuierliche Überwachung der Zielwerte im Rahmen der Einleiterkontrolle ist möglich.

4.4.2 Voraussetzungen, Ausschluss-Kriterien

Folgende Voraussetzungen müssen für diese Option gegeben sein:

- a) Die Technik zur Aufbereitung des Lagerstättenwassers muss verfügbar und sicher sein.
- b) Es muss eine Kläranlage mit ausreichender Kapazität zur Übernahme des gereinigten Lagerstättenwassers zur Verfügung stehen.
- c) Es muss ausreichend Deponieraum zur Verfügung stehen für die anfallenden Abfälle.

4.4.3 Rechtsvorgaben

Im Prinzip gelten für diese Option die gleichen Vorgaben wie im Falle der Option 3a (Kapitel 4.3.3) mit dem Unterschied, dass die Einleitung nicht in einen Vorfluter, sondern in das öffentliche Kanalnetz (Indirekteinleitung) erfolgt. Dementsprechend gelten die Anforderungen der kommunalen Abwasserbeseitigungssatzung (hier: Stadt Verden) und bezogen auf die Aufbereitungsanlage der Herkunftsbereich der *AbwV Anhang 27* („Behandlung von Abfällen durch chemisch-physikalische Verfahren (CP-Anlagen) sowie Altölaufbereitung“), hier: Anforderungen vor Vermischung.

Hinsichtlich der NORM-Bestandteile sind zudem die *StrlSchV* Anlage VII, Teil D, sowie § 71(3) im Rahmen einer behördlichen Gesamtbewertung zu beachten.

Eine Anfrage der RWE Dea AG bei einer Kläranlage der Größenklasse 4 (Einwohnerwert: 10.000 bis 100.000) hat ergeben, dass dort eine Annahme von 255 m³/d mit einem Salzgehalt von 6 bis 9 % entsprechend 60-90 g/L als möglich angesehen wird. Voraussetzung ist die weitestgehende Entfernung der BTEX und der Schwermetalle. Eine Aussage zu den verbleibenden NORM-Gehalten (ca. 10 % der Gesamtfracht, mithin ca. 400 MBq/a) liegt nicht vor.

4.4.4 Transport

Der Transport des Lagerstättenwassers von den einzelnen Anfallstellen zur zentralen Aufbereitung (Raum Verden) soll weitestgehend mit TKW erfolgen. Ein teilweiser Transport über Leitungen ist möglich. Bei knapp 4.900 Fahrten pro Jahr werden ca. 91.000 km einfache Fahrtstrecke zurückgelegt.

4.4.5 Aufbereitung

Verfahrensbeschreibung

Das zusammen mit einem Anbieter von Abwasserbehandlungsanlagen entwickelte Konzept basiert maßgeblich auf der weitgehenden Trennung der NORM-Nuklide [U56, U59] von den salinen Inhaltsstoffen, die im aufbereiteten Lagerstättenwasser verbleiben. Bei allen anderen Optionen verbleiben die NORM-Nuklide nahezu vollständig im aufbereiteten Lagerstättenwasser (Option 1 und 2) oder im Verdampfungsrückstand (Option 3a).

In der 1. Stufe erfolgt zur Trennung der NORM-Nuklide von den übrigen Salzen eine kombinierte **Fällung/Flockung/Adsorption** mittels Bariumsulfat/Eisenhydroxid/A-Kohle. Die Schlammphase wird dekantiert. Die abgetrennte wässrige Phase wird in der 2. und 3. Stufe über einen **Mehrschichtfilter** einer **Dampfstrippkolonne** zugeführt. Die BTEX werden als Kondensat ausgekühlt und über einen Phasentrenner separiert, während die Wasserphase in einer 4. Prozessstufe mittels **Aktiv-Kohle-Adsorber** zur Indirekteinleitung aufbereitet wird.

Im Einzelnen:

Nach Anlieferung des Lagerstättenwassers und Stapelung in einem Speicherbehälter erfolgt die Fällung/Flockung/Adsorption mittels Bariumsulfat/Eisenhydroxid und Aktiv-Kohle. Dabei wird aus dem Lagerstättenwasser ein Schlamm ausgetragen, der in eine Schlammvorlage befördert wird. Von dort kommt der Schlamm in einen Dekanter, der eine Flüssigphase abtrennt, die zurück in den Speicher gelangt. Die Festphase soll <200 Bq/kg und einem Trockenanteil von 40 % erfüllen und zur Entsorgung in Containern gelagert werden. Das Klarwasser aus dem Fällungsprozess wird mit Pumpen in einen Mehrschichtfilter gepumpt. Die Reinwasserphase aus dem Mehrschichtfilter gelangt über eine weitere Förderpumpe in die Dampfstrippkolonne. Die wässrige Phase aus der Strippkolonne wird mit einer weiteren Förderpumpe über einen Aktivkohlefilter geleitet und mit einem Rest-BTEX-Gehalt von 2,1 mg/l, mit einer spez. Aktivität von 3,0 Bq/l, mit einer Gesamtsalinität von 81.633 mg/l und ohne Hg-Gehalte indirekt eingeleitet. Die Abluft der Strippkolonne gelangt nach Abkühlung in einen Phasentrenner, aus dem die abgeschiedenen BTEX in einem Container für die externe Entsorgung bereitgestellt werden, die Wasserphase wird in den Reinwasserbehälter vor der Dampfstrippkolonne zurückgeführt.

Verfahrensschema

Auf der folgenden Seite ist das Verfahren zur Aufbereitung des Lagerstättenwassers in einer Skizze schematisch dargestellt.

Nachhaltiger Umgang mit Lagerstättenwasser - Studie

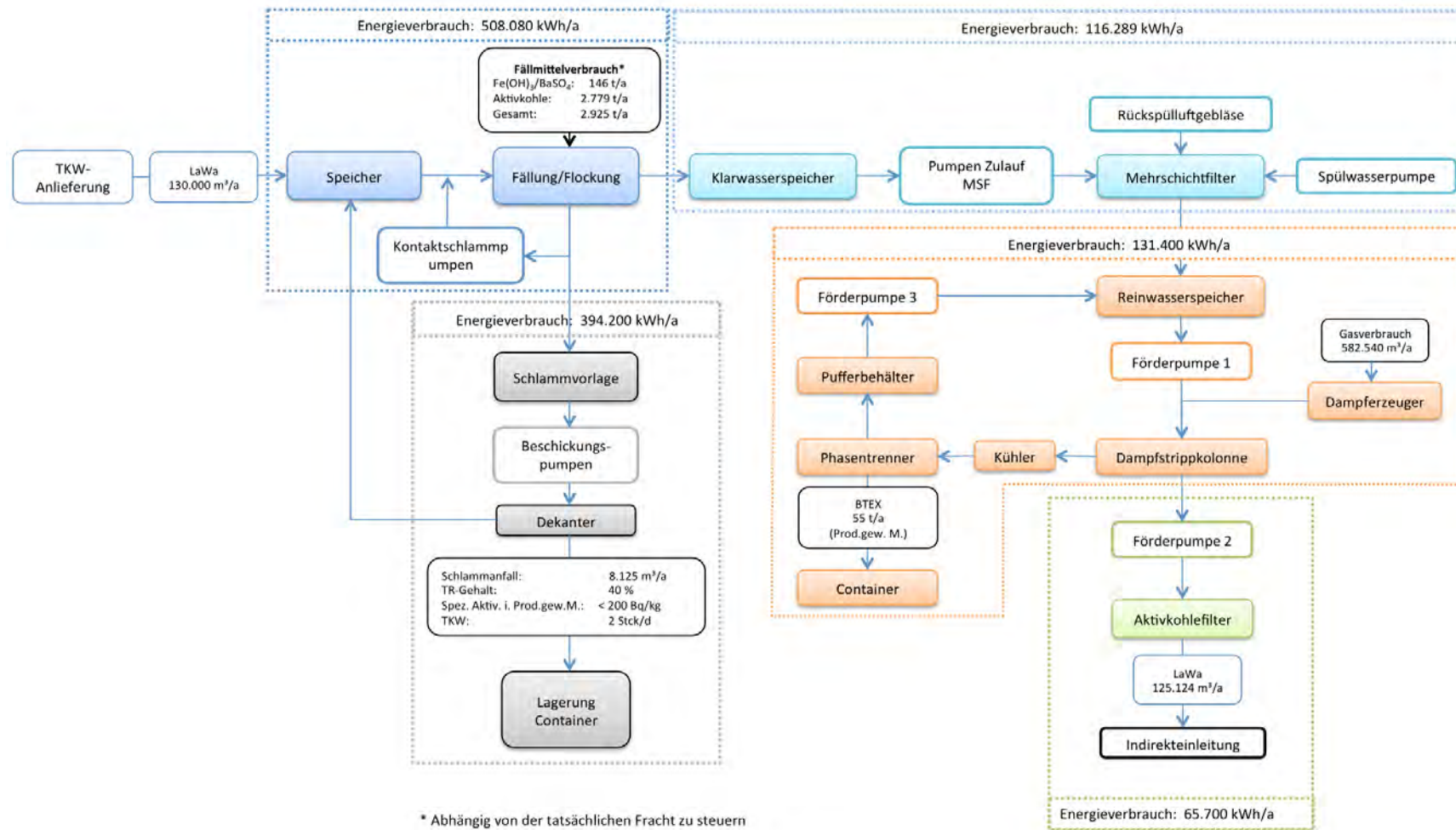


Abbildung 20: Aufbereitungskonzept für die Aufbereitung des Lagerstättenwassers zur Direkteinleitung (Eindampfung) [U55]

Verbleib der Schadstoffe

Der aus der Fällung/Flockung entstehende Schlamm (8.125 Mg/a, TM-Gehalt 40 %) enthält den Großteil der im Lagerstättenwasser enthaltenen Schwermetalle, einschließlich Quecksilber, und ca. 90 % der radioaktiven Isotope. Die BTEX und die Kohlenwasserstoffe sowie das verbleibende Quecksilber werden in dem nachgeschalteten Aktivkohlefilter abgeschieden.

Die Salzfracht verbleibt bei diesem Verfahren zusammen mit etwa 10 % der NORM-Nuklide im Lagerstättenwasser, das entsprechend der Trenneffektivität noch Restgehalte an Schwermetallen und BTEX enthält: das LaWa zur Indirekteinleitung (125.124 m³/a) enthält angabegemäß nach dem Aktivkohlefilter 2,1 mg/L BTEX und keine Hg-Gehalte, sowie eine Salinität von 81.633 mg/L. Die spezifische Radioaktivität beträgt lt. Angaben 3,0 Bq/L.

Bei der Fällungsstufe ist zu beachten, dass etwa 2,6 Mg/a eines speziellen Flockungshilfsmittels zusammen mit einer Base (Natronlauge, Calciumhydroxid) zur pH-Einstellung benötigt werden.

Insgesamt werden für das Verfahren folgende Rückhalteraten jeweils auf den Input der Verfahrenstufe angegeben:

Tabelle 31: Angegebene Rückhaltequoten in Prozent (Option 3b) [U55, U56, U59]

	Fällung/ Flockung	Mehrschicht- filter	Dampfstrippung	Aktivkohle	Gesamt bezogen auf LaWa (berechnet)
BTEX	10	0	95	90	99,55
Ra-226	95	0	0	0	95
Ra-228	95	0	0	0	95
Pb-210	80	0	0	0	80
Po-210	95	0	0	0	95
Quecksilber	90	5	0	100	100
Ges. Salinität	0	0	0	0	0*
Feststoffe	90	100	0	100	100

* Barium bleibt aufgrund des Fällmittelzusatzes bei Betrachtung der Salinität unberücksichtigt

Einsatzstoffe

Es werden 2.925 Mg/a Fällmittel (146 Mg/a Bariumsulfat/Eisenhydroxid und 2.779 Mg/a Aktivkohle) und 2,6 Mg/a Flockungshilfsmittel eingesetzt. Hierzu kommen 2,7 m³ Filtermaterial im MSF und 2,0 m³ Aktivkohle pro Filterwechsel (Austauschintervall ist nicht bekannt).

Energiebedarf

Für den Bereich Fällung/Flockung beträgt laut den Bilanzangaben des Konzeptentwurfes (vgl. Abbildung 20) der Verbrauch elektrischer Energie 508.080 kWh/a, im Abschnitt Mehrschichtfilter 116.289 kWh/a, für den Dekanter weitere 394.200 kWh/a, im Teil Strippkolonne/Phasentrennung 131.400 kWh/a und beim Verfahrensteil Aktivkohlefilter 65.700 kWh/a. Insgesamt ergibt sich für diese Variante, inklusive Pumpenleistungen, ein Bedarf an elektrischer Energie von 1.215.669 kWh/a. Dazu kommt ein Energieverbrauch für Gas zu Heizzwecken von 582.540 m³/a, das entspricht 5.242.860 kWh/a thermischer Energie.

Jährliche Abfallmenge

Als Abfälle fallen jährlich an:

- Schlamm aus Fällung/Flockung 8.125 m³ (TM 40 % entsprechend 3.250 Mg), entsprechend dem prod.gew. Mittel 398,1 Mg/a Salze, 7,23 kg/a Quecksilber und 4,32 MBq/a radioaktive Isotope)
- BTEX/(M)KW (Phasentrenner) 45,4 Mg/a (die im Fließschema angegebenen 55 Mg/a beziehen sich auf eine Zulaufkraft von 58,1 Mg/a anstatt 52 Mg/a zuzüglich MKW, und sind daher in der vorgelegten Berechnung zu hoch angesetzt)
- beladenes Filtermaterial aus MSF 2,7 m³ je Filter, Wechselintervall unbekannt (prod.gew. Mittel 1,3 Mg/a Feststoffe und 0,04 kg/a Quecksilber)
- beladener Aktivkohlefilter 2 m³ je Filter, Wechselintervall unbekannt (prod. gew. Mittel 0,76 kg/a Quecksilber und 2,53 Mg/a BTEX/(M)KW)

Tabelle 32: Abfallaufkommen bei der Aufbereitung des LaWa zur Indirekteinleitung (Option 3b)

Stoff	LaWa (gem. Auslegungs- vorgaben)	Ein- heit	Aufber. LaWa	Entwässerter Schlammanfall aus Fällung	Kondensat aus Dampf- strippung	Aktiv- kohle/MSF
Menge	130.000	m³/a	125.124 m³/a	8.125 m³/a TS 40 % = 3.250 Mg	45.434 kg/a	2 m³ bzw. 2,7 m³ pro Filter- wechsel
Schwer- metalle	1.248	kg/a	125	1.123		
	9,6	mg/L	0,99 mg/L	138,2 mg/kg		
Blei	9,3	mg/L	1.209 kg/a			
Queck- silber						
Salze	9.602	Mg/a	9.602			
	73,86	g/L	76,73			
BTEX	52.248	kg/a	235	5.225	44.672	2.116
	402	mg/L	2,1 mg/L	643 mg/kg		
KW	891	kg/a		89	762	40
	6,85	mg/L		10,9 mg/kg		
NORM	4.362	MBq/ a	436	3.926		
	33,55	Bq/L	3,49 Bq/L	483,2 Bq/kg		

4.4.6 Verbleib

Beim Verbleib des aufbereiteten Lagerstättenwassers erweist sich der verbleibende Salzgehalt mit einem geringen Anteil an NORM-Nukliden als wesentliches Hindernis der Indirekteinleitung, das einer eingehenden Prüfung durch die betreffende Kläranlage erfordert, damit keine Aufsalzung des Vorfluters im Ablauf der Kläranlage resultiert. Hierzu ist von einer Reduzierung des Salzgehaltes auf etwa 250 mg/L (Oberflächengewässer) auszugehen, bestehende Erlaubnisse zeigen aber auch die Zulassung höherer Ablaufwerte für die Direkteinleitung.

Bei den übrigen Schadstoffparametern wird vorgabegemäß von der Einhaltung der Indirekteinleitervorgaben des Anhangs 27 AbwV vor „Vermischung“ ausgegangen bzw. von der Einhaltung der betreffenden Abwasserbeseitigungssatzung (hier *Satzung Verden*).

Als kritisch ist die hohe Aufkonzentration der Schwermetalle und NORM-Nuklide im resultierenden Fällschlamm anzusehen, die eine eingehende Prüfung der Deponierbarkeit nach Entwässerung erfordert (voraussichtlich Deponieklasse IV, Untertagedeponie).

4.4.7 Optimierungsmöglichkeiten / offene Fragen

Neben der bereits erwähnten Optimierung der Vorbehandlung an den Anfallstellen bzw. der ZGTA, vgl. Kapitel 7.1.1, sollten die Hinweise einer weiteren Optimierung der Trennung von NORM-Nukliden und Salzbildnern durch Verfahrensoptimierung der Co-Fällung angestrebt werden. Hierzu sei auf den **Sonderteil D** dieses Gutachtens sowie auf den Bericht der Fa. IAF [U56] verwiesen.

Zu klären bleibt die Frage der Einleitfähigkeit des aufbereiteten Lagerstättenwassers in Hinblick auf die hohen Salzgehalte und Rest-Nuklide. Wie bereits an anderer Stelle erwähnt, sollten Konzentrationen von einigen Gramm Salz pro Liter dem Klärprozess sogar zugute kommen. Der Rest-NORM-Gehalt, vgl. auch die Bewertung in Kapitel 5.4.3, sollte aber auf 1 % anstatt 10 % gesenkt werden.

5 BEURTEILUNG DER OPTIONEN

Im Einklang mit der Zielsetzung der Studie werden verschiedene Prozessoptionen (Prozessabläufe) unter dem Aspekt eines nachhaltigen Verbleibs des mit der Erdgasförderung anfallenden Lagerstättenwassers geprüft und verglichen. Die Auswahl der Prozessabläufe bzw. Verfahren erfolgt in Abstimmung mit dem Auftraggeber. Dabei scheiden solche Prozesse aus, die entweder technisch nicht realisierbar sind, unabsehbare Folgen für Mensch und Umwelt erkennen lassen (z. B. seismische Ereignisse) oder die nicht in einem absehbaren Zeitrahmen umgesetzt werden können (Vergleiche so genannte Ausschluss-Kriterien). Die bei der Bewertung der Zielerreichung angewendeten Kriterien entstammen dem Spektrum ökologisch-ökotoxischer Maßstäbe, wohingegen ökonomische Kriterien nicht in die Bewertung einbezogen werden.

Da es für einen ökologischen Vergleich der ausgewählten Optionen teilweise an Daten oder externen Vergleichsmaßstäben fehlt, muss sich ein Vergleich ökologischer Vorteilhaftigkeit für einzelne Kriterien auf den damit gesetzten Betrachtungsrahmen (Referenz) selbst beschränken, der durch die ausgewählten Optionen gebildet wird. Die schlussendlich angewendete Bewertungsmatrix mit einer quantifizierenden Bewertung („Benotung“) einzelner Verfahrensalternativen muss deshalb relativiert werden und erhebt anstelle einer absoluten Rangfolge eher den Anspruch eines transparenten relativen Bewertungsrasters, das auf andere Optionen ausgeweitet werden kann.

5.1 Grundlagen

Zur vorwiegend ökologischen Bewertung verschiedener Verfahrenskonzepte unter dem Aspekt der Nachhaltigkeit gibt es derzeit keine standardisierte Methodik.

Die üblicherweise angewendeten Methoden oder Methodenelemente sind:

Ökobilanz- und Ökoeffizienzbetrachtungen

Die Ökobilanzierung nach der Norm DIN EN ISO 14044: 2006-10 bzw. den Normen ISO 14040: 2009-11 (Ziele und Anwendungsrahmen), 14041 (Sachbilanz), 14042 (Wirkungsabschätzung) und 14043 (Auswertung) dient der Bewertung von Umweltauswirkungen u.a. von Prozessen, konzentriert sich aber eher auf die Produktbewertung im Rahmen des Life Cycle Assessment (LCA). Sie münden zumeist in

einen Vergleich bestimmter Wirkungsgrößen (z.B. CO₂-Footprint) und hängen in starkem Maße vom Betrachtungsrahmen und den hierzu verfügbaren Daten ab.

Im vorliegenden Fall einer Vergleichsstudie wird der Betrachtungsrahmen vom Prozess der Bereitstellung des Lagerstättenwassers im B9-Tank über die verschiedenen Verfahrensansätze bis zum Verbleib aller bilanzierten Einzelkomponenten gesetzt. Andererseits wird realitätsnah beispielsweise der kumulierte Energieaufwand (KEA) auf die Betrachtung der LKW-Transporte und den Kraftstoffverbrauch beschränkt, ohne die Energieverbräuche für die Produktion der LKW einzubeziehen. Dieses Beispiel verdeutlicht die Komplexität eines Ökobilanzrahmens und ist nur mit Hilfe umfangreicher Detaildaten zu beherrschen [L29].

Im Rahmen der Studie [L28] werden bei der Bewertung von Entsorgungsoptionen z.B. die in der folgenden Tabelle 33 aufgeführten Wirkungskategorien der Sachbilanz zugeordnet. Im vorliegenden Fall sind diese Kriterien jedoch nicht insgesamt für die Vergleichsbetrachtung relevant bzw. lassen keine Unterschiede erwarten, die zu einer ökologischen Differenzierung führen. Von den nachfolgenden Wirkungskategorien sind deshalb insbesondere

- Ressourcen
- Humantoxizität
- Ökotoxizität

relevant. Aufgrund der benötigten Sachbilanz ist es auch nicht zielführend, diese Wirkungskategorien über alle folgenden Leitparameter abzubilden.

Tabelle 33: Wirkungskategorien lt. IFEU-Studie [L28] (Leitparameter), die für die vorliegende Studie zum Lagerstättenwasser relevanten Wirkungskategorien bzw. Leitparameter sind durch rote Schrift gekennzeichnet

Wirkungskategorie	Leitparameter
Ressourcen	Primärenergieträger
Treibhauseffekt	CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O
Fotooxidantenbildung	NO _x , CH ₄ , VOC, Benzol Toluol, Xylol
Eutrophierung, O ₂ -Zehrung	NO _x , NH ₃ , CSB, N-ges, NH ₄ , NO ₂ , P-ges
Humantoxizität	As, Benzo(a)pyren, Cr, Cd, Dioxin, Ni, Dieselruß
Ökotoxische Wirkung	NH ₄ , Cr, Zn

Aufgrund der vorliegenden Analysen werden die tatsächlich vorliegenden toxischen Komponenten des Lagerstättenwassers für eine Wirkungsbewertung herangezogen, ohne diese auf bestimmte Wirkungskategorien zu "normieren".

Umweltverträglichkeitsuntersuchungen (UVU)

Eine Umweltverträglichkeitsuntersuchung erfasst die Ermittlung, Beschreibung und Bewertung der unmittelbaren und mittelbaren Auswirkungen eines Vorhabens auf

1. Menschen, einschließlich der menschlichen Gesundheit, Tiere, Pflanzen und die biologische Vielfalt
2. Boden, Wasser, Luft, Klima und Landwirtschaft
3. Kulturgüter und sonstige Sachgüter sowie
4. die Wechselwirkung zwischen den vorgenannten Schutzgütern.

Eine *UVU* wird i.A. für genehmigungsrechtlich relevante Vorhaben im Sinne des Anhang 1 des *UVP-Gesetzes* durchgeführt und bindet vorzugsweise auch Landschafts- und Naturbetrachtungen entsprechend der *Fauna-Flora-Habitat-Richtlinie* ein. Die *UVU* umfasst regelmäßig folgende Punkte (die für den vorliegenden Fall relevanten Punkte sind durch fette Schrift hervorgehoben):

1. Beschreibung des Vorhabens mit Angaben über Standort, Art und Umfang sowie Bedarf an Grund und Boden,
2. Beschreibung der Maßnahmen, mit denen erhebliche nachteilige Umweltauswirkungen des Vorhabens vermieden, vermindert oder, soweit möglich, ausgeglichen werden, sowie der Ersatzmaßnahmen bei nicht ausgleichbaren, aber vorrangigen Eingriffen in Natur und Landschaft,
3. **Beschreibung der zu erwartenden erheblichen nachteiligen Umweltauswirkungen des Vorhabens unter Berücksichtigung des allgemeinen Kenntnisstandes und der allgemein anerkannten Prüfungsmethoden,**
4. Beschreibung der Umwelt und ihrer Bestandteile im Einwirkungsbereich des Vorhabens unter Berücksichtigung des allgemeinen Kenntnisstandes und der allgemein anerkannten Prüfungsmethoden sowie Angaben zur Bevölkerung in diesem Bereich, soweit die Beschreibung und die Angaben zur Feststellung und

Bewertung erheblicher nachteiliger Umweltauswirkungen des Vorhabens erforderlich sind und ihre Beibringung für den Träger des Vorhabens zumutbar ist,

5. **Übersicht über die wichtigsten, vom Träger des Vorhabens geprüften anderweitigen Lösungsmöglichkeiten und Angabe der wesentlichen Auswahlgründe im Hinblick auf die Umweltauswirkungen des Vorhabens,**
6. **Beschreibung der zu erwartenden erheblichen nachteiligen Umweltauswirkungen des Vorhabens unter Berücksichtigung des allgemeinen Kenntnisstandes und der allgemein anerkannten Prüfungsmethoden,**
7. **Übersicht über die wichtigsten, vom Träger des Vorhabens geprüften anderweitigen Lösungsmöglichkeiten und Angabe der wesentlichen Auswahlgründe im Hinblick auf die Umweltauswirkungen des Vorhabens.**

Auch wenn eine UVU für die angesprochenen Optionen zur Zeit (noch) nicht erforderlich ist, so lässt eine UVU methodisch doch die für eine ökologische Bewertung gewünschte Betrachtungstiefe erkennen.

Risiko- und Sicherheitsanalysen

Die zum Teil genormten Methoden der Risikoanalyse beziehen sich auf die Identifizierung einer Schadenseintrittswahrscheinlichkeit und das zugehörige Schadensausmaß, deren Produkt das „Technische Risiko“ beispielsweise eines Prozesses definiert. Auf der Basis von Risikoanalysen werden Sicherheitskonzepte unter Verfolgung bestimmter Schutzziele entwickelt, vergleiche hierzu u.a. [L30, L31, L32]. Solche Betrachtungen im Sinne von „Sicherheitsanalysen“ sind beispielsweise bei Störfallanlagen gefordert, die im Störfall durch Freisetzung bestimmter Stoffmengen eine „ernste Gefahr“ für die Umgebung hervorrufen. Aufgründessen sind entsprechende Sicherheitskonzepte zur Verhinderung von Schadenseintritten oder zur Begrenzung des Schadensausmasses gefordert.

Im vorliegenden Fall wird die Einhaltung des Standes der Sicherheitstechnik in allen Teilprozessen vorausgesetzt.

Für Risikobetrachtungen zum Beispiel einer Stofffreisetzung wird auch in Deutschland zunehmend auf probabilistische Methoden zur Referenzierung von Schadensstatistiken zurückgegriffen [L30]. Das Risiko wird sinnvollerweise mit Bezug auf einen bestimmten Wirkungspfad oder eine bestimmte Gefahrenlage definiert.

PIUS-Check®

Der Check zum Produktionsintegrierten Umweltschutz (PIUS) ist ein von der Effizienzagentur NRW (EFA) entwickeltes Verfahren, das vorzugsweise bei der Beratung von Unternehmen eingesetzt wird, um

- den Rohstoffeinsatz zu reduzieren,
- die Produktionskosten zu senken,
- den Ausschuss zu minimieren,
- die Produktqualität zu steigern und
- Emissionen zu vermeiden.

PIUS verfolgt damit im Sinne einer Produktionsverbesserung zwar von der vorliegenden Studie abweichende Ziele, die analytischen Ansätze z.B. bei der Ressourceneffizienz und Emissionsvermeidung sind aber vergleichbar.

Methode der Risikoquotienten nach UBA, Geringfügigkeitsschwellen

Mit [L15] hat das Umweltbundesamt ein Gutachten zu den „Umweltauswirkungen von Fracking“ vorgelegt, in welchem die Gefährdung durch Freisetzung eines Stoffes in die Umwelt auf die nachteilige Veränderung des Grundwassers bezogen wird. Als solche nachteilige Veränderung wird nach dem Besorgnisgrundsatz des *WHG* § 48 (1) ein Überschreiten der Geringfügigkeitsschwellenwerte der *LAWA GFS* angesehen. Diese beziehen sich aber nur auf den nutzbaren Teil des Grundwassers. Eine solche Unterscheidung ist wichtig, da auch tieferliegende Lagerstättenwässer (Formationswässer) rechtlich möglicherweise als Grundwasser angesehen werden könnten, auch wenn diese nicht für Mensch und Umwelt genutzt werden. Die Geringfügigkeitsschwellen beziehen sich wiederum auf Grenzwerte der Trinkwasserverordnung sowie auf human- und ökotoxikologische Wirkschwellen, z.B. PNEC (Predicted No Effect Concentration, d.h. keine Wirkung auf ein aquatisches Ökosystem) sowie auf Nachweisgrenzen bei der Analytik zum Zeitpunkt der Festlegung der Grenz- und Geringfügigkeitsschwellenwerte. Es wird definiert:

$$\text{Risikoquotient } R = \frac{\text{Stoffkonzentration im Fluid}}{\text{Beurteilungswert}}$$

Für Risikoquotienten legen die UBA-Gutachter eine willkürliche Grenze für ein hohes Gefährdungspotential bei > 1.000 . Definitionsgemäß besteht bei $R < 1$ kein Gefährdungspotential. Die Stoffkonzentration ist auf den jeweiligen Wirkungspfad bzw. Wirkungshorizont zu beziehen.

Tabelle 34: Geringfügigkeitsschwellenwerte anorganischer Stoffe für das Grundwasser im Vergleich mit den LaWa-Gehalten nach [U60] unter Angabe des Risikoquotienten, blaue Schrift: $100 < R < 1000$, rote Schrift: $R > 1000$

Anorganische Parameter	Geringfügigkeits-Schwellenwerte (GFS)	Produktions-gewichteter Mittelwert	Einheit	Risikoquotient R
Antimon (Sb)	5	1	µg/l	0,2
Arsen (As)	10	99	µg/l	9,9
Barium (Ba)	340	34.400	µg/l	101
Blei (Pb)	7	9.000	µg/l	1.285
Bor (B)	740	14.800	µg/l	20
Cadmium (Cd)	0,5	42	µg/l	84
Chrom (Cr III)	7	n.b.	µg/l	
Kobalt (Co)	8	2	µg/l	0,25
Kupfer (Cu)	14	9	µg/l	0,6
Molybdän (Mo)	35	21	µg/l	0,6
Nickel (Ni)	14	7	µg/l	0,5
Quecksilber (Hg)	0,2	44	µg/l	220
Selen (Se)	7	3	µg/l	0,4
Thallium (Tl)	0,8	48	µg/l	60
Vanadium (V) ⁴	[4]	6	µg/l	1,5
Zink (Zn)	58	1.480	µg/l	25
Chlorid (Cl ⁻)	250	48.000	mg/l	192
Cyanid (CN)	5 (50)	5	µg/l	1
Fluorid (F ⁻)	750	4760	µg/l	6,3
Sulfat (SO ₄ ⁻²)	240	201	mg/l	0,8

⁴ Vorläufige GFS

Tabelle 35: Geringfügigkeitsschwellenwerte ausgewählter organischer Stoffe für das Grundwasser im Vergleich mit den LaWa-Gehalten nach [U60] unter Angabe des Risikoquotienten, blaue Schrift: $100 < R < 1000$, rote Schrift: $R > 1000$

Organische Parameter	Geringfügigkeitsschwellenwert (GFS)	Produktionsgewichteter Mittelwert / Messwert	Einheit	Risikoquotient R
Σ Naphthalin u. Methyl-naphthaline	1	Naphthalin 239	$\mu\text{g/l}$	239
Kohlenwasserstoffe H53	100	8.520	$\mu\text{g/l}$	85,2
Σ Alkylierte Benzole BTEX	20	434.000	$\mu\text{g/l}$	21.700
Benzol	1	321.000	$\mu\text{g/l}$	321.000

In Tabelle 34 und Tabelle 35 werden Risikoquotienten > 1.000 mit **rot**, > 100 mit **blau** markiert. Danach ergibt sich für die Inhaltsstoffe im vorliegenden Lagerstättenwasser

- für Blei und BTEX bzw. Benzol ein hohes Umweltrisiko (> 1000)
- für Barium, Quecksilber, Chlorid, Naphthalin ein mittleres Umweltrisiko (100-1000) und
- für Arsen, Bor, Cadmium, Thallium, Vanadium, Zink, Fluorid ein erhöhtes Umweltrisiko ($>1-100$)

gegenüber den Grundwasser-Geringfügigkeitsschwellenwerten⁵.

Die Verbindung von Geringfügigkeitsschwellenwerten mit dem Risikoquotienten ermöglicht eine Abstufung des Gefährdungspotenzials bezogen auf einen Wirkungspfad, hier: das Grundwasser.

Bei der Anwendung von Stoffsummenparametern (wie z.B. BTEX) ist zu beachten, dass die Wirkungsstärke von Mischungen nur schwierig vorausszusagen ist. Aufgrund dieser Unzulänglichkeit der Wirkungsbewertbarkeit von Mischungen wird zusätzlich die Summe von Einzelstoffen nach oben begrenzt.

Besondere Vorsicht ist geboten bei einer pauschalen Anwendung der Geringfügigkeitsschwellenwerte. Hier ist im Einzelfall die Anwendbarkeit ähnlich den betrachteten Wirkungspfaden in der Bundesbodenschutzverordnung unter anderem vor

⁵ Hinweis: Die Geringfügigkeitsschwellenwerte (GFS) der LAWA weichen z.T. erheblich von den Umweltqualitätsnormen nach OGewV ab. Bei der Verwendung von Richtwerten sollte die genaue Definition beachtet werden.

dem Hintergrund bestehender Grundwasserbelastungen zu prüfen. Dadurch kann es im Einzelfall zur Akzeptanz wesentlich höherer Risikoquotienten als 1 kommen.

Für natürlich vorkommende radioaktive Stoffe (NORM) lassen sich in Anlehnung an das Konzept der Geringfügigkeitsschwellenwerte solche Gehalte von NORM-Stoffen der Zerfallsreihen U-238sec und Th-232sec als geringfügig ansehen, die die Trinkwasserverordnung einhalten. Im zweiten Schritt lassen sich diese Grenzen auf einen „Eintrag ins Grundwasser“ anwenden, wenngleich hierfür explizit keine Grenzwerte eingeführt wurden:

Tabelle 36: Bezugswerte nach *TrinkwV* („Grundwasserrelevanz“)

Nuklid	C _{i,ref} (Bq/L) TrinkwVO
U-238	3,0
U-234	2,8
Ra-226	0,5
Pb-210	0,2
Po-210	0,1
Ra-228	0,2

5.2 Gewähltes Vorgehen und Festlegung der Bewertungskriterien

Im vorliegenden Gutachten werden Elemente aus allen dargestellten Methoden verwendet, um eine Aussage zur ökologischen Bewertung eines Behandlungsverfahrens oder -konzeptes zur Lagerstättenwasser-Aufbereitung zu erhalten.

Die vorliegende Abhandlung ersetzt deshalb weder eine sicherheitstechnische Risikoanalyse noch eine Umweltverträglichkeitsuntersuchung oder eine Ökobilanz.

Bei der Variantenprüfung bleiben die Einflußgrößen „Kosten“ und „soziale Akzeptanz“ außer Acht.

Zur Bewertung der Konzeptvarianten (Optionen) in Abschnitt 4:

- Injektion von aufbereitetem Lagerstättenwasser ((M)KW-/Schwebstoffreinigung) ins Rotliegende,
- Verwertung eines mittels Dampfstrippung aufbereiteten salinaren Lagerstättenwassers zur Stabilisierung (Flutung) von Salzbergwerken
- Verdampfung des Lagerstättenwassers mit Ziel einer (Direkt-)Einleitfähigkeit und Entsorgung der aufkonzentrierten Verdampfungsrückstände
- Physikalisch-chemische Vorbehandlung des Lagerstättenwassers mit Ziel der Indirekteinleitung (Kläranlage)

wird folgendermaßen vorgegangen:

Nachhaltiger Umgang mit Lagerstättenwasser - Studie

- Stufe 1: Festlegung von ökologischen, ökotoxischen und Nachhaltigkeitskriterien
- Stufe 2: Festlegung der auf die einzelnen Prozessschritte der Optionen anzuwendenden Kriterien einschl. der Begründung eines Verzichts auf bestimmte Kriterien angesichts untergeordneter Relevanz für die Optionsauswahl.
- Stufe 3: Bewertung der Kriterienerfüllung für jede Option auf einer Skala von 1 (schlechteste Option) bis 5 (beste Option); die Zwischenstufen 2 bis 4 werden soweit wie möglich äquidistant festgelegt
- Stufe 4: Ranking der Kriterien untereinander: „weniger wichtig als - gleich wichtig wie – wichtiger als“, wobei die Graduierung logarithmisch über die Faktoren 0,1 – 1 – 10 erfolgt

Erheblich für diese Bewertung ist weniger das in Zahlen ausgedrückte Ranking-Ergebnis als die Nachvollziehbarkeit und Transparenz, die eine Einflußnahme von Einzelbewertungen auf das Gesamtergebnis erkennen lassen.

Die Kriterien, die zur Bewertung der ökologischen Vorteilhaftigkeit herangezogen werden, folgen der Logik des jeweiligen Prozessablaufs, wobei folgende Prozessschritte betrachtet werden:

1. Transport von der Übergabe des Lagerstättenwassers an der jeweiligen Anfallstelle per TKW zum Ort der Aufbereitung
2. Aufbereitung des Lagerstättenwassers zum Verbleib
3. Transport des aufbereiteten Lagerstättenwasser und der Rückstände (Abfälle) zum jeweiligen Verbleibsort
4. Verbleib des aufbereiteten Lagerstättenwasser und der Rückstände (Abfälle)

In den nachfolgenden Abschnitten sind die betrachteten Kriterien erläutert:

1. Ressourcenverbrauch
 - a. Primärenergieverbrauch durch Transporte und Aufbereitungsverfahren
 - b. Betriebs- und Hilfsmittelverbrauch einschl. Frischwasser
 - c. Art und Umfang des Platzbedarfs der Aufbereitungsanlage
2. Emission und Schadstofffreisetzung

- a. Freisetzungsrisiko beim Transport ohne NORM
 - b. Freisetzungsrisiko bei der Aufbereitung inkl. Lagerung ohne NORM
 - c. Verteilung der Radioaktivität, Strahlenexposition
 - d. (Verkehrs)lärm
3. Schadstoffverbleib und -verteilung
 - a. Gefährdungspotential nicht verwertbarer Rückstände einschl. NORM
 - b. Gefährdungspotential des aufbereiteten Lagerstättenwassers
4. Grundwasserschutz
 - a. Schutz des Grundwassers vor dem aufbereiteten Lagerstättenwasser
5. Nachhaltigkeit
 - a. Veränderung des Verbleibortes durch das aufbereitete Lagerstättenwasser
 - b. Beeinflussung der Langzeitstabilität des Verbleibortes durch das aufbereitete Lagerstättenwasser
 - c. Kapazität des Verbleibortes für Lagerstättenwasser und feste Abfälle
 - d. Langzeitstabilität des Verbleibortes der festen Abfälle und Rückstände

Bei der Bewertung nach den Punktzahlen können die Bewertungsrahmen variieren und sich z.B.

- am jetzigen IST-Zustand der Entsorgung oder
- üblichen Standardverfahren oder
- Durchschnittswerten aus dem Spektrum der betrachteten Optionen orientieren.

Zur Bewertung kann ebenfalls auf die gesetzlichen Grenz- und Richtwerte zurückgegriffen werden:

- Kennzeichnungsgrenzen nach Chemikalienrecht (*CLP-Verordnung*), Wasserrecht (Wassergefährdungsklassen WGK)
- Grenzwerte für die Abwassereinleitung (direkt, indirekt) nach Satzungsrecht/ Abwasserverordnung (*AbwV*)
- Einstufung nach Gefahrgutrecht (*ADR*)
- Einstufung als gefährlicher Abfall nach Abfallverzeichnisverordnung (*AVV*)
- Beurteilungswerte nach Strahlenschutzverordnung (*StrlSchV*) für NORM-Stoffe
- Deponiegrenzwerte nach Deponieverordnung (*DepV*) etc.

In den folgenden Abschnitten sind die Bewertungskriterien im Einzelnen erläutert.

Tabelle 37: Betrachtete Kriterien der Teilprozesse Transport – Aufbereitung - Transport – Verbleib

Bewertungskriterium	Transport LaWa	Aufbereitung	Transport Rückstände	Verbleib
<u>Ressourcenverbrauch</u>				
Primärenergieverbrauch	X	X	X	
Betriebs- und Hilfsmittelverbrauch einschl. Frischwasser		X		
Art und Umfang des Platzbedarfs der Aufbereitungsanlage		X		
<u>Emission und Schadstofffreisetzung</u>				
Freisetzungsrisiko Transport ohne NORM	X		X	
Freisetzungsrisiko Aufbereitung einschl. Lagerung (ohne NORM)		X		
Verteilung der Radioaktivität, Strahlenexposition	X	X	X	
(Verkehrs)lärm	X		X	
<u>Schadstoffverbleib und -verteilung</u>				
Gefährdungspotential nicht verwertbarer Rückstände einschl. NORM				X
Gefährdungspotential des aufbereiteten LaWa				X
<u>Grundwasserschutz</u>				
Schutz des Grundwassers vor dem aufbereiteten LaWa				X
<u>Nachhaltigkeit</u>				
Veränderung des Verbleibortes durch das aufbereitete LaWa				X
Beeinflussung der Langzeitstabilität des Verbleibortes durch das aufbereitete LaWa				X
Kapazität des LaWa/Abfall-Verbleibortes				X
Langzeitstabilität des Verbleibortes der festen Abfälle/Rückstände				X

5.3 Ressourcenverbrauch

Der Verbrauch an Ressourcen lässt sich bei den ausgewählten Optionen zur längerfristigen und nachhaltigen Behandlung des Lagerstättenwassers auf die Aspekte des Primärenergieverbrauchs (Transport und Vorbehandlung), des Verbrauchs an Betriebsstoffen und Hilfsmaterialien für die Aufbereitung und gegebenenfalls auf den Flächenverbrauch für den/die Anlagenstandorte, einschl. Umschlag und Lagerflächen, konzentrieren. Ressourcen für Zulieferungs- und Nebenprozesse wie die bereits erwähnte Transportfahrzeugherstellung werden nicht betrachtet.

5.3.1 Primärenergieverbrauch

Zur besseren Vergleichbarkeit lassen sich Energieverbräuche (thermisch, elektrisch) auf den Verbrauch an Primärenergieträgern (Erdgas, Kohle, Erdöl) umrechnen.

Hierzu wird zum einen der direkte Verbrauch des Energieträgers für den Transport oder das Verfahren als primärer Energieträger angegeben; für ältere Angaben gilt 1 kWh = 3,6 MJ:

1. **Diesel/Leichtes Heizöl (HEL)** mit mindestens 42 MJ/kg als unterer Heizwert nach DIN 51603
2. **Schweres Heizöl** mit 39,5 MJ/kg als unterer Heizwert
3. **Erdgas** mit ca. 32,4 MJ/Nm³ als unterer Heizwert

Vereinfachend wird auf die Raffinate wie Diesel/HEL anstatt auf Rohöl als Primärenergieträger bezogen. Die Frage der jeweiligen Energieverwertung der Verbrauchsprozesse (Effizienz, Wirkungsgrade) der LKW-Motoren beim Transport oder der eingesetzten Energieverbraucher in der Verfahrenstechnik muss einer weitergehenden Betrachtung vorbehalten bleiben und hätte den Rahmen dieser Studie gesprengt. Die meisten Verbrauchsangaben der Aufbereitungsverfahren wurden aufgrund von Angebotsdaten von Anlagenherstellern oder auf Basis von Erfahrungswerten der Fa. Aquaconsult, Hannover [U49, U50, U55], beigesteuert.

Um aus den Energieverbräuchen an **elektrischem Strom** aus deutschen Netzen auf einen Primärenergieträger umrechnen zu können, müssen die Umwandlungsprozesse betrachtet

werden (streng genommen also auch die Rohölraffination). Dabei wird in der vorliegenden Studie nicht auf den KEA der verschiedenen Energieumwandlungsverfahren (Kohleverstromung, Windenergie, Atomstrom u.a.) zurückgegriffen - zumal die Problematik eines vergleichbaren Bilanzrahmens besteht -, vielmehr wird ein direktes Öl-Heizkraftwerk und sein Wirkungsgrad zur Umrechnung verwendet.

Das Ölkraftwerk Ingolstadt der Fa. E.ON weist laut Firmenbroschüre eine elektrische Nennleistung von 386.000 kWh bei einem Brennstoffverbrauch von 90.000 kg/h schweres Heizöl auf. Bei mindestens 39,5 MJ/kg lt. Broschüre für schweres Heizöl werden also 9,21 MJ Schweröl je kWh erzeugter elektrischer Energie benötigt. Dies entspricht einem Gesamtwirkungsgrad von ca. 39 %. Laut der IFEU-Studie über Entsorgungsoptionen [L28] wird ein spezifischer KEA von Primärenergie zu elektrischer Energie von 12,5 MJ/kWh angegeben.

In der vorliegenden Studie wird vereinfachend ein Umrechnungsfaktor von

1 kWh elektrisch	=	9 MJ Primärenergieträger (Diesel)	
bzw. 1 MJ elektrisch	=	2,5 MJ Primärenergieträger (Diesel)	verwendet.

Unter Verwendung dieser Bezugsgröße auf Primärenergieträger lassen sich alle verwendeten Energieverbräuche vergleichen.

Ebenso wie der Umstieg auf erneuerbare Energien die Ressourcen der Primärenergieträger auf fossiler Basis schonen würde, so trägt eine Verbesserung der Effizienz auf der Verbraucherseite z.B. durch Einsatz energiearmer Verfahren oder Wärmerückführung zu einer Ressourcenschonung bei. Gegebenenfalls muss vor diesem Hintergrund unter Erweiterung des Bilanzrahmens eine Neubewertung einzelner Verfahren wie das der Verdampfung vorgenommen werden, was angesichts der transparenten Vorgehensweise möglich ist.

5.3.1.1 Transporte

Folgende Teilprozesse des Transportes sind zu nennen:

1. Transport des Lagerstättenwasser von der Anfallstelle zur zentralen Aufbereitung bzw. Vorbehandlungsanlage
2. Transport von Betriebsmitteln und Hilfsstoffen (Verbrauchsmaterial) zur zentralen Aufbereitung (untergeordnet)
3. Abtransport von Abfällen/Rückständen aus der Aufbereitung zur Entsorgung
4. Abtransport des aufbereiteten Lagerstättenwasser

Die Anlieferung von Betriebsmitteln und Hilfsstoffen für die Aufbereitung gemäß Punkt 2 kann aufgrund der wenigen Transporte vernachlässigt werden. Auch der Abtransport gem. Punkt 4 des aufbereiteten Lagerstättenwassers ist nur dann von Bedeutung, wenn der Aufbereitungsort mit dem Verbleibort nicht identisch ist; dies könnte bei der Verbringung in ein Salzbergwerk der Fall sein.

Der Energieverbrauch des Transportes hängt u.a. von der Art des Fahrzeuges, der Beladung, der Fahrtstrecke, der Streckenführung, der Auslastung und dem Verbrauch ab. Es wird mit folgenden Annahmen gearbeitet:

Tabelle 38: Konstanten und Variablen für die Transportberechnungen

Konstanten	Wert
Fahrzeugart/Beförderungsmittel	TKW
Transportbeladung	25 Mg
Streckenführung	Landstraße
Auslastung	Die Auslastung der Hin- und Rückfahrten wird nicht differenziert, sondern die unterschiedliche Beladung/Auslastung über einen mittleren Kraftstoffverbrauch berücksichtigt
Dieserverbrauch	30 L/ 100 km, entsprechend 0,3 L/km
Energiedichte	9,8 kWh/L bzw. bei Dichte 0,83 kg/L 42,5 MJ/kg
Energieverbrauch	2,94 kWh/km = 10,584 MJ/km
Variable	Wert
Fahrtstrecke hin und zurück, gesamt	Km

In den nachfolgenden Tabellen werden die ermittelten Entfernungen mittels www.maps.google.de zugrundegelegt. Dabei werden als Zielorte verwendet:

1. Die Bohrung Völkersen Nord Z3 als geplante Injektionsstelle ins Rotliegende.
2. Das Salzbergwerk „Mariagluck“ in Höfer bei Celle als Beispiel für die Bergwerksflutung, die Entfernung von der zentralen Aufbereitungsanlage (z.B. Völkersen) nach Mariagluck beträgt 99 km.
3. Die Umgebung des Klärwerks Verden/Aller bzw. Völkersen als Aufstellungsort für eine zentrale physik.-chem. Aufbereitungsanlage zur anschließenden Einleitung in den Vorfluter bzw. über Klärwerk in Vorfluter.
4. Eine mittlere Entfernung von 100 km vom Ort der zentralen Aufbereitung bzw. der Injektionsstelle zur Entsorgung der bei der Aufbereitung anfallenden Abfälle; bei den Abfallabtransporten wird zunächst über die Verfahrensauswahl die anfallende Abfallmenge ermittelt und mit jeweils 25 Mg bzw. m^3 je Ladung die Anzahl der Fahrten und damit die Gesamtstrecke ermittelt.

Der angegebene Energieverbrauch (GJ/a) ergibt sich aus den Fahrtkilometern (hin/zurück) multipliziert mit dem spezifischen Energieverbrauch von $10,854 \text{ MJ/km}$ (Tabelle 38) und lässt sich auf die Transportmenge an Lagerstättenwasser beziehen ($\text{GJ/m}^3 \text{ LaWa}$).

Tabelle 39: Übersicht der für die Option 1 „Injektion VK-N Z3“ ermittelten Daten

Verbleib	Parameter	Transport LaWa zur Aufbereitung ⁶	Transport Abfälle zur Entsorgung	Transport LaWa zum Verbleibort
Injektion VK-N Z3	km/a hin	77.960,5	400	Entfällt
	km/a hin/zurück	155.921,0	800	
	Transportmenge Mg bzw. m³	120.268,0	ca. 82 (Tellerseparator)	Entfällt
	Anzahl Fahrten a 25 Mg bzw. m³	4.811,0	ca. 4	Entfällt
	GJ/a	1.650,3	8,5	Entfällt
	GJ/m³ LaWa	0,0137	0,0001	Entfällt

⁶ Jeweils Straßenentfernung nach www.maps.google.de für kürzeste Strecke von den jeweiligen Anfallstellen zur Völkersen Nord Z3 (Düvelshagen/Langwedel).
Die LaWa-Transportmenge ergibt sich aus der Summe der einzelnen Förderstellen.

Tabelle 40: Übersicht der für die Option 2 „Flutung Salzbergwerk“ ermittelten Daten

Verbleib	Parameter	Transport LaWa zur Aufbereitung ⁷	Transport Abfälle zur Entsorgung	Transport LaWa zum Verbleibort
Salzbergwerk Mariagluck	km/a hin	91.044,9	500	475.200
	km/a hin/zurück	182.089,8	1000	Verden-Mariagluck entfällt, wenn Aufbereitung am Bergwerk, dann 450.311,6 km für Antransport Lawa
	Transportmenge in m ³ / Mg	120.268,0	ca. 92 Aufbereitung durch Dampfstrippung/A-Kohle	ca. 120.000 entfällt, wenn Aufbereitung am Bergwerk
	Anzahl Fahrten a 25 Mg bzw. m ³	4.811,0	ca. 5	4.800 entfällt, wenn Aufbereitung am Bergwerk
	GJ/a	1.927,2	10,6	5.030 entfällt, wenn Aufbereitung am Bergwerk
	GJ/m ³ LaWa	0,0160	0,0001	0,0419 entfällt, wenn Aufbereitung am Bergwerk

⁷ Jeweils Straßenentfernung nach www.maps.google.de für kürzeste Strecke von den jeweiligen Anfallsstellen zum Salzbergwerk Mariagluck (Höfer/Celle) und zum Klärwerk Verden/Aller. Die LaWa-Transportmenge ergibt sich aus der Summe der einzelnen Förderstellen.

Tabelle 41: Übersicht der für die Option 3a „Direkteinleitung/Verdampfung“ ermittelten Daten

Verbleib	Parameter	Transport LaWa zur Aufbereitung ⁸	Transport Abfälle zur Entsorgung	Transport LaWa zum Verbleibort
Verdampfung (Verden)	km/a hin	91.044,9	5.050	Einleitung, entfällt
	km/a hin/zurück	182.089,8	10.100	
	Transportmenge in m ³ / Mg	120.268,0	12.500 m ³ mit TDS 850 g/L A-Kohle: 173/120 Mg/a	Einleitung, entfällt
	Anzahl Fahrten a 25 Mg	4.811,0	505	Einleitung, entfällt
	GJ/a	1.927,2	106,9	Einleitung, entfällt
	GJ/m ³ LaWa	0,0160	0,0009	Einleitung, entfällt

Tabelle 42: Übersicht der für die Option 3b „Indirekteinleitung“ ermittelten Daten

Verbleib	Parameter	Transport LaWa zur Aufbereitung ⁹	Transport Abfälle zur Entsorgung	Transport LaWa zum Verbleibort
CP-Behandlung (Verden)	km/a hin	91.044,9	32.800	Einleitung, entfällt
	km hin/zurück	182.089,8	65.600	
	Transportmenge in m ³ / Mg	120.268,0	8.200 mit 40 % TS	Einleitung, entfällt
	Anzahl Fahrten a 25 Mg	4.811,0	328	Einleitung, entfällt
	GJ/a	1.927,2	694,3	Einleitung, entfällt
	GJ/m ³ LaWa	0,0160	0,0057	Einleitung, entfällt

⁸ Jeweils Straßenentfernung nach www.maps.google.de für kürzeste Strecke von den jeweiligen Anfallstellen zum Klärwerk Verden/Aller.

Die LaWa-Transportmenge ergibt sich aus der Summe der einzelnen Förderstellen.

⁹ Jeweils Straßenentfernung nach www.maps.google.de für kürzeste Strecke von den jeweiligen Anfallstellen zum Klärwerk Verden/Aller.

Die LaWa-Transportmenge ergibt sich aus der Summe der einzelnen Förderstellen.

Tabelle 43: Übersicht der für den Ist-Zustand ermittelten Daten [U27]

Verbleib	Parameter	Transport LaWa
IST-Zustand	km/a	600.000
	Transportmenge in m ³ / Mg	120.268
	Anzahl Fahrten a 25 Mg	4.811
	GJ/a	6350,4
	GJ/m ³ LaWa	0,0528

In die vorgenannte Tabelle 43 ist der IST-Energieverbrauch aufgenommen, der als Bezugsreferenz herangezogen werden kann, und sich aus den derzeitigen LaWa-Transporten zur Entsorgung/Injektion, s. Kapitel 2.4, ergibt [U27].

Aufgrund der anteiligen Transportschritte ergibt sich für die einzelnen Optionen folgender Gesamtenergieanteil, wobei ein Energiebedarf von 10,584 MJ/km aus dem Dieserverbrauch („Primärenergieträger“ Diesel, eigentlich: Rohöl) zugrunde gelegt wird. Der Gesamtenergieverbrauch für die 4 Optionen und die derzeitige IST-Situation 2012/2013 wird als spezifischer Gesamtenergieverbrauch auf die Lagerstättenwassermenge (Summe der betrachteten Anfallstellen 2013) bezogen; damit sind die einzelnen Optionen direkt vergleichbar:

Tabelle 44: Spezifische Gesamtenergieverbräuche der Transporte von LaWa und Abfällen aus der Aufbereitung bis zum Verbleib

Option	MJ/m ³ LaWa Transport einschl. Abfälle
Injektion VK-N Z3	13,8
Salzbergwerk Mariagluck	58,0
Verdampfung (Verden)	16,9
CP-Behandlung (Verden)	21,7
IST-Zustand	52,8

5.3.1.2 Aufbereitungsverfahren

Die in den betrachteten Optionen ausgewählten Aufbereitungsverfahren sind:

- Option 1: Aufbereitung mit Schwerkraftabscheidung am Beispiel „Tellerseparator“ zur Entfernung und Entsorgung abscheidbarer Kohlenwasserstoffe und abfiltrierbarer Stoffe vor Injektion ins Rotliegende
- Option 2: Dampfstrippung zur Entfernung wasserdampfgefährlicher organischer Bestandteile, insbesondere BTEX, zur Vorbereitung der Verwendung des aufbereiteten Lagerstättenwasser als Flutungsmittel im Kalibergbau
- Option 3a: Verdampfung/Kondensation des Lagerstättenwasser zur Herstellung der Einleitfähigkeit in einen Vorfluter (Direkteinleitung) oder in einen Schmutzwasserkanal (Indirekteinleitung) nach Vorbehandlung mit Aktiv-Kohle; Entsorgung der Verdampfungsrückstände
- Option 3b: physikalisch-chemische LaWa-Vorbehandlung mittels Fällung/Flockung, Filtration und Dampfstrippung/Adsorption mit dem Ziel einer Indirekteinleitung und Behandlung in einer (kommunalen) Kläranlage

Die Energiebeiträge der Aufbereitungs- und Vorbehandlungsstufen sind vorwiegend

- elektrisch (Pumpen, Rührwerke etc.)
- thermisch (Dampferzeuger/Gasbefeuerung)

Die folgenden Angaben der Energieverbräuche erfolgen für die Verfahrensteilschritte auf Basis von verfahrenstechnischen Erfahrungen und Auslegungen der Fa. Aquaconsult [U50, U55] und werden auf spezifische Energieverbräuche je m³ Lagerstättenwasser umgerechnet.

Für Erdgas L aus Niedersachsen wird lt. RWE-Dea-Analyse [U30] ein Heizwert von 9 kWh/(N)m³ angesetzt, entsprechend 32,4 MJ/(N)m³. Die Umrechnung der elektrischen Energie auf Diesel als (Primär)energieträger erfolgt vereinfachend mit:

1 kWh elektrisch = 9 MJ Primärenergieträger (Diesel)
bzw. 1 MJ elektrisch = 2,5 MJ Primärenergieträger (Diesel)

Hinweis: Unberücksichtigt bleiben die Energiebeiträge, die zur Einbringung des aufbereiteten Lagerstättenwasser in den jeweiligen Verbleibort benötigt werden: z.B. Förderpumpen zur Einleitung oder Einbringung in den Verbleibort (Rotliegend, Kalibergwerk, Vorflut, Schmutzwasserkanal). Bei der Injektion kann zudem von einem hydrostatischen Unterdruck im Rotliegenden ausgegangen werden, der keinen zusätzlichen Energieaufwand für die Injektion selbst erforderlich macht.

Tabelle 45: Energiebeiträge der Aufbereitungsverfahren der Optionen

	Aufbereitung zur Injektion (Tellerseparator) Option 1	Aufbereitung zur Flutung im Salzbergwerk (Dampfstrippung) Option 2	Aufbereitung zur Direkteinleitung (Verdampfung) Option 3a	Aufbereitung zur Indirekteinleitung und Behandlung im kommunalen Klärwerk Option 3b
elektrischer Energiebeitrag pro Jahr	970.000 kWh = 3.492 GJ	1.006.660 kWh = 3.624 GJ	4.557.920 kWh = 16.408 GJ	1.215.669 kWh = 3.842 GJ
Thermischer Energiebeitrag pro Jahr	entfällt.	582.540 m³ Gas = 5.242.860 kWh = 18.874 GJ	2.940.538 m³ Gas = 26.464.842 kWh = 95.273 GJ	582.540 m³ Gas = 5.242.860 kWh = 18.874 GJ
Primärenergie (Diesel) gesamt pro Jahr, berechnet	8.730 GJ	27.934 GJ	136.293 GJ	28.479 GJ
Jährliche Behandlungsmenge LaWa (Auslegungsbasis) ¹⁰	ca. 130.000 m³	ca. 130.000 m³	ca. 130.000 m³	ca. 130.000 m³
Spez. Energieverbrauch je m³ LaWa	67,2 MJ/m³	214,9 MJ/m³	1.048,4 MJ/m³	219,1 MJ/m³
Zusätzl. Energiebedarf für Kläranlage	entfällt	entfällt	unberücksichtigt: Förderung zur Direkteinleitung	1,98 MJ/m³

¹⁰ Maximalrate für 2014/2015, bis 2030 kontinuierlich abnehmend

Für die an eine Indirekteinleitung anschließende Klärwerkstechnik wird die Behandlung eines kommunalen Schmutzwassers angenommen. Hierbei wird von folgenden Eckdaten ausgegangen:

Für den Stromverbrauch einer Kläranlage geben verschiedene Quellen einen Wert zwischen 30 – 70 kWh/EW*a an [L33]. Laut [L34] beträgt der Energieverbrauch für die gesamte Abwasserreinigung und alle damit verbundenen Prozesse etwa 50 kWh/EW*a für eine mittelgroße Kläranlage.

Die Bezugsgröße „EW“ (Einwohnerwert) setzt sich dabei aus der Einwohnerzahl (E) und den Einwohnerequivalenten des gewerblichen Abwassers (EGW) zusammen:

$$EW = E + EGW$$

Eine Umrechnung E zu EGW erfolgt normalerweise lt. [L35] über einen CSB-Zulauf von 120 g/EW*d; die Umrechnung von Einwohnern auf m³ kann über den Tagesschmutzwasseranfall von 250 L/d bzw. 91 m³/a erfolgen¹¹.

Damit entspricht ein Energiebedarf von 1 kWh/m³ einem Wert von 91 kWh/EW*a.

Folgt man den Angaben des Statistischen Bundesamtes [L36] für 2010 so errechnet sich ein Wert von 41,9 m³/a mithin 41,9 kWh/EW*a. Für die mittelgroße Kläranlage ergibt sich andererseits bei 50 kWh/EW*a hieraus ein **spezifischer Energiebedarf von 1,19 kWh/m³ oder 4,3 MJ/m³**.

Tabelle 46: Energiebeiträge der Aufbereitungsverfahren der Optionen

Option	MJ/m ³ LaWa, aufbereitet
Injektion VK-N Z3	67,2
Salzbergwerk Mariagluck (Flutung)	214,9
Verdampfung (Einleitung)	1.048,4
CP-Behandlung (Indirekteinleitung)	221,1
Vergleich mittelgroße Kläranlage für kommunales Abwasser	4,3

¹¹ Bei einem CSB des Lagerstättenwassers von ca. 2.980 mg/L bzw. ca. 360.000 kg/a errechnet sich, lediglich auf den CSB-Schmutzanteil sauerstoffzehrender Bestandteile bezogen, ein Einwohnerwert EW von ca. 8200. Dies entspricht einer Kläranlage der Größenklasse 3 von 5. Andere Abwasserinhaltsstoffe (Chlorid, Schwermetalle, BTEX/KW, NORM etc.) sind durch entsprechende Vorbehandlung auf den Anteil der jeweiligen Indirekteinleitungsverordnung bzw. Kommunalsetzung zu reduzieren.

Der geringe Energieverbrauch von Kläranlagen gegenüber physikalisch-chemischen bzw. thermischen Aufbereitungsanlagen ergibt sich aufgrund der vorwiegend biologischen Abwasserbehandlung und beruht hauptsächlich auf dem Betrieb von Rechen/Sieben und Pumpen, s. [L37].

Als Gesamtbilanz für den Ressourcenverbrauch an Energieträgern ergibt sich für den Transport des Lagerstättenwassers zur Aufbereitung, die Aufbereitung und den Abtransport der Abfälle sowie evtl. den Transport des aufbereiteten Lagerstättenwassers zum Bergwerk Mariagluck folgende Gesamtbilanz:

Tabelle 47: Gesamtenergiebedarf für Transport LaWa, Aufbereitung und Abfalltransport

Option	MJ/m ³ Transport	MJ/m ³ Aufbereitung	MJ/m ³ Gesamt
Injektion VK-N Z3	13,8	67,2	81,0
Salzbergwerk Mariagluck (Flutung)	58,0	214,9	272,9
Verdampfung (Einleitung)	16,9	1.048,4	1.065,3
CP-Behandlung (Indirekteinleitung)	21,7	225,4	247,1
IST-Zustand	52,8	Unberücksichtigt, da z.Z. nur für 6 % des LaWa relevant	(52,8)

Gegenüber dem IST-Stand, bei welchem auf eine Aufbereitung des Lagerstättenwasser weitgehend verzichtet wird/werden kann bzw. nur für einen geringen Anteil praktiziert wird, der über Entsorger aufbereitet wird, sind alle künftigen Alternativen energetisch ungünstiger. Der (spezifische) Energieverbrauch wird durch das Aufbereitungsverfahren dominiert, wodurch die IST-Variante auch durch Verzicht auf eine Aufbereitung besonders günstig erscheint. Energetisch ist die Injektion vorzuziehen, wohingegen die Verdampfung die energetisch ungünstigste Variante darstellt.

Für den zusammenfassenden Vergleich der Optionen fließen die Sachergebnisse wie folgt in die Bewertungsmatrix ein:

Tabelle 48: Bewertung des Gesamtenergiebedarfs für Transport LaWa, Aufbereitung

Option	Beschreibung	Bewertung 1: schlechteste Option 5: beste Option	Bemerkungen
1	Injektion (VK-N Z3)	5	
2	Flutung in ein Salzbergwerk (Mariagluck, Höfer)	4	Stark von Lage und Ort der Aufbereitung gegenüber den Anfallstellen bestimmt; Bewertung gilt nur für KW/BTEX-Entfernung
3a	Direkteinleitung (Verdampfung)	1	
3b	Indirekteinleitung (CP-Anlage)	4	

5.3.2 Betriebs- und Hilfsmittelverbrauch

Der Betriebs- und Hilfsmittelverbrauch ist nur bei der Aufbereitung in Betracht zu ziehen. Er umfasst die Verbräuche z.B. an Verbrauchsmaterialien für die Behandlung wie Flockungsmittel und Flockungshilfsmittel, Fällmittel, Aktivkohle, Frischwasser etc. und die für den Betrieb und Wartung erforderlichen Hilfsstoffe wie Reinigungsprodukte für Membranen u.ä.

Kraftstoffe und andere Energieverbräuche finden über die Transportaufwendungen Berücksichtigung, Beiträge aus dem Unterhalt von Nebeneinrichtungen (Öle, Pflegemittel etc.) bleiben aufgrund des für alle Optionen geringen und ähnlichen Beitrags unberücksichtigt.

Die Verbräuche basieren auf den Auslegungen und Erfahrungswerten nach [U50, U55] bzw. einer dort zitierten Studie [U56] und wurden teilweise von Anlagenherstellern übernommen.

Tabelle 49: Verbrauchs- und Hilfsmittelbedarf in den Aufbereitungsverfahren

	Aufbereitung zur Injektion (Tellerseparator) Option 1	Aufbereitung zur Flutung im Salzbergwerk (Dampfstrippung) Option 2	Aufbereitung zur (Direkt)einleitung (Verdampfung) Option 3a	Aufbereitung zur Indirekteinleitung und Behandlung im kommunalen Klärwerk Option 3b
Fällmittel	0	0	0	2.925 Mg/a
Flockungsmittel	0	0	0	0
Flockungshilfsmittel	0	0	0	2.600 kg/a (0,02 kg/m³)
Aktivkohle	0	nur wenig für Abluft, keine LaWa- Nachreinigung	120 Mg/a (173 Mg/a)	Keine Angaben
Säure/Lauge	50 m³/a	260 m³/a	0	Keine Angaben
Spez. Hilfsstoffe	0	Biozide f. Reingg.	0	Keine Angaben
Jährliche LaWa- Auslegungsmenge	130.000 m³	130.000 m³	130.000 m³	130.000 m³
Spez. Chemikalien- verbrauch	0,4 kg/m³	2 kg/m³	0,9 kg/m³	22,5 kg/m³ ohne A-Kohle und Klärwerkver- bräuche

Als Bezugsgröße kann man sich sinnvollerweise nur auf die Bandbreite der Optionen selbst beziehen: 0,4 bis 22,5 kg/m³, mithin im Mittel 6,5 kg/m³.

Es wird deutlich, dass einleitfähige Konzentrationswerte der Schadstoffe ohne ein Verdünnen/Verschneiden mit anderen Abwasserströmen nur mit einem hohen Aufwand an Chemieprodukten für Fällung/Flockung/Adsorption zu erzielen sind. Dies wäre vertretbar, wenn nicht zugleich die zugesetzten Chemikalien als schadstoffbelastete Abfälle anfallen würden. Verfahren, die ohne aufwändige (chemische) Aufbereitung auskommen – wie Injektion und Verdampfung – liegen beim Chemieverbrauch entsprechend günstig.

Für den zusammenfassenden Vergleich der Optionen fließen die Sachergebnisse wie folgt in die Bewertungsmatrix ein:

Tabelle 50: Bewertung des Verbrauchs- und Hilfsmittelbedarf in den Aufbereitungsverfahren

Option	Beschreibung	Bewertung 1: schlechteste Option 5: beste Option	Bemerkungen
1	Injektion (VK-N Z3)	5	
2	Flutung in ein Salzbergwerk (Mariagluck, Höfer)	5	
3a	Direkteinleitung (Verdampfung)	5	ohne Berücksichtigung von erhöhtem Materialverschleiß durch Scaling
3b	Indirekteinleitung (CP-Anlage)	1	

5.3.3 Art und Umfang des Platzbedarfs

Der Platzbedarf (Zusatzbedarf an unversiegelten Flächen) für Umschlagflächen, Lagerflächen (LaWa, Material und Hilfsstoffe, Abfälle/Rückstände etc.) und für die Aufbereitungsanlage selbst ist für die betrachteten zentralen Aufbereitungsoptionen von untergeordneter Bedeutung und kann mit unter 1000 m² veranschlagt werden. Die Zahlenangaben für die Aufbereitung in der nachfolgenden Tabelle stammen wieder aus den Auslegungen nach [U55].

Die Errichtung der Aufbereitungsanlage erfolgt im engen räumlichen Zusammenhang mit bereits bestehenden Betriebsanlagen oder Gewerbeflächen, sodass keine zusätzlichen landwirtschaftlichen Nutzflächen oder Naturgebiete (unversiegelte Flächenbeiträge) hierfür kalkuliert werden müssen. Das Kriterium wurde dennoch aufgenommen, um einen Bezugswert für weitere Optionen wie dezentrale Aufbereitungsanlagen und einen LaWa-Transport über Rohrleitungen zu haben, vgl. hierzu Kapitel 7.1.

Als Kenngröße wurde der zusätzliche Flächenbedarf in m² gewählt, wobei als Bezugsreferenz ein Platzbedarf eines Sondenplatzes gewählt wurde (ca. 2.000 m²). Es handelt sich durchweg um bereits erschlossene Industrie- bzw. Gewerbeflächen.

Tabelle 51: Flächenbedarf der Aufbereitungsverfahren

	Aufbereitung zur Injektion (Tellerseparator) Option 1	Aufbereitung zur Flutung im Salzbergwerk (Dampfstrippung) Option 2	Aufbereitung zur (Direkt)einleitung (Verdampfung) Option 3a	Aufbereitung zur Indirekteinleitung und Behandlung im kommunalen Klärwerk Option 3b
Platzbedarf Vorbehandlung ¹²	250 m ²	300 m ²	300 m ²	Ca. 800 m ²
Zusätzliche Umschlagflächen ¹³	200 m ²	300 m ²	400 m ²	600 m ²
Bezugsfläche Sondenplatz	2.000 m ²	2.000 m ²	2.000 m ²	2.000 m ²
Faktor	0,225	0,3	0,35	0,7

Alle Flächenbedarfe liegen deutlich unter der Größe eines Sondenplatzes (ca. 22 bis 70 % eines Sondenplatzbedarfes) und betreffen größtenteils bereits versiegelte Flächen. Die Optionen zeigen keine signifikanten Unterschiede. Dezentrale Aufbereitungsanlagen sind hinsichtlich des Flächenverbrauchs deutlich schlechter zu bewerten, geschätzt bis zu einem Gesamtbedarf von 3-4 Sondenplätzen.

Für den zusammenfassenden Vergleich der Optionen fließen die Sachergebnisse wie folgt in die Bewertungsmatrix ein:

¹² Angaben nach [U55] bzw. eigene Schätzung

¹³ Abgeschätzt anhand der Umschlagplätze für Container und TKW-Be-/Entladung

Tabelle 52: Bewertung des Platzbedarfs der Aufbereitung

Option	Beschreibung	Bewertung 1: schlechteste Option 5: beste Option	Bemerkungen
1	Injektion (VK-N Z3)	3	
2	Flutung in ein Salzbergwerk (Mariagluck, Höfer)	3	
3a	Direkteinleitung (Verdampfung)	3	
3b	Indirekteinleitung (CP-Anlage)	3	

5.4 Emission und Schadstofffreisetzung

Eine wesentliche Umweltwirkung üben die Emissionen bzw. konkret die Schadstofffreisetzungen aus.

Bei allen Anlagen zur Aufbereitung und beim Transport ist von einer regelkonformen Handhabung entsprechend dem Stand der Sicherheitstechnik auszugehen. Aus diesem Grund und aufgrund der Menge und Art der gehandhabten Stoffe ist nicht von einer Störfallrelevanz im Sinne der StörfallV auszugehen. Es müssen jedoch die möglichen Stofffreisetzungen bei Straßenunfällen oder bei der Lagerung bzw. Aufbereitung als Risiken bewertet werden.

Entsprechend der Prozesskette bestehen Freisetzungsrisiken hauptsächlich

- beim Transport des Lagerstättenwassers zur Aufbereitung
- bei Lagerung und Aufbereitung
- beim Transport der Abfälle/Rückstände

Entsprechend der Definition des Technischen Risikos gilt:

Technisches Risiko $R = \text{Eintrittswahrscheinlichkeit } W \times \text{Schadensausmaß } S$.

In einer Risikomatrix lassen sich W , S und R qualitativ wie folgt klassifizieren, vgl. u.a. www.caq4-qualitätsmanagement.com:

W = nicht glaubhaft, unwahrscheinlich, möglich, wahrscheinlich

S = geringfügig, begrenzt, schwerwiegend, katastrophal

R = hoch, erhöht, mittel, gering

Für (Straßen-)Transporte lässt sich ein Schadeneintritt am besten über die Unfallstatistik im Güterverkehr abschätzen. Das Schadensausmaß, d.h. hier: Freisetzung von Gefahrgut bzw. wassergefährdenden Stoffen, sollte i.A. auf den Unfallort begrenzt sein, das Schadensausmaß – bei den vorliegenden Gefahreigenschaften des Stoffinventars – sich maximal auf eine Grundwassergefährdung konzentrieren. Diese steht im engen Zusammenhang mit dem stofflichen Gefährdungspotential (Risikoquotient gegenüber den Geringfügigkeitsschwellenwerten für Grundwasser).

Für das Anlagenrisiko, d.h. die Freisetzung in Folge der Lagerung und Aufbereitung des Lagerstättenwassers, soll hier nicht der Anschein einer vollständigen Risikoanalyse erweckt werden. Vielmehr soll die Eintrittswahrscheinlichkeit anhand augenfälliger Verfahrensparameter wie Zustandsdruck, erhöhte Temperatur oder Explosionsfähigkeit eines Dampf-/Luftgemisches abgestuft werden. Das Schadensausmaß lässt sich ebenfalls gut anhand von zugeordneten Stoffkenngrößen wie Wassergefährdungsklassen oder Risikoquotienten quantifizieren, die ihrerseits Grundlage für adäquate Schutzsysteme des Grundwassers bilden.

Alle anderen Gefährdungspfade, z.B. über die Luftemission, halten wir im Rahmen dieser Studie für vernachlässigbar.

Für die natürlich vorkommenden radioaktiven Elemente (NORM) gibt es keine vergleichbaren Toxizitätsschwellenwerte, wenn man vom Bezug auf die *TrinkwV* absieht. Ihre Gefährdung kann am ehesten über die Anwendung gültiger Beurteilungswerte, die den Stoff unter eine strahlenschutzrechtliche Überwachung stellen, beurteilt werden. Diese Schwellenwerte basieren ihrerseits auf einer Wirkungsabschätzung über verschiedene Belastungspfade gegenüber dem Menschen bei einer maximal als vertretbar angesehenen kalenderjährlichen individuellen effektiven Dosis. Wenn keine Rückstände im Sinne der *StrlSchV* Anhang XII Teil A vorliegen, kann eine Strahlenexposition von 1 mSv/a als eingehalten angenommen werden. Für Abwasser mit erhöhten Konzentrationen natürlich vorkommender Radionuklide, das in die Kanalisation eingeleitet werden soll, geben die

Werte der Anlage VII Teil D *Str/SchV* eine Orientierung. Dabei ist darauf hinzuweisen, dass die zugehörige Begrenzung von Ableitungen nach § 47 *Str/SchV* hier nicht anzuwenden ist. Einschlägig und gegebenenfalls heranziehbar ist § 71 Abs. 3 *Str/SchV*, dem (implizit) ein Dosisrichtwert von 1 mSv zugrunde liegt.

5.4.1 Freisetzungsrisiko beim Transport ohne NORM

Nach Angaben des Statistischen Bundesamtes [L25, L26] lässt sich über die Gesamtunfallhäufigkeit bei (deutschen) LKW über 3,5 t im Binnenverkehr und über entsprechende Gefahrgutunfälle bezogen auf das Jahr 2008 folgende Übersicht zusammenstellen:

Tabelle 53: Unfallstatistik Gefahrgut / Freisetzung wassergefährdender Stoffe

	Statistische Größe ¹⁴	Transporte gesamt 2008	Gefahrguttransporte 2008
1	Gesamttransporte, Binnenverkehr deutsche Fahrzeuge [t]	3.042.292.000	159.307.000
2	Transportleistung [t km]	330.152.000.000	17.082.000.000
3	Durchschnittliche Beförderungsstrecke [km] aus 2./1	108,5	107,2
4	Unfälle unter Beteiligung von Güterkraftfahrzeugen	48.324	314
5	...davon mit Stoffaustritt	k.A.	8
6	Unfallhäufigkeit W je t km aus 4./2	1,46*10⁻⁷	0,184*10⁻⁷
7	Anzahl Unfälle bei 25 t Ladung über 10.000 km (25 t * W * 10.000 km)	0,0365	0,0046

Die statistische Unfallhäufigkeit von Gefahrguttransporten ist um etwa den Faktor 8 geringer als bei übrigen Gütertransporten. Der Freisetzungsanteil ist zudem mit ca. 2,6 % äußerst gering. Beides ist den höheren Anforderungen an die Transportbehältnisse (Tanks), Fahrzeuge und Fahrer gegenüber dem normalen Güterverkehr zuzurechnen.

¹⁴ Im Zusammenhang mit den statistischen Angaben wird die alte Bezeichnung „t km“ für „Tonnenkilometer“ zur Charakterisierung der Transportleistung verwendet (Produkt aus Wegstrecke und beförderter Ladungsmenge)

Für die folgende Betrachtung ließe sich die Unfallhäufigkeit für Gefahrguttransporte zugrunde legen, da es sich aber lt. **Sonderteil A** zu diesem Gutachten nicht um Gefahrgut handelt und damit auch kein Gefahrguttransport erforderlich ist, wird als worst case auf die Unfalldaten des normalen Güterverkehrs zurückgegriffen: **$W = 1,46 \cdot 10^{-7}$**

Das Schadensausmaß lässt sich wie folgt darstellen:

Jeder Transport enthält 25 m³ (= Mg, t) Lagerstättenwasser (bzw. Abfall) mit den Eigenschaften (Risikoquotient bezogen auf die mittlere Konzentration im Lagerstättenwasser gemessen an den Grundwassergeringfügigkeitsschwellen vgl. Tabellen 34 und 35):

höchste Risikoquotienten	Pb	1.334
	BTEX	21.721
	Benzol	320.914

Diese Kenngrößen beschreiben im Falle der Freisetzung eine hohe Umweltgefahr für Grundwasser. Gleichwohl wird das Lagerstättenwasser hinsichtlich der Anforderungen an die Schutzmaßnahmen beim Umgang (Lager, Behandeln) in die Wassergefährdungsklasse WGK 1 (schwach wassergefährdend, s. Gutachten **Sonderteil A**) eingestuft.

Unter Anwendung der Geringfügigkeitsschwellenwerte gegenüber Grundwasser (siehe Risikoquotienten) ist damit für die betrachteten Optionen statistisch bei jedem Unfall mit Lagerstättenwasser – und dessen Freisetzung in Boden/Grundwasser – mit einer Umweltgefahr zu rechnen, die sich somit unmittelbar aus der Unfallhäufigkeit je Transport-km für die einzelnen Optionen ergibt.

Tabelle 54: Unfallhäufigkeit und „Risikowert“ für den Transport des unbehandelten Lagerstättenwassers (Streckenangaben vgl. Tabelle 39 ff.)

	Aufbereitung zur Injektion (Tellerseparator) Option 1	Aufbereitung zur Flutung im Salzbergwerk (Dampfstrippung) Option 2	Aufbereitung zur (Direkt)einleitung (Verdampfung) Option 3a	Aufbereitung zur Indirekteinleitung und Behandlung im kommunalen Klärwerk Option 3b
Gesamtstrecke LaWa-Transport mit 25 Mg/Ladung	77.960,5 km	91.044,9 ¹⁵ km (450.311,6 km wenn Aufbereitung am Bergwerk)	91.044,9 km	91.044,9 km
Unfälle pro Jahr bei : W = 1,46*10⁻⁷ je t km	0,285	0,332 (1,644)	0,332	0,332
Risikowert auf Basis des Risikoquotienten für Benzol im LaWa 320.914 (worst case)	91.460	106.543 (527.583)	106.543	106.543

Für einen Abfalltransport ergibt sich ein statistisches Risiko entsprechend der o.g. Unfallstatistik. Dabei kann je Transport wieder von einer Maximalmenge von 25 Mg ausgegangen werden, die bei einem Unfall freisetzbar ist, wobei es sich im Allgemeinen um Feststoffe oder Schlamm handelt (Ausnahme: abgetrennte BTEX/KW). Die gebildeten Abfälle weisen aber bei deutlich geringerem Transportaufkommen eine höhere Schadstoffkonzentration als das ursprüngliche Lagerstättenwasser auf und lassen sich über die folgenden Schadstoff-Leitkomponenten charakterisieren:

- Salzgehalt (Gesamtsalinität)
- Schwermetalle (As, **Pb**, Cd, Cr, **Hg**, Cu, Ni, **Zn**, Sb, Co, Sn, Zr, fettgedruckte Metalle haben hierbei eine besondere Relevanz)
- BTEX
- (M)KW
- NORM (Ra-226, Ra-228, Pb-210, Po-210)

¹⁵ Transport von den Bohrstellen zur zentralen Aufbereitung (rechnerisch: Verden) 91.044,9 km, von dort zum Bergwerk Mariagluck in 99 km Entfernung s. Abfalltransport mit aufbereitetem LaWa 475.200 km; entsprechend werden 91.044,9 km mit Benzol als Leitkomponente und 475.200 km ohne Benzol als Leitkomponente mit Pb als Leitkomponente berechnet.

Tabelle 55: Abfallaufkommen und Transportrisiko der Optionen 1 und 2

	Option 1 (Injektion)		Option 2 (Flutung)			
Abfallart	Flüssigkeit	Schlamm	Flüssigkeit	Press- rückstand	Flüssig aus Phasentrenner	aufbereitetes LaWa
Jahresabfall- menge	1,4 m³	30 Mg	1,4 m³	30 Mg	61 Mg (90 %) 51.975 kg	122.000 m³
Leitkomponente	KW	Abf. Stoffe	KW	Abf. St.	BTEX, Benzol	Metalle (Salz, NORM)
Abfall- konzentration	90 % Dichte: 0,9 kg/L	40 %	90 % Dichte: 0,9 kg/L	40 %	Benzol 90 % Dichte: 0,88 kg/L	100 % Dichte ber. als 1 kg/L
Risikoquotient Grundwasser	$9 \cdot 10^5$	n. b.	$9 \cdot 10^5$	n. b.	Benzol $88 \cdot 10^7$	Pb 1.334
Transport mit Ladung, ges.	100 km	200 km	100 km	100 km	300 km	475.200 km
Unfallereignisse ¹⁶ pro Jahr bei W = $1,46 \cdot 10^{-7}$ je t km	$2 \cdot 10^{-5}$	$7,3 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-5}$	$7,3 \cdot 10^{-5}$	$109,5 \cdot 10^{-5}$	1,73
Risikowert berechnet ¹⁷	18	n. b.	18	n. b.	667.920	2.308
Gesamtrisiko- wert	Ca. 18		670.246			

¹⁶ Anzahl Unfälle pro Jahr = 25 t x Transportkilometer x W (Unfall / (t km))

¹⁷ Unfallereignisse x Risikoquotient

Tabelle 56: Abfallaufkommen und Transportrisiko der Optionen 3a und 3b

	Option 3a (Verdampfung)			Option 3b (CP-Behandlung)		
Abfallart	Flüssigkeit	A-Kohle	Rückstand	Flüssigkeit (Kondensat)	TR aus Fällung	A-Kohle
Jahresabfallmenge	1,4 m³	Ca. 173 Mg inkl. 120 Mg A-Kohle	12.500 m³	45.434 kg	8.125 m³ 3.250 Mg	2 m³ bzw. 2,7 m³ je Filterwechsel
Leitkomponente	KW	BTEX	Metalle, Salze, NORM	44.762 kg BTEX 762 kg KW	Metalle 1.123 kg/a BTEX, NORM <200 Bq/kg)	BTEX/KW
Abfallkonzentration	90 % Dichte: 0,9 kg/L	43,5 % 435 g/kg, Benzol: 90 %	85 % 10.625 Mg = 850 g/L	90 % Dichte: 0,88 kg/L	40 % 3.250 Mg, 34,6 % SMe	?
Angenommener Elutionsgrad	100 %	10 % = 43,5 g/L	10 %	100 %	10 % 34,6 g/L	10 %
Risikoquotient Grundwasser	$9 \cdot 10^5$	Benzol: $39,2 \cdot 10^6$	Pb: $12,14 \cdot 10^6$	Benzol: $88 \cdot 10^7$	Pb: $4,94 \cdot 10^6$	Benzol: ?
Transportstrecke gesamt km	100	480	50.000	200	3.250	?
Unfallereignisse ¹⁸ bei W = $1,46 \cdot 10^{-7}$	$2 \cdot 10^{-5}$	$175 \cdot 10^{-5}$	0,183	$73 \cdot 10^{-5}$	0,01186	?
Risikowert berechnet ¹⁹	18	68.600	2.216.200	642.400	58.588	?
Gesamtrisikowert ohne NORM	2.284.818			Ca. 700.988		

Zusammenfassend lassen sich die Transportrisiken (Lagerstättenwasser und Abfälle) der Optionen über folgende Risikowerte abbilden:

¹⁸ Anzahl Unfälle pro Jahr = 25 t x Transportkilometer x W (Unfall / (t km))

¹⁹ Unfallereignisse x Risikoquotient

Tabelle 57: Risikowerte für Transporte von Lagerstättenwasser und Abfällen der Optionen

Option	Option 1 (Injektion)	Option 2 (Flutung)	Option 3a (Verdampfung)	Option 3b (CP- Behandlung)
Risikowert Transport LaWa	91.460	106.543 ²⁰ (527.583 ²¹)	106.543	106.543
Risikowert Transport Abfälle	18	670.246 einschl. aufberei- tetes LaWa (667.920)	2.284.818	700.988
Risikowert gesamt	91.478	776.789 (1.195.503)	2.391.361	807.531

Der Risikowert des Transportes wird hauptsächlich bestimmt durch

- den Transport der BTEX aus dem Phasentrenner, wenn die Aufbereitung nicht am Bergwerk stattfindet (Option 2)
- den Transport des Verdampfungsrückstandes (Option 3a)
- den Transport des BTEX-Kondensates aufgrund des hohen Risikoquotienten von Benzol (Option 3b)

Wird im Falle der Flutung die Aufbereitung z.B. in Verden durchgeführt (Transport Benzol-haltigen Lagerstättenwassers von den Anfallstellen zur Aufbereitung), so ergibt sich der in den o.g. Tabellen bestimmte Risikowert zu ca. 777.000. Der Abfalltransport wird aber im Risikowert durch den Entsorgungstransport des aufbereiteten Lagerstättenwassers zum Bergwerk (99 km) aufgrund dessen Schwermetallgehaltes mit ca. 670.000 km dominiert. Liefert man das Lagerstättenwasser von den Anfallstellen direkt nach Mariagluck, so ergibt sich aufgrund der höheren Entfernungen ein höherer Risikowert des benzolhaltigen Lagerstättenwassers, wobei jedoch der Transportbeitrag für das aufbereitete Lagerstättenwasser (Leitkomponente Schwermetalle) entfällt: Der Risikowert der Variante mit Aufbereitung am Bergwerksstandort beträgt 1.195.503.

Aus der Sicht des Umweltrisikos ist der Straßentransport mit konzentrierten flüssigen Abfällen ein jeweils hohes Umweltrisiko (feste Abfälle werden mit einer Elution von 10%

²⁰ Bei Aufbereitung des LaWa nicht am Standort des gefluteten Bergwerks

²¹ Aufbereitung am Bergwerksstandort

angesetzt). Der Transport der konzentrierten Abfälle (Kohlenwasserstoffe, BTEX, Schwermetalle bzw. beladene Aktiv-Kohlen oder Fällungsschlämme) dominiert dann das Gesamt-Transportrisiko. Die Risikodominanz des Transportes gefährlicher Abfälle passt auch zu dem Bild, dass das Lagerstättenwasser selbst kein Gefahrgut darstellt, wenn man von einer möglichen Einstufung aufgrund der Korrosion in Klasse 8 einmal absieht, vgl. hierzu Gutachten **Sonderteil A**. Die aufkonzentrierten Abfälle sind aber in der Regel als Gefahrgut einzustufen.

Relativierend muss festgestellt werden, dass alle berechneten „Risikowerte“ unter Annahme eines Unfalls mit Stoffaustritt der gesamten Ladung und bei Anrechnung der Komponente mit höchstem Risikoquotienten gegenüber den Grundwasser-Geringfügigkeitsschwellenwerten ermittelt wurden (Tabelle 35).

Für den zusammenfassenden Vergleich der Optionen fließen die Sachergebnisse wie folgt in die Bewertungsmatrix ein:

Tabelle 58: Bewertung des Freisetzungsriskos beim Transport des Lagerstättenwasser und der Aufbereitungsabfälle

Option	Beschreibung	Bewertung 1: schlechteste Option 5: beste Option	Bemerkungen
1	Injektion (VK-N Z3)	5	Minimale Abfallmengen und Transportwege
2	Flutung in ein Salzbergwerk (Mariagluck, Höfer, Aufbereitung Verden)	3	Stark abhängig vom Standort der Aufbereitungsanlage und vom BTEX-Transport; bei Aufbereitung am Bergwerkstandort Höfer ergibt sich hier eine Bewertung „2“
3a	Direkteinleitung (Verdampfung)	1	Hochbelasteter Rückstand in hohen Mengen
3b	Indirekteinleitung (CP-Anlage)	3	

5.4.2 Freisetzungsrisiko bei der Aufbereitung inkl. Lagerung ohne NORM

Unter der Voraussetzung eines Betriebes gemäß dem Stand der Sicherheitstechnik wird eine Risikobewertung an dieser Stelle auf eine qualitative Abstufung der potentiellen Gefahren durch Stofffreisetzungen im betrieblichen Störfall begrenzt. Hierzu werden folgende Kriterien einer erhöhten Freisetzbarkeit herangezogen:

- Vorhandener (Über-)Druck in der verfahrenstechnischen Aufbereitungs- oder Lageranlage
- Auftreten erhöhter Temperaturen im Bereich von Siedepunkten bzw. deutlich erhöhten Dampfdrücken der Schadstoffkomponenten (z.B. BTEX)
- Das zumindest zeitweise Auftreten explosionsfähiger Dampf-Luft-Gemische.

Eine Einschätzung der Gefahrenpotentiale erfolgt über folgende Merkmale und Kenngrößen.

Hinsichtlich des Stoffinventars wird in Anlehnung an § 6 einiger Anlagenverordnungen der Länder zum Umgang mit wassergefährdenden Stoffen (VAwS) das Gefährdungspotential wie folgt abgestuft, wobei aufgrund der logarithmischen Einteilung gilt:

$$100 \text{ Mg WGK 1} = 10 \text{ Mg WGK 2} = 1 \text{ Mg WGK 3}$$

Tabelle 59: Gefährdungsstufen nach §6 VAwS Niedersachsen

Volumen in m ³ oder Masse in t	Wassergefährdungsklasse			
	0	1	2	3
<= 0,1	Stufe A	Stufe A	Stufe A	Stufe A
> 0,1 <= 1	Stufe A	Stufe A	Stufe A	Stufe C
> 1 <= 10	Stufe A	Stufe A	Stufe B	Stufe D
> 10 <= 100	Stufe A	Stufe A	Stufe C	Stufe D
> 100 <= 1000	Stufe A	Stufe B	Stufe D	Stufe D
> 1000	Stufe A	Stufe C	Stufe D	Stufe D

Nach Abschaffung der WGK 0 wurde diese Tabelle entsprechend reduziert. An die resultierenden Gefährdungsstufen werden zur Vermeidung von Freisetzungsgefahren von A nach D ansteigende technische und organisatorische Sicherheitsmaßnahmen geknüpft.

Nachhaltiger Umgang mit Lagerstättenwasser - Studie

Dieses Prinzip der Gefährdungsstufen lässt sich sowohl für Lager- und Umschlaganlagen als auch Behandlungsanlagen verwenden.

In dieser Studie wird die Gefährdungsstufe um eine Stufe erhöht, wenn Druck, Temperatur ein erhöhtes Freisetzungspotential erwarten lassen:

A, B, C, D -----(p, T, Ex)-----→ B, C, D, D*

Da die Ex-Zone 2 für alle Verfahren gleichermaßen anzusetzen ist, zumindest was den Anlageneingang betrifft, wird hier keine Gefahrerhöhung vorgenommen.

Lagerung:

Alle Lagerungen im Zusammenhang mit der Aufbereitung (Pufferbehälter, Vorlagebehälter) stehen unter atmosphärischem Normaldruck; der unter ca. 0,5 bar Erdgas-Überdruck [U53] befüllte B9-Behälter am Bohrplatz ist der eigentlichen Aufbereitung vorgeschaltet und nicht Gegenstand der hier durchgeführten Betrachtung am zentralen Aufbereitungsstandort. Die Lagerung erfolgt bei Temperaturen bis schätzungsweise 40 °C maximal im Bereich erhöhter Umgebungstemperaturen unterhalb kritischer Siedebereiche (Benzol 80,1 °C). Insbesondere die Pufferbehälter des Lagereingangs zur Aufbereitung sind nach Betreiberangaben als Ex-Zone 2 anzusehen, vgl. *Betriebsicherheitsverordnung*, sodass mit dem zeitweisen Auftreten von explosionsfähigen Dampf-Luft-Gemischen gerechnet werden muss.

Aufbereitung:

Auch bei der Aufbereitung können erhöhte Drücke z.B. durch UF-Membranverfahren, allerdings für jeweils nur die im Membranmodul enthaltenen Anteile, auftreten. Höhere Temperaturen sind vor allem bei den thermischen Verfahren (Verdampfung, Strippung) zu erwarten. Die Ex-Zone 2 ist für alle Verfahrensstufen zunächst zu unterstellen, solange Bestandteile brennbarer Flüssigkeiten wie (M)KW, BTEX, sowie einige weitere organische Verbindungen vorhanden sind.

Mit den vorhandenen Behältervolumina der Lagerbehälter und den geschätzten Anlagenvolumina der Aufbereitung sowie in Kenntnis der Schadstoffinhalte werden für die einzelnen Optionen Gefährdungsstufen ermittelt, wobei von folgenden Einstufungen auszugehen ist:

Nachhaltiger Umgang mit Lagerstättenwasser - Studie

Lagerstättenwasser: WGK 1,
 Altöl bek. Herkunft: WGK 2,
 Benzol: WGK 3,
 Schwermetalle (Pb): WGK 3

Tabelle 60: Gefährdungsstufen der einzelnen Optionen hinsichtlich Lagerung/Aufbereitung

	Option 1 Injektion	Option 2 Flutung	Option 3a Verdampfung	Option 3b CP-Behandlung
Lagern LaWa	720 m³ WGK 1 B	640 m³ WGK 1 B	720 m³ WGK1 B	< 1.000 m³ WGK 1 B
Aufbereitung	< 10 m³ WGK 1 A	>100 m³ WGK 1 B	<100 m³ WGK 1 A	>100 m³ WGK 1 B
Gefahrerhöhung p, T, Ex	Nein A	p,T C	p, T B	p, T C
Lagern Abfälle	< 1 Mg WGK 2 > 10 Mg WGK 1 A	< 1 Mg WGK 2 > 10 Mg WGK 3 D	> 10 Mg WGK 2 > 10 Mg WGK 3 D	> 10 Mg WGK 2 > 10 Mg WGK 3 D
Höchste Gefährdungsstufe Aufb./Lagern	A, B	C, D	B, D	C, D

Eine als Gefährdungsstufe A klassifizierte Lager- oder Umschlaganlage wird im Allgemeinen als „einfach oder herkömmlich“ (eoh) bezeichnet, für die keine besonderen, über die wasserrechtlichen Grundsätze hinausgehenden, Anforderungen zu stellen sind. Für Behandlungsanlagen gibt es diese „eoh“-Klassifizierung nicht. Im vorliegenden Gutachten werden die wasserrechtlichen Anforderungen an die Gefährdungsstufen A und B als durchschnittlich angesehen, vgl. Bewertungsmatrix.

Aus der o.g. Tabelle ist ersichtlich, dass vor allem die Lagerung größerer Mengen von konzentrierten Abfällen (BTEX, Schwermetalle) ein hohes Anlagenrisiko bedingen (Stufe C oder D); eine Verringerung der Lagerkapazitäten würde sich aber andererseits negativ auf die Risiken erhöhten Transportaufkommens auswirken.

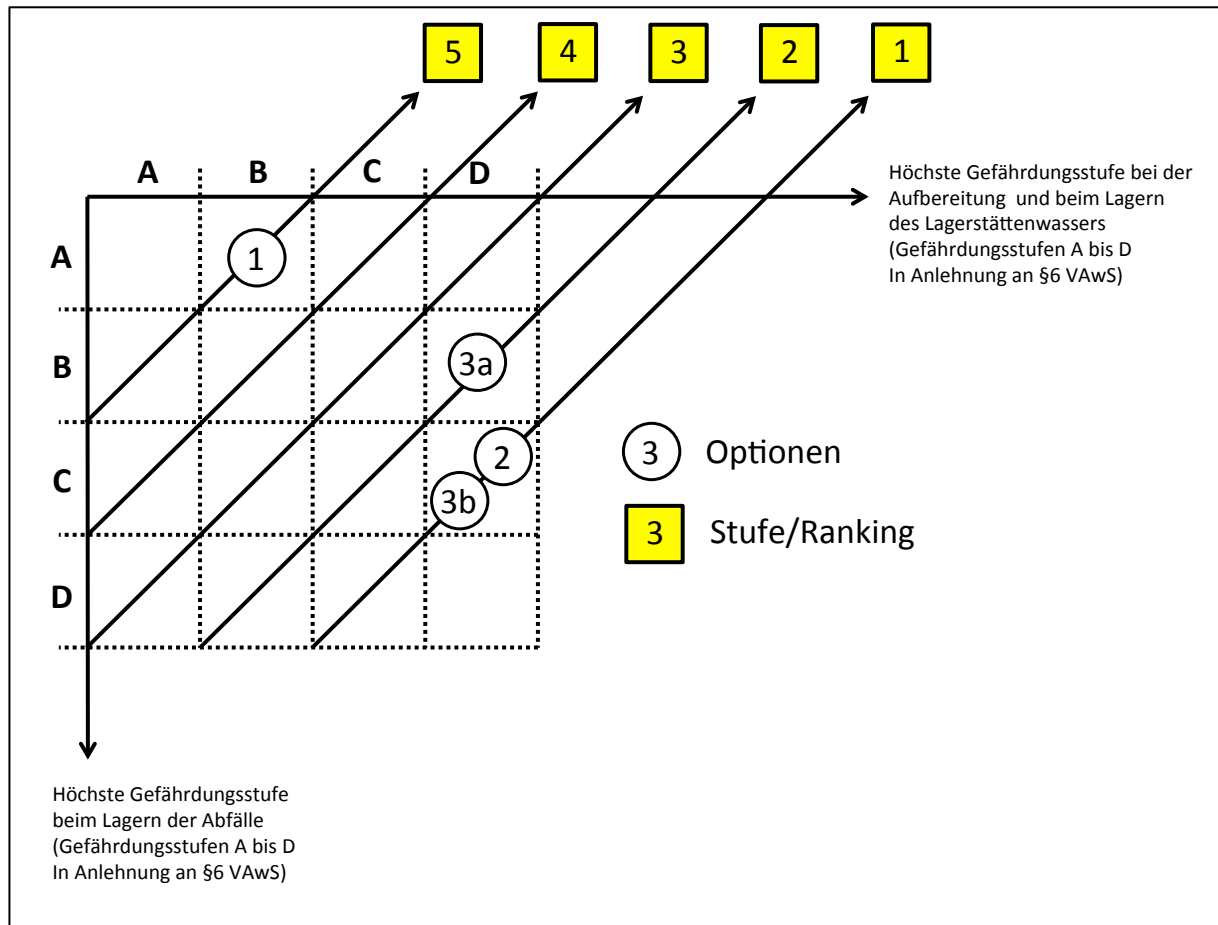


Abbildung 21: Bewertungsschema für das Freisetzungsrisiko Aufbereitung, inkl. Lagerung

Für den zusammenfassenden Vergleich der Optionen fließen die Sachergebnisse wie folgt in die Bewertungsmatrix ein. Für die einzelnen Optionen wird anhand einer Matrix A-D gegen A-D eine Rangfolge ermittelt.

Tabelle 61: Bewertung des Freisetzungsrisikos der Schadstoffe bei der Aufbereitung, einschließlich Lagerung (ohne NORM)

Option	Beschreibung	Bewertung 1: schlechteste Option 5: beste Option	Bemerkungen
1	Injektion (VK-N Z3)	5	
2	Flutung in ein Salzbergwerk (Mariagluck, Höfer)	1	
3a	Direkteinleitung (Verdampfung)	2	
3b	Indirekteinleitung (CP-Anlage)	1	

5.4.3 Verteilung der in den NORM enthaltenen Radioaktivität

Wie im **Gutachten Sonderteil A** der Studie näher ausgeführt, kann bei Überschreiten der Überwachungsgrenzen nicht mehr davon ausgegangen werden, dass die effektive Dosis für Einzelpersonen der Bevölkerung die Richtdosis von 1 mSv/a einhält. Umgekehrt können die Behörden beim Einhalten der Überwachungsgrenzen vom Einhalten der Expositionsrichtwerte ausgehen, sodass keine zusätzlichen Maßnahmen zum Schutz der Bevölkerung erforderlich sind.

Es wird im vorliegenden Fall unterschieden zwischen:

- Rückständen in Form von Schlämmen und Ablagerungen aus der Gewinnung, Verarbeitung und Aufbereitung von Erdöl und Erdgas im Sinne von Anlage XII Teil A *StrlSchV* in Verbindung mit der dort genannten Aktivitätsgrenze von 0,2 Bq/g
- Überwachungsbedürftige Rückstände beim Überschreiten der Überwachungsgrenzen der Anlage XII Teil B *StrlSchV*
- Sonstigen Materialien einschl. Abfällen mit radioaktiven Inhaltsstoffen (NORM) unter hilfsweiser Anwendung von § 102 *StrlSchV*
- Abwasser aus Strahlenschutzbereichen (hilfsweise Anwendung von § 47 *StrlSchV* bzw. § 71(3) *StrlSchV*)

Im Einklang mit Gellermann [U25] lässt sich für Abwasser unterscheiden:

- Kategorie 1: radiologisch nicht relevant
- Kategorie 2: radiologisch indifferent
- Kategorie 3: radiologisch ggfs. relevant
- Kategorie 4 radiologisch relevant nach Teil 3 *StrlSchV*

Hierzu wird auf Gutachten **Sonderteil A** verwiesen.

Im Folgenden werden die Verteilung der in den NORM enthaltenen Radioaktivität beim Umgang mit Lagerstättenwasser und Rückständen anhand der Kriterien für Abwassereinleitungen und Rückstandsentsorgungen im Sinne der *StrlSchV* bewertet.

In der folgenden Tabelle sind zunächst die Schwellenwerte angegeben, bei deren Einhaltung für die betreffenden Abwässer bzw. Rückstände von keiner erhöhten Strahlenexposition im Sinne einer effektiven Dosiserhöhung für Einzelpersonen der Bevölkerung ausgegangen wird.

Nachhaltiger Umgang mit Lagerstättenwasser - Studie

Tabelle 62: Toleranzschwellen nach *StrlSchV*

Bezug	Regelung	Tolerierte eff. Dosis Einzelperson im Jahr	Zulässiger Richtwert	Bemerkung
Anlage VII Teil D Nr. 2 i.V. mit § 47 StrlSchV bzw. § 71 StrlSchV	Indirekteinleitung von Abwasser aus Strahlenschutzbereichen	0,3 mSv/a	$1. \sum_i \frac{C_i}{C_{i*}} < 1$ $2. \sum_i \frac{C_i}{C_{i*}} < 10$ (< 100.000 m³/a)	C_i^* in Bq/L: U-238 3 U-234 2 Ra-226 0,2 Pb-210 0,1 Po-210 0,03 Ra-228 0,03
TrinkwV	(Direkteinleitung bzw. Grundwasser)		$\sum_i \frac{C_i}{C_{iRef}} < 1$	C_{iRef} in Bq/L U-238 3 U-234 2,8 Ra-226 0,5 Pb-210 0,2 Po-210 0,1 Ra-228 0,2
Anlage XII, Teil A u. B i.V.m. § 97 <i>StrlSchV</i> Analog auch für Abfälle, die keine Rückstände nach Anlage XII Teil A sind (§ 102 <i>StrlSchV</i>)	Rückstände $\geq 0,2$ Bq/g „Schlämme und Ablagerungen aus der Gewinnung, Verarbeitung und Aufbereitung von Erdöl und Erdgas“	1 mSv/a	Überwachungsgrenzen: $C_{U-238sec} + C_{Th-232sec} \leq C:$ Verwertung/Beseitigung: $C = 1$ Bq/g > 5.000 Mg/a Dep. GW-Kontakt : $C = 0,5$ Bq/g untertägige Verwertung: $C = 5$ Bq/g	für jedes Nuklid aus U-238 sec und Th-232sec, Pb-210++ Mischdep. mit anderen Abfälle vgl. Anlage XII Teil C

Nachhaltiger Umgang mit Lagerstättenwasser - Studie

Tabelle 63: Berechnung der Aktivitätskonzentrationen für die Kategorie 1 bei verschiedenen Restgehalten der Nuklide von 10, 5 und 1 % gegenüber dem ursprünglichen Lagerstättenwasser (produktionsgewichtete Mittelwerte, vgl. Tabelle 4), grüne Schrift: Die Bedingungen für die Kategorie 1 (radiologisch nicht relevant) werden eingehalten

Nuklid	Ci (Bq/L)	Ab- wasser	TrinkwV	10%	5%	1%	Ci (10)/Ci*	Ci (5)/Ci*	Ci (1)/Ci*	Ci (10)/Ci, Ref	Ci (5)/Ci,Ref	Ci (1)/Ci, Ref
		Ci *		Ci	Ci	Ci						
U - 238	0,003	3,00	3,00	0,0003	0,00015	0,00003	0,00010	0,00005	0,00001	0,00010	0,00005	0,00001
U - 234	0,004	2,00	2,80	0,0004	0,00020	0,00004	0,00020	0,00010	0,00002	0,00014	0,00007	0,00001
Ra - 226	10,5	0,20	0,50	1,0500	0,52500	0,10500	5,25000	2,62500	0,52500	2,10000	1,05000	0,21000
Pb - 210	14,3	0,10	0,20	1,4300	0,71500	0,14300	14,3000	7,15000	1,43000	7,15000	3,57500	0,71500
Po - 210	1,25	0,03	0,10	0,1250	0,06250	0,01250	4,16667	2,08333	0,41667	1,25000	0,62500	0,12500
Ra - 228	10,8	0,03	0,20	1,0800	0,54000	0,10800	36,0000	18,0000	3,6000	5,40000	2,70000	0,54000
Summe							59,71697	29,85848	5,97170	15,90024	7,95012	1,59002
Kategorie							2	2	1	Nicht erfüllt	Nicht erfüllt	Nicht erfüllt

Für einen Vergleich der Optionen empfiehlt es sich, auf die erzielbaren Gehalte an NORM-Nukliden im aufbereiteten Lagerstättenwasser und in den anfallenden Rückständen Bezug zu nehmen. Hierzu wird in der vorstehenden Tabelle 63 für verschiedene Aufbereitungsraten mit einem im Lagerstättenwasser verbleibenden Rest der jeweiligen Nuklide von 10, 5 und 1 % die Summe der Aktivitätskonzentrationen nach Anlage VII Teil D Nr. 2 StrlSchV gebildet. Dabei wird auf die Referenzwerte für Indirekteinleitung als Abwasser bzw. für die „Unbedenklichkeit“ gegenüber Grundwasser (TrinkwV) referenziert.

Aus den Berechnungen ergibt sich, dass nur im Falle einer 99 %-igen Entfernung der NORM-Nuklide aus dem Lagerstättenwasser eine Indirekteinleitung unter 100.000 m³/a ohne Mitteilung an die Abwasseranlage nach den Maßstäben der Anlage VII, Teil D Nr. 2 zu § 71 StrlSchV möglich ist. Eine Direkteinleitung des aufbereiteten Lagerstättenwassers ist selbst bei Rückhalteraten von > 99 % NORM nicht möglich, ein Grundwasserkontakt entsprechend auszuschließen.

Für eine 95%ige und 90 %ige Trennung (Rückhaltung) der NORM-Nuklide errechnet sich mit einem Summenwert nach StrlSchV von > 10 und < 60 eine Kategorie 2, die „radiologisch indifferent“ definiert wird. Hier ist eine chargenweise Aufbereitung zu überlegen, um für die nach **Sonderteil A** des Gutachtens bzw. nach [U25] berechneten Jahresmengen Grenzen festlegen zu können, die nach Kategorie 1 oder mit entsprechender Überwachung nach Kategorie 3 einzuleiten wären.

Insgesamt werden die Indirekteinleitungen des aufbereiteten Lagerstättenwassers immer von den sonstigen Zuflüssen der Kläranlage und der damit verbundenen Klärschamm-anreicherung abhängig sein.

Die festen Rückstände aus der Aufbereitung lassen sich am besten den Überwachungsgrenzen nach Anlage XII Teil B gegenüberstellen. Dabei gilt für die Überwachungsgrenze von Rückständen:

$$C_{U-238sec} + C_{Th-232sec} \leq C \quad \text{mit}$$

- Zum Vergleich: <0,2 Bq/g für jedes Nuklid aus U-238sec und Th-232sec sind keine Rückstände i.S. Anlage XII Teil A
- $C = 1 \text{ Bq/g}$ für die Verwertung oder Beseitigung

- $C = 0,5 \text{ Bq/g}$ bei einer Deponierung von $> 5.000 \text{ Mg/a}$ im Einzugsbereich eines nutzbaren Grundwasserleiters
- $C = 5 \text{ Bq/g}$ bei untertägiger Verwertung oder Deponierung

Unter Bezug auf diese Überwachungsgrenzen lassen sich die bei der Aufbereitung anfallenden Rückstände bewerten.

Die einzelnen Optionen stellen sich wie folgt dar, wobei davon ausgegangen wird, dass entsprechend [U25] die Ra-226 und Ra-228-Konzentrationen eindeutig mit der Salinität korrelieren, während bei Pb-210 und Po-210 die Korrelation nicht so eindeutig ist. Die Urankonzentrationen liegen unter der Nachweisgrenze der verwendeten Analysenverfahren.

Für Radium wird davon ausgegangen, dass – sofern keine besonderen Trennverfahren zur Anwendung kommen – die Radiumgehalte dem Weg des Salzes folgen, für Blei und Polonium ist eine teilweise Aufteilung auf die „Schwermetall- und Salzfraktion“ möglich. Nach Untersuchungen von [U56], die auf Erkenntnissen der Radium-Trennung mittels Bariumsulfatfällung zurückgehen, vergleiche auch [L38], lassen sich durch eine kombinierte Fällung von Bariumsulfat und Eisenhydroxid unter Zusatz von A-Kohle und einem polymeren Flockungshilfsmittel Trennerfolge erzielen, die den Nuklidanteil auf 10 % des ursprünglichen Lagerstättenwasser-Gehaltes herabsetzen (s. Option 3b).

Tabelle 64: NORM-Verteilung durch die Aufbereitungsverfahren auf die gebildeten Fraktionen
(fett = überwiegender Verbleib der NORM-Inhalte)

	Option 1 (Injektion)	Option 2 (Flutung)	Option 3a (Verdampfung)	Option3b (CP-Aufbereitung)
Urspr. LaWa	130.000 m³ 100%	130.000 m³ 100%	130.000 m³ 100%	130.000 m³ 100%
Aufbereitetes LaWa	129.700 m³ 100%	129.700 m³ 100%	117.500 m³ 0%	125.124 m³ ca. 10%
Abfall 1: Fällschlamm, Flotat				8.125 m³ 40%TS ca. 90 %
Abfall 2 abs. Stoffe	30 Mg 40%TS 0%	30 Mg 40%TS 0%		
Abfall 3 A-Kohle			120 Mg 0 %	Unbekannt BTEX/KW
Abfall 4 Verdampfungs- rückstand			12.500 m³ TS 85 % 100 %	
Abfall 5 Kohlenwasser- stoffe 90 %	1,4 m³ 0%	1,4 m³ 0%	1,4 m³ 0%	
Abfall 6 BTEX- Kondensat		Ca. 52 Mg 0%		45,4 Mg mit KW 0%

Verbleibt bei der Injektion und der betrachteten Flutung im Bergwerk die ursprünglich vorhandene Radioaktivität nahezu vollständig im aufbereiteten Lagerstättenwasser, so ist bei der Verdampfung von einer vollständigen Rückhaltung der Radionuklide im Verdampfungsrückstand unter entsprechender Aufkonzentrierung auszugehen. Im Falle der speziellen Aufbereitung verbleiben etwa 10 % der Radionuklide im aufbereiteten Lagerstättenwasser, wohingegen ca. 90 % im Fällschlamm der ausgeführten Co-Fällung angereichert werden.

Die technische Verifizierung des von Fa. IAF [U25] erprobten Verfahrens steht noch aus. Laut den durchgeführten Versuchen ergibt sich für **Option 3b** – ausgehend von den produktionsgewichteten Mittelwerten des Lagerstättenwasser - folgende Aufteilung der Radionuklide:

Tabelle 65: Konzentrationsverteilung (gerundet) der Radionuklide bei Option 3b²²

Nuklid	LaWa, unbehandelt	Fällung/Flockung				Überwachungswert für Rückstände nach <i>StrlSchV</i>
	130.000 m³/a 4.843 MBq/a	Elimina- tionsgrad	Abgesch. Fracht	LaWa be- handelt	Entwäss. Schlamm 8.150 m³/a [TS: 3.250 Mg]	
Ra-226	11 Bq/L	95 %	1.321 MBq/a	0,6 Bq/L	163 Bq/kg [406 Bq/kg]	
Ra-228	11 Bq/L	95 %	1.371 MBq/a	0,6 Bq/L	169 Bq/kg [421 Bq/kg]	$C_{U-238sec} + C_{Th-232sec}$ $\leq 0,351 \text{ Bq/g}$ $[\leq 0,875 \text{ Bq/g}]$
Pb-210	14 Bq/L	80 %	1.477 MBq/a	2,8 Bq/L	182 Bq/kg [454 Bq/kg]	
Po-210	1 Bq/L	95 %	154 MBq/a	0,1 Bq/L	19 Bq/kg [47 Bq/kg]	
gesamt	37 Bq/L	Ø 90 %	4.323 MBq/a (3.987 MBq/a)	4,1 Bq/L (3,7 Bq/L)	533 Bq/kg (489 Bq/kg) [1.328 Bq/kg]	
				$\sum_i \frac{C_i}{C_{i*}} = 54$		

Folgt man der vorangestellten Tabelle, so ergibt sich anhand der vorgelegten Daten folgende Berechnung:

1. Unter Zugrundelegung der Daten aus [U55-U56] zu den **Fällungsdaten für die Option 3b** ergeben sich für den Nuklidgehalt im entwässerten Fällungsschlamm jeweils Werte unter 200 Bq/kg. Danach handelt es sich bei dem Fällungsschlamm nicht um einen Rückstand im Sinne von § 97 i.V.m. Anlage XII, Teil A *StrlSchV*.
2. Bezieht man hingegen die Nuklid-Restgehalte im Schlamm (eckige Klammern) auf den Trockenrückstand in Höhe von 3.250 Mg/a aus 8.150 m³/a Fällungsschlamm, so ergibt sich mit Werten > 200 Bq/kg ein „Rückstand“ im Sinne § 97 *StrlSchV*; nach Anlage XII Teil B wird die Überwachungsgrenze von $C_{U-238sec} + C_{Th-232sec} \leq 1 \text{ Bq/g}$ für eine Verwertung/Beseitigung unterschritten.

²² Die Tabellenwerte stammen aus den Daten, die von Fa. Aquaconsult auf Basis der IAF-Versuche für die produktionsgewichteten Mittelwerte berechnet wurden [U56]); sie weichen geringfügig von der im vorliegenden Gutachten verwendeten Datenbasis ab (Werte in Klammern)

3. Analog zu den im **Sonderteil A** zu diesem Gutachten durchgeführten Berechnungen ergibt sich für den Summenwert bzgl. einer Abwassereinleitung $\sum_i \frac{c_i}{c_{i*}} = 54$, somit entsprechend [U25] für das aufbereitete Lagerstättenwasser eine „Kategorie 2, radiologisch indifferent“, sodass für Jahresmengen unter 1.842 m³ eine Einleitung entsprechend Kategorie („nicht radiologisch relevant“) möglich ist, während größere Mengen entsprechend der Kategorie 3 als „radiologisch gegebenenfalls relevant“ einzustufen sind.

Bei der **Verdampfung des Lagerstättenwassers (Option 3 a)** ergibt sich folgendes Bild:

1. Der Verdampfungsrückstand enthält die gleiche Verteilung und Aktivität wie das ursprüngliche Lagerstättenwasser: 4.420 MBq/a, die sich auf eine Menge von 12.500 m³/a mit einem Trockenanteil von ca. 85 % verteilen.
2. Hieraus ergeben sich die in der folgenden Tabelle genannten spezifischen Aktivitäten bezogen auf den Verdampfungsrückstand.

Tabelle 66: Spezifische Aktivitäten des Verdampfungsrückstandes nach Option 3a

	120.000 m³/a 4.843 MBq/a	Fracht	Verdampfungs- rückstand	
Ra-226	10,5 Bq/L	1.260 MBq/a	101 Bq/kg	
Ra-228	10,8 Bq/L	1.290 MBq/a	103 Bq/kg	$C_{U-238sec} + C_{Th-232sec}$ $\leq 0,241 \text{ Bq/g}$
Pb-210	14,3 Bq/L	1.720 MBq/a	138 Bq/kg	
Po-210	1,25 Bq/L	150 MBq/a	12 Bq/kg	
	Summe	4.420 MBq/a	354 Bq/kg	

3. Es ergeben sich für den Nuklidgehalt im Verdampfungsrückstand jeweils Werte unter 200 Bq/kg. Danach handelt es sich bei dem Verdampfungsrückstand nicht um einen Rückstand im Sinne von § 97 i.V.m. Anlage XII, Teil A StrlSchV.
4. Es muss zunächst verwundern, dass die „Aufkonzentrierung“ bei der Verdampfung zu geringeren Anteilen an Nukliden im Verdampfungsrückstand von 12.500 m³/a ($\approx \text{Mg/a}$) und zu keinem Rückstand im Sinne StrlSchV führt (Option 3a), während Option 3b einen entwässerten Fällungsschlamm produziert, dessen Trockenanteil mit 3.250 Mg/a im Bereich der Rückstände nach StrlSchV liegt, obwohl er nur ca. 90 %

des ursprünglichen Nuklidgehaltes auf sich vereinigt. Dieser Umstand ist aber der fast 4-fach höheren Aufkonzentrierung der Radionuklide im Fällungsrückstand gegenüber dem Verdampfungsrückstand zuzuschreiben.

Zusammenfassend lässt sich für die radiologische Relevanz der vier Optionen folgendes feststellen:

Optionen 1 (Injektion) und 2 (Flutung)

Die Injektion und auch der Einsatz des aufbereiteten Lagerstättenwasser zur Flutung im Salzbergwerk sind radiologisch vergleichbar, unterscheiden sie sich doch lediglich in einer etwas geänderten Aufbereitung, die den Anteil an Radionukliden nicht berührt, d.h. im Lagerstättenwasser belässt: Zum einen Abtrennung der absetzbaren/abfiltrierbaren Stoffe und der frei abscheidbaren Kohlenwasserstoffe (Injektion), zum anderen Dampfstrippung der (brennbaren) flüchtigen Kohlenwasserstoffe und BTEX mit evtl. anderen flüchtigen organischen Komponenten. In beiden Fällen kann die Lagerstättenwasser-Verbringung und Aufbereitung als „Abfallentsorgung“ angesehen werden, wobei die Anwendbarkeit des Rückstandsbegriffes nach § 97 i.V.m. Anlage XII Teil A Nr.1 zu prüfen ist. In beiden Fällen zeigt sich, dass lt. Tabelle 2 in **Sonderenteil A** dieser Studie die gewichteten und maximalen Aktivitätskonzentrationen im Lagerstättenwasser deutlich den Wert von 0,2 Bq/g (200 Bq/L) unterschreiten und somit unabhängig von der Legaldefinition keine Rückstände im Sinne § 97 der StrlSchV darstellen.

Option 3a (Verdampfung)

Die Verdampfung des Lagerstättenwassers führt einerseits zu einem „radioaktivitätsfreien“ Kondensat und andererseits zu einem aufkonzentrierten Verdampfungsrückstand, der die Aktivität von 4420 MBq/a auf 12.500 m³ konzentriert, mithin ca. 354 Bq/kg; die spezifischen Aktivitätskonzentrationen der Nuklide liegen jeweils unter 200 Bq/kg, d.h. es handelt sich damit nicht um einen Rückstand im Sinne *StrlSchV* Anlage XII Teil A.

Option 3 b (CP-Behandlung)

Das von RWE Dea vorgestellte Aufbereitungsverfahren in einer CP-Anlage in Verbindung mit Fällungsversuchen der Fa. IAF führt – soweit auch technisch im scale-up realisierbar – zu einem radioaktiv aufkonzentrierten Trockenrückstand des Fällschlammes, der mit 90 % der Jahresfracht (3.987 MBq/a) auf 3.250 Mg Trockenrückstand anfällt (1,23 Bq/g). Es handelt sich also um einen Rückstand nach Anlage XII, Teil A, der für eine Verwertung und Beseitigung im Bereich der Überwachungsgrenze $C \leq 0,875 \text{ Bq/g}$ liegt, sofern die Aufbereitung im Zusammenhang mit der bergrechtlichen Genehmigung der Erdgasförderung zu sehen ist. Für die gemeinsame Deponierung mit anderen Abfällen wird auf Anlage XII, Teil C verwiesen.

Bei einer Rückhalterate von 90 % verbleibt 10 % des NORM-Anteils im aufbereiteten Lagerstättenwasser, was einen Summenwert nach Anlage VII, Teil D von $\sum_i \frac{Ci}{Ci^*} = 54$ ergibt. Damit ist die Indirekteinleitfähigkeit unmittelbar mengenabhängig entweder radiologisch nicht relevant oder gegebenenfalls relevant und mit dem Kläranlagenbetreiber abzustimmen.

Tabelle 67: Zusammenfassung der radiologischen Zuordnungen

Option	Einleitung	Aufbereitetes LaWa Einleitung Kanal/Vorfluter	Abfall aus Aufbereitung
1: Injektion	indirekt	Kategorie 3	kein Rückstand i.S. Anlage XII Teil A StrlSchV
	direkt	nein	
2: Flutung	indirekt	Kategorie 3	kein Rückstand i.S. Anlage XII Teil A StrlSchV
	direkt	nein	
3a: Verdampfung	indirekt	Kategorie 1	kein Rückstand i.S. Anlage XII Teil A StrlSchV
	direkt	Möglich	
3b: CP-Behandlung	indirekt	Kategorie 2	(Trocken-)Rückstand i.S. Anlage XII Teil A StrlSchV Überwachungsgrenze 875 Bq/kg
	direkt	nein	

In der folgenden Abbildung sind für die Optionen die Kategorien des „Abwassers“ (= aufbereitetes Lagerstättenwasser) gegen Überwachungsgrenzen der Rückstände nach Anlage XII Teil B StrlSchV aufgeführt:

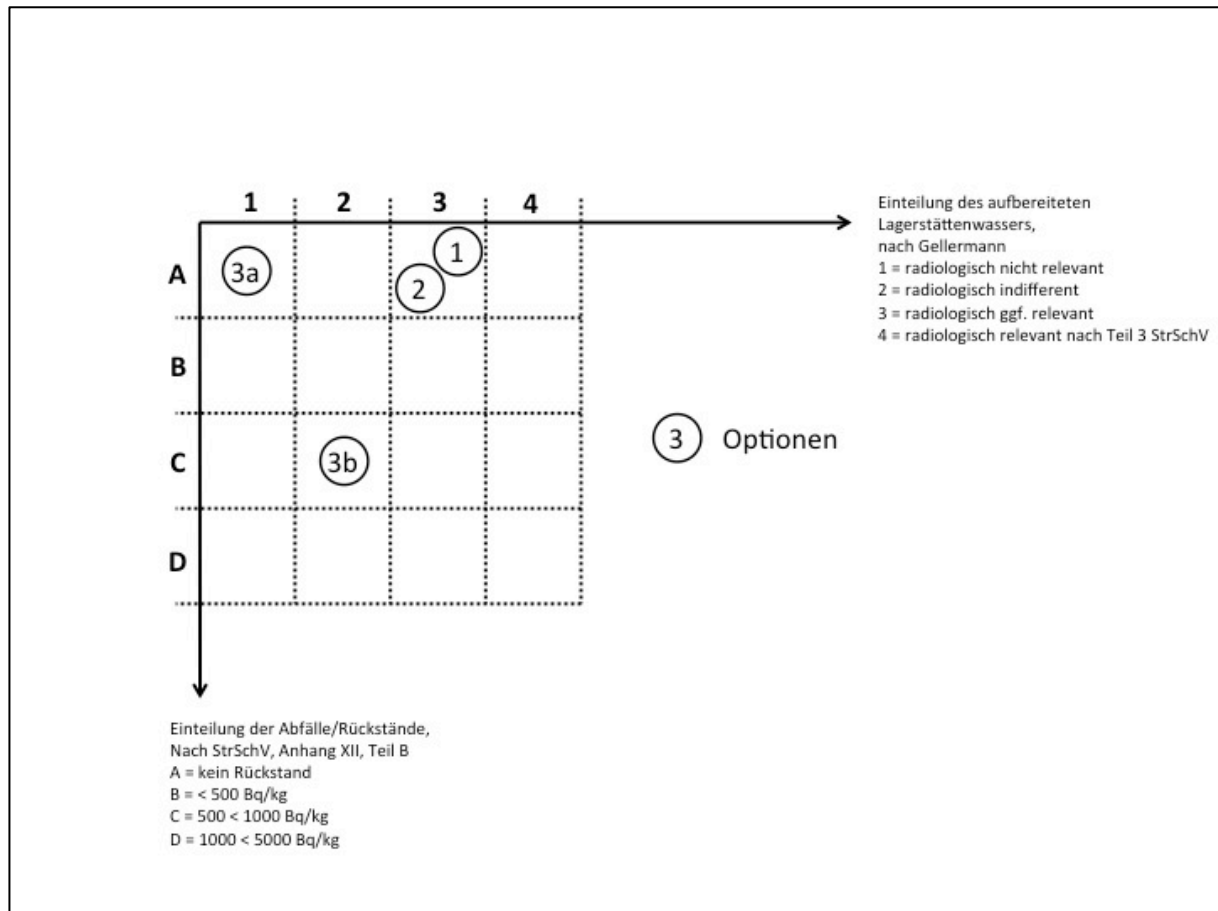


Abbildung 22: Verteilung der Radioaktivität in den Kompartimenten "aufbereitetes Lagerstättenwasser" und Abfälle

In dem zusammenfassenden Vergleich der Optionen sind folgende Kriterien von Bedeutung:

- Anzahl der Kompartimente, die die radioaktiven Materialien enthalten
- Sicherer Verbleib der Kompartimente, die die radioaktiven Materialien enthalten
- Die (diffuse) Verteilung der Radioaktivität in der Umwelt, die zu einer erhöhten Strahlenexposition führen kann

In der nachfolgenden Tabelle sind die Kriterien für die betrachteten Optionen gegenübergestellt und bewertet worden.

Tabelle 68: Bewertung der Verteilung der Radioaktivität

Option	Beschreibung	Anzahl der Kompartimente	Verbleib der betroffenen Kompartimente 0: sicher, kontrollierbar 1: unsicher, nicht kontrollierbar (für alle Kompartimente zu addieren)	(Diffuse) Strahlenexposition 0: nicht gegeben 1: teilweise gegeben 2: vollständig gegeben (für alle Kompartimente zu addieren)	Summe
1	Injektion (VK-N Z3)	1	0	0	1
2	Flutung in ein Salzbergwerk (Mariagluck, Höfer)	1	0 (a)	0	1
3a	Direkteinleitung (Verdampfung)	1	0	0	1
3b	Indirekteinleitung (CP-Anlage)	2	0	2 (b)	4

(a): Voraussetzung für diese Option ist der sichere Verbleib des Lagerstättenwassers

(b): das aufbereitete Lagerstättenwasser enthält Radioaktivität, die diffus verteilt wird

Für die Bewertungsmatrix gilt folgende Abhängigkeit: Je niedriger die Summe in Tabelle 68, je geringer ist die Verteilung der Radioaktivität und die Strahlenexposition. Entsprechend führt die Summe in Tabelle 68 zu einer reziproken Bewertungszahl (Tabelle 69).

Tabelle 69: Bewertung des Verbleibs der Radioaktivität und der Strahlenexposition

Option	Beschreibung	Bewertung 1: schlechteste Option 5: beste Option	Bemerkungen
1	Injektion (VK-N Z3)	5	Sicherer Verbleib des Lagerstättenwassers, inkl. aller radioaktiven Materialien
2	Flutung in ein Salzbergwerk (Mariagluck, Höfer)	5	Der sichere Verbleib des Lagerstättenwassers ist eine Grundvoraussetzung, sie ist jeweils für das konkrete Bergwerk zu prüfen
3a	Direkteinleitung (Verdampfung)	5	Sicherer Verbleib der festen Abfälle in einer Deponie
3b	Indirekteinleitung (CP-Anlage)	2	Diffuse Verteilung der Radioaktivität mit dem aufbereiteten Lagerstättenwasser im Vorfluter und/oder im Klärschlamm

5.4.4 (Verkehrs)lärm

Die ökologische Bewertung der Lärmimmissionen aufgrund des LKW-Transportaufkommens wird in erster Näherung direkt proportional zur Gesamtfahrtstrecke angesetzt. Bereits in Kapitel 0 wurde die Gesamtfahrtstrecke wie folgt festgestellt:

Tabelle 70: Gesamtfahrtstrecken für LaWa- und Abfalltransport als Maß der Lärmimmission

	Option 1 (Injektion)	Option 2 (Flutung) Aufbereitung bei Völkersen	Option 2 (Flutung) Aufbereitung am Bergwerk	Option 3a (Ver- dampfung)	Option3b (CP- Aufbereitung
Transport- leistung gesamt inkl. Abfall	156.721,0 km	566.244,9 km	450.311,6 km	192.189,8 km	247.689,8 km

Gegenüber dem IST-Zustand mit derzeit ca. 600.000 Transport-km stellen alle Optionen eine Verbesserung dar.

Die Lärmemission der Anlagentechnik und ihr Beitrag zur Lärmimmission ist im Rahmen dieser Studie vernachlässigbar und weist auch keine nennenswerten Differenzierungsmerkmale auf.

Für den zusammenfassenden Vergleich der Optionen fließen die Sachergebnisse wie folgt in die Bewertungsmatrix ein:

Tabelle 71: Bewertung des Verkehrslärms

Option	Beschreibung	Bewertung 1: schlechteste Option 5: beste Option	Bemerkungen
1	Injektion (VK-N Z3)	5	
2	Flutung in ein Salzbergwerk (Mariagluck, Höfer)	1	
3a	Direkteinleitung (Verdampfung)	5	
3b	Indirekteinleitung (CP-Anlage)	4	

5.5 Schadstoffverbleib und -verteilung

Ein wichtiges Kriterium der ökologischen Bewertung ist der Verbleib der im Lagerstättenwasser enthaltenen Schadstoffe. Als wesentliches Merkmal des Verbleibs ist die Verteilung des/der Schadstoff(e) auf die Umweltkompartimente (Abfall/Boden, Abwasser/Grundwasser, Luft) anzusehen, wobei die gesetzlichen Grenzwerte nicht durch Verdünnung erreicht werden dürfen.

Um diesen Sachverhalt zu erfassen, werden für den sogenannten Regelbetrieb – also ohne betriebliche Störfälle – folgende Gesichtspunkte bewertet:

- Das Gefährdungspotential der bei der Aufbereitung entstehenden Abfälle bzw. radioaktiven Rückstände, die nicht für eine nachhaltige (stoffliche) Verwertung zur Verfügung stehen und einer Beseitigung z.B. durch Deponierung unterliegen
- Die Frage, inwieweit es gelingt, die Schadstoffe im Rahmen der Aufbereitung zu konzentrieren, d.h. sowohl auf eine anfallende Abfallart zu konzentrieren als auch von der Konzentration her anzureichern, um einer Verdünnung/Verteilung des Schadstoffes entgegenzuwirken.
- Das (stoffliche) Gefährdungspotential des nach der Aufbereitung nach den einzelnen Optionen anfallenden Lagerstättenwassers

Da alle Verfahren im wesentlichen geschlossen erfolgen und die Anlagen ohnehin nach der *TA-Luft* zu betreiben sind, wird die Luftemission der Schadstoffe im Regelbetrieb gegenüber den Emissionen von festen und flüssigen Abfällen aus dem (aufbereiteten) Lagerstättenwasser vernachlässigbar sein.

5.5.1 Gefährdungspotential nicht verwertbarer Rückstände einschl. NORM

Beim Gefährdungspotential der nicht verwertbaren Rückstände wird sowohl die Menge als auch der Schadstoffgehalt der Rückstände bewertet. Zusätzlich wird beurteilt, inwieweit es innerhalb der einzelnen Optionen gelingt, die Schadstoffe möglichst weit in einem Abfall aufzukonzentrieren. Die Konzentrierung eines Abfalls bedeutet zwar einerseits im Falle von Schadstoffen eine Gefahrenerhöhung, andererseits aber eine dem Schadstoff angemessene Behandlung und einen adäquat gesicherten Verbleib, vergleiche auch [L39]. Im Idealfall erfolgt eine Aufkonzentrierung und Separierung der Schadstoffe um anschließend eine stoffliche Verwertung zu ermöglichen. Dies wird bei keiner der Optionen erreicht, sodass die Aufkonzentrierung im Hinblick auf eine Verwertung nicht betrachtet wird.

Unter Bezug auf Kapitel 2.2, Tabelle 8, und den Vorgaben für die Verfahrensauslegung ergeben sich für das Lagerstättenwasser in Näherung folgende Gesamtanteile an Schadstoffen:

9.600.000 kg/a	Salze
1.250 kg/a	Schwermetalle
52.200 kg/a	BTEX
891 kg/a	KW (Wert aus Verfahrensauslegung, Tabelle 8: 1.030 kg/a)

Hierbei sind die NORM-Bestandteile mit 4.420 MBq/a gewichtsmäßig nicht relevant.

Der Gesamtanteil an Inhaltsstoffen im Lagerstättenwasser beträgt ca. 9.656 Mg/a, entsprechend ca. 7,8 %.

Es wird davon ausgegangen, dass die bei den verschiedenen Aufbereitungsoptionen abgeschiedenen Kohlenwasserstoffe, BTEX und gegebenenfalls anderen Lösemittelgemische (Glykole etc.), grundsätzlich für eine stoffliche, zumindest aber thermische Verwertung zur Verfügung stehen. Hierzu wird auf die Mengenangaben in den Abschnitten „Verbleib der

Schadstoffe“ im Kapitel 4 verwiesen. Demnach stehen sich in den Optionen folgende Abfälle/Abwässer gegenüber:

Option 1 (Injektion):

Es entstehen neben den verwertbaren abgeschiedenen KW ca. 30 Mg/a Sediment aus der Feststoffabscheidung mit unbekannten Gefährdungsmerkmalen (hierzu liegen keine Analysen vor, eine Anreicherung metallischer Hg-Anteile im Sediment ist aber zu erwarten), ca. 50 m³/a verunreinigte Natronlauge, Schwermetalle, BTEX, Salze und NORM, die im aufbereiteten Lagerstättenwasser verbleiben (Fallbeispiel: Tellerseparator).

Option 2 (Flutung):

Unter der Annahme einer für die Verwendung als Flutungsmittel ausreichenden Aufbereitung durch Entfernen der (M)KW/BTEX (Verwertung) mittels Dampfstrippung entstehen keine weiteren schadstoffhaltigen Abfälle bis auf saure und alkalische Reinigungslösungen (Menge unklar). Schwermetalle, Salze und NORM verbleiben im aufbereiteten Lagerstättenwasser.

Option 3a (Verdampfung):

Es bleibt ein hoch salines Gemisch/Schlamm (12.500 m³/a mit 85 % TS = 10.625 Mg/a) mit allen Schwermetallen, Salzen und Radionukliden sowie nichtflüchtigen Bestandteilen zurück. Desweiteren entstehen ca. 52 Mg/a BTEX/KW, die an 120 Mg Aktivkohle gebunden sind, als entweder energetisch verwertbare Fraktion oder unter der Regeneration der A-Kohle als verwertbare Lösemittelfraktion. Es entstehen aus der Vorabscheidung ebenfalls KW (1,4 m³/a), die zumindest für eine energetische Verwertung zur Verfügung stehen. Das Lagerstättenwasser ist soweit aufbereitet, dass es die Anforderungen an eine Direkteinleitung erfüllen kann.

Option 3b (CP-Behandlung):

Neben dem verwertbaren Gemisch aus der Kondensation der Dampfstrippung (ca. 45 Mg/a BTEX/KW) entsteht eine im Konzept nicht spezifizierte Menge an beladener Aktivkohle aus der Nachreinigung des aufbereiteten Lagerstättenwassers. Das so gereinigte Lagerstättenwasser mit den salinen Anteilen der Ursprungszusammensetzung und Rest-NORM-Gehalten von 10 % (ca. 3-4 Bq/L) ist zur Indirekteinleitung vorgesehen (ca. 76 g Salze pro Liter). Als hauptsächlicher Abfall

entstehen 8.125 m³/a (40% TS = 3.250 Mg/a) eines NORM- und Schwermetallbelasteten Fällungsschlammes mit Resten an BTEX/KW (ca. 0,2 %).

Im Vergleich wird bei den aktuellen Entsorgungswegen für das Lagerstättenwasser der größte Teil in Disposalbohrungen verbracht und ein Teil geringer salinen Lagerstättenwassers mit nicht näher bekannten physikalisch-chemischen Verfahren zur Indirekteinleitung – teilweise unter Verschnitt mit Abwasser aus anderen Herkunftsbereichen – aufbereitet [U54].

Tabelle 72: Schadstoffkonzentration (%) in den erzeugten Abfällen der jeweiligen Optionen, der Verbleib der NORM ist hervorgehoben

	Option 1 (Injektion)	Option 2 (Flutung)	Option 3a (Verdampfung)	Option3b (CP-Aufbereitung)
Urspr. LaWa	130.000 m³ 7,8 %	130.000 m³ 7,8 %	130.000 m³ 7,8 %	130.000 m³ 7,8 %
Aufbereitetes LaWa	129.700 m³ 7,8 % + NORM	129.700 m³ 7,75 % + NORM	117.500 m³ 0 %	125.124 m³ 8,29 % + 1/10 NORM
Abfall 1: Fällschlamm, Flotat	ca. 30 Mg/a (schwermetall- haltiges Sediment)	entfällt	entfällt	8.125 m³ 40%TS 0,06 % BTEX/KW 0,01 % SMe ca. + 9/10 NORM
Abfall 2 A-Kohle	entfällt	entfällt	120 Mg (173 Mg) 43,5 % BTEX 0,2 % KW	Unbekannt ? BTEX,KW
Abfall 3 Verdampfungs- rückstand	entfällt	entfällt	12.500 m³ , TS 85 % 76,8 % Salz < 0,01 % SMe + NORM	entfällt
Abfall 4 Kohlenwasser- stoffe	1,4 m³ 90% KW	1,4 m³ 90% KW	1,4 m³ 90% KW	entfällt
Abfall 5 BTEX-Kondensat/ Phasentrenner	entfällt	ca. 52 Mg 99,5 % BTEX	entfällt	45,4 Mg 98,4% BTEX 1,7 % KW
Einstufung des Abfalls	Voraussichtl. gefährlicher Abfall /Altöl, Schlamm prüfen	Gefährlicher Abfall	Gefährlicher Abfall	Gefährlicher Abfall, StrlSchV
Verbringungs- möglichkeit	Verwertung , obertägige Deponie	Energetische Verwertung	Untertagedeponie	Untertagedeponie, StrlSchV
Inhaltsstoffe im aufbereiteten Wasser	Salze, Schwermetalle, BTEX, NORM	Salze, Schwermetalle, NORM	keine	Salz mit 10 % der NORM

Hinsichtlich des Gefährdungspotentials, sowie des Verbleibs und der Verteilung der Schadstoffe auf nicht verwertbare Abfälle lässt sich folgende Bewertung aufstellen. Als Maßstab der Quantifizierung wird das Produkt aus Abfallmenge (Mg/a), (mögliche) Deponieklasse (DK I-IV, Untertagedeponie UTD) und Verteilung auf verschiedene

Nachhaltiger Umgang mit Lagerstättenwasser - Studie

Umweltkompartimente oder Abfallarten mit einer Berücksichtigungsgrenze von ca. 1 % gebildet. Dabei wird folgende, an die Wassergefährdungsklassen angelehnte Umrechnung verwendet:

$$\text{Schadstoffpotential } P = \text{Menge (Mg/a)} \times \text{DK} \times \text{Verteilung}$$

mit 10.000 Mg DK 0 = 1.000 Mg DK I = 100 Mg DK II = 10 Mg DK III = 1 Mg DK IV

Zu der Zuordnung nach Deponieklassen DK wird auf Tabelle 21 verwiesen. Dabei wird die Deponieklasse über die anhand der Lagerstättenwasser-Konzentration „erwartbaren Eluatwerte“ abgeschätzt und auf bestimmte Leitschadstoffe beschränkt. Diese Zuordnung hat deshalb keine Verbindlichkeit und dient nur der Relativierung.

Tabelle 73: Bewertung des Schadstoffverbleibs und der Schadstoffverteilung (Jahresmengen in Mg)

	Option 1	Option 2	Option 3a	Option 3 b
KW	Verwertung	Verwertung	Verwertung (A-Kohle)	Verwertung
BTEX	LaWa 129.700 Mg mit 33,6 Bq/L			
Schwermetalle		LaWa 125.000 Mg mit 3,5 Bq/L		
Salz		3.250 Mg TR DK IV (UTD) mit 1.207 Bq/kg		
NORM				
Sonstige	Natronlauge 50 Mg	Sauer-alk. Reiniger 2,5 Mg/a?		A-Kohle aus Nachreinigung

Geht man von der Erreichbarkeit der hohen Trennbarkeit der NORM-Nuklide vom Salzanteil durch Co-Fällung lt. IAF [U56] aus, so stellt sich Option 3b (CP-Behandlung) als vorteilhaft (geringere Punktzahl) gegenüber der Option 3a (Verdampfung) dar, da sich im Fall 3b die Schadstoffe zwar auf 2 Kompartimente (Abfall und aufbereitetes Lagerstättenwasser, was zunächst auch als „nicht verwertbarer Rückstand“ anfällt) verteilen, aber bei Option 3a die Mengenrelevanz des Abfalls höher ist.

²³ „Eluat“ 9,3 mg/L Blei

²⁴ „Eluat > 5 mg/L Pb aus NORM-haltigem Schwermetall-Trockenrückstand des Fällschlammes

Nachhaltiger Umgang mit Lagerstättenwasser - Studie

Option 1:	Menge (Mg/a) x DK	x Verteilung = 0
Option 2:	Menge (Mg/a) x DK	x Verteilung = 0
Option 3a:	Menge (Mg/a) x DK	x Verteilung = 42.500
Option 3b:	Menge (Mg/a) x DK	x Verteilung = 26.000

Für den zusammenfassenden Vergleich der Optionen fließen die Sachergebnisse wie folgt in die Bewertungsmatrix ein:

Tabelle 74: Bewertung des Gefährdungspotentials der nicht verwertbaren Rückstände

Option	Beschreibung	Bewertung 1: schlechteste Option 5: beste Option	Bemerkungen
1	Injektion (VK-N Z3)	4	Bis auf geringe Mengen von Betriebsstoffen und schwermetallhaltigen Feststoffen fallen keine nicht verwertbaren Rückstände an
2	Flutung in ein Salzbergwerk (Mariagluck, Höfer)	5	Bis auf geringe Mengen von Betriebsstoffen, fallen keine nicht verwertbaren Rückstände an
3a	Direkteinleitung (Verdampfung)	1	Sämtliche nicht verwertbaren Reststoffe werden in einer Abfallfraktion aufkonzentriert
3b	Indirekteinleitung (CP-Anlage)	2	

5.5.2 Gefährdungspotential des aufbereiteten Lagerstättenwassers

Das Gefährdungspotential des aufbereiteten Lagerstättenwassers ist die komplementäre Betrachtung zum Gefährdungspotential der nicht verwertbaren Rückstände. Die im vorangehenden Kapitel verwendete Darstellung der (Schad)stoffgehalte im aufbereiteten Lagerstättenwasser ist hierfür ein unmittelbarer Maßstab:

Option 1:	7,8 % (Schad)stoffanteil	= 100% der (Schad)stoffe inkl. NORM
Option 2:	7,75 % (Schad)stoffanteil	= 99,5% der (Schad)stoffe inkl. NORM
Option 3a:	0,0 % (Schad)stoffanteil	= 0% der (Schad)stoffe
Option 3b	8,29 % (Schad)stoffanteil	= 99,5% der (Schad)stoffe (Salz) mit 1/10 NORM

Während allerdings bei Option 1 und 2 die Hauptschadstoffe wie Schwermetalle, Salz (Chlorid) und radioaktive Isotope erhalten bleiben, findet bei Option 3b eine Reduzierung des Radionuklidgehaltes um 90 % statt sowie eine Entfernung der KW und Schwermetalle. Damit besteht das aufbereitete Lagerstättenwasser nach Option 3b „nur“ noch aus einer hohen Salzbelastung mit geringer radioaktiver Belastung. Am besten stellt sich die Situation unter dem Gesichtspunkt der Lagerstättenwasser-Belastung für die Option 3a dar, bei der eine Verdampfung/Adsorption und damit vollständige Trennung des Lagerstättenwassers von den Inhaltsstoffen stattfindet, sodass ein hoch gereinigtes „Abwasser“ zurückbleibt.

Für den zusammenfassenden Vergleich der Optionen fließen die Sachergebnisse wie folgt in die Bewertungsmatrix ein:

Tabelle 75: Bewertung des Gefährdungspotentials des aufbereiteten Lagerstättenwassers

Option	Beschreibung	Bewertung 1: schlechteste Option 5: beste Option	Bemerkungen
1	Injektion (VNZ3)	1	Gefährdungspotential ggü. ursprünglichem LaWa unverändert
2	Flutung in ein Salzbergwerk (Mariagluck, Höfer)	2	Um BTEX reduziertes Gefährdungspotential
3a	Direkteinleitung (Verdampfung)	5	Reines Wasser ohne Gefährdungspotential
3b	Indirekteinleitung (CP-Anlage)	4	NORM-Belastung

5.6 Grundwasserschutz

Die vorliegende Studie beschränkt sich auf die Betrachtung des Grundwasserschutzes, der den Bereich des Bodens einschließt. Kriterien des Immissionsschutzes für den Bereich Luft spielen im betrieblichen Regelfall im Rahmen dieser Studie nur eine untergeordnete Rolle zur Differenzierung der Optionen, da zum einen nur Anlagen nach dem Stand der Technik (TA-Luft) betrieben werden sollen, zum anderen die Schadstoffanteile selbst – von den BTEX abgesehen – nur eine geringe Volatilität besitzen.

An dieser Stelle sollen insbesondere die Aspekte des Grundwasserschutzes beim endgültigen Verbleib des aufbereiteten Lagerstättenwassers betrachtet werden. Unabhängig von der rechtlichen Definition des Grundwassers wird sich bei dieser Betrachtung nur auf das nutzbare Grundwasser als Schutzgut bezogen. Dies bedeutet, dass Grundwasser, das aufgrund seiner natürlichen Genese nicht ohne aufwändige Aufbereitung nutzbar ist, wird auch nicht als nutzbares Grundwasser betrachtet. Dies betrifft in erster Linie das Lagerstättenwasser, das sich in (ehemaligen) Erdgaslagerstätten befindet, und das Wasser, das als Sole im Bereich von Salzlagerstätten angetroffen wird.

Bei den aus der Aufbereitung anfallenden Abfällen wird demgegenüber eine hinreichende Sicherheit des Grundwassers durch geeignete Deponien im Sinne der DepV vorausgesetzt.

Bei der Betrachtung des Grundwasserschutzes werden neben dem Gefährdungspotential des aufbereiteten Lagerstättenwassers (vgl. Kapitel 5.5.3) konkret folgende Kriterien betrachtet:

- Gefährdung des Grundwassers durch das Verbringen des Lagerstättenwassers zum endgültigen Verbleibort
- Möglicher Austausch des aufbereiteten Lagerstättenwassers mit dem nutzbaren Grundwasser
- Transport der Schlämme

Das aufbereitete Lagerstättenwasser besitzt nur für die Optionen 1, 2 und 3b ein Gefährdungspotential für das Grundwasser (vgl. Kapitel 5.5.3), sodass dieses Kriterium beim aufbereiteten Lagerstättenwasser nach Option 3a nicht betrachtet wird.

Bei der Option 1 besitzt das aufbereitete Lagerstättenwasser ein gegenüber dem ursprünglichen Lagerstättenwasser nahezu unverändertes Gefährdungspotential. Dieses Lagerstättenwasser wird in den Havelsandstein injiziert, wobei die Injektion durch eine vorhandene Bohrung (Völkersen-Nord Z3) erfolgt, die die nutzbaren Grundwasservorkommen durchteuft. Um den Grundwasserschutz für die Injektion, d.h. für das Verbringen des Lagerstättenwassers zum Verbleibort zu gewährleisten, muss die Bohrung integer, d.h. dicht gegen Zutritte oder Austritte, sein. Die Integritätsprüfung wurde für die vorhandene Bohrung Völkersen-Nord Z3 durchgeführt (vgl. Sondergutachten als Anhang B). Hierbei wurden sämtliche Elemente der Bohrung (Rohre, Rohrverbindungen, Zementationen) geprüft.

Das Ergebnis dieser Integritätsprüfung lautet zusammenfassend:

- Die vorhandene Bohrung ist integer, sodass der Grundwasserschutz gewährleistet ist.
- Eine regelmäßige Überprüfung bzw. Überwachung der Bohrung ist notwendig.

Der Verbleibort des aufbereiteten Grundwassers ist der Havelsandstein im Rotliegenden in einer Tiefe von 5000 m. Folgende Elemente stellen sicher, dass ein Austausch des injizierten Lagerstättenwassers mit dem nutzbaren Grundwasser verhindert wird (vgl. Sondergutachten zur Felsmechanik als Sonderteil C):

- Die Sandsteinschichten, in die das Lagerstättenwasser injiziert wird, werden von wasser- (und gas-) undurchlässigen Salzen des Zechsteins und Tonen des Tertiärs überlagert.
- Es sind keine Störungszonen bekannt, die die Schichten des Zechsteins oder des Tertiärs, auf denen Wasser nach oben dringen könnte, betreffen.
- Innerhalb des Havelsandsteins ist durch die Erdgasförderung aus der Lagerstätte eine Druckabsenkung erfolgt, die dazu führt, dass kein ausreichender hydraulischer Druck mehr vorhanden ist und auch nach einer Injektion von Lagerstättenwasser nicht mehr aufgebaut wird, der dazu führen könnte, dass das injizierte Lagerstättenwasser bis in nutzbare Grundwasservorkommen nach oben befördert wird.

Bei der Option 2 wird das Wasser in eine Salzlagerstätte eingeleitet. Das Wasser soll zu einer Stabilisierung des Salzwerks führen. Aufgrund der geringeren Salzkonzentration des Lagerstättenwassers gegenüber einer gesättigten Sole ist dabei gegebenenfalls eine Restlaugungskapazität zu beachten. Letztendlich soll es durch die Konvergenz des umgebenden Salzes zum Einschluss der eingebrachten Stoffe, in diesem Fall des eingebrachten Lagerstättenwassers, kommen, sodass ein Kontakt zum nutzbaren Grundwasser langfristig ausgeschlossen werden soll. Ähnlich wie in Option 1 ist der auf diese Weise postulierte Grundwasserschutz für den jeweiligen Standort zu prüfen. Diese Prüfung ist nicht Bestandteil dieser Studie.

Bei der Option 3a besitzt das aufbereitete Lagerstättenwasser kein relevantes Gefährdungspotential (Aktiv-Kohle gereinigtes Kondensat aus der Verdampfung), sodass hier auch keine Gefährdung für das Grundwasser betrachtet werden muss.

Bei der Option 3b wird das aufbereitete Lagerstättenwasser nach der Behandlung in die Kläranlage eingeleitet. Im Ablauf der Kläranlage können die nach der Aufbereitung in einer CP-Anlage im Lagerstättenwasser noch vorhandenen Schadstoffe, die im Klärprozess nicht entfernt, insbesondere nicht biologisch abgebaut werden konnten, in den Vorfluter gelangen. Zwischen dem Vorfluter und dem nutzbaren Grundwasser besteht ein Austausch, sodass die in den Vorfluter gelangten Schadstoffe zu einem diffusen Eintrag in das Grundwasser führen können.

Die Vorgaben und Maßnahmen, die gegeben sein müssen, um den Grundwasserschutz bezüglich des Verbleibs des Lagerstättenwassers zu gewährleisten, lassen sich folgendermaßen charakterisieren:

Tabelle 76: Vorgaben und Maßnahmen für den Grundwasserschutz

	Aufbereitung zur Injektion (Tellerseparator) Option 1	Aufbereitung zur Flutung im Salzbergwerk (Dampfstrippung) Option 2	Aufbereitung zur (Direkt)einleitung (Verdampfung) Option 3a	Aufbereitung zur Indirekteinleitung und Behandlung im kommunalen Klärwerk Option 3b
Verbleibort	Havelsandstein, Rotliegend	Salzbergwerk	Direkteinleitung Vorfluter	Indirekteinleitung, Vorfluter
Entfernung zum nutzbaren Grundwasser	> 4000 m	> 500 m	0 m	Kanalisation
Vorhandene Barrieren	Sichere geologische (Salze und Tone) und technische Barriere (Bohrung) vorhanden	Geologische Barriere (Salze, Konvergenz)	nicht notwendig, Stapelbecken	Stapelbecken
Technische Sicherung	Lecksicherung, Bohrungsintegrität (BVOT)	Deponieordnung,	Anlagensicherheit	Anlagensicherheit
Organisatorische Sicherung, Überwachung	Überwachung (BVOT)	Überwachung Deponieordnung, Bergaufsicht	Einleiterüberwachung (Erlaubnis, AbwV)	Einleiterüberwachung, Kläranlage (Genehmigung, Satzung/AbwV)

Der Aspekt des Grundwasserschutzes bezüglich der zu deponierenden Abfälle wird in Kapitel 5.7.4 betrachtet.

Für den zusammenfassenden Vergleich der Optionen fließen die Sachergebnisse wie folgt in die Bewertungsmatrix ein:

Tabelle 77: Bewertung des Grundwasserschutzes

Option	Beschreibung	Bewertung 1: schlechteste Option 5: beste Option	Bemerkungen
1	Injektion (VK-N Z3)	4	Sicheres Einbringen und sicherer Verbleib sind gegeben, Abschlag wegen notwendiger Überwachung
2	Flutung in ein Salzbergwerk (Mariagluck, Höfer)	3	Sicheres Einbringen und sicherer Verbleib werden zunächst vorausgesetzt, diese sind im Einzelfall zu prüfen, zum momentanen Zeitpunkt nur bedingt bewertbar
3a	Direkteinleitung (Verdampfung)	5	Das aufbereitete Lagerstättenwasser besitzt kein Gefährdungspotential
3b	Indirekteinleitung (CP-Anlage)	3	Die Einleitung des aufbereiteten Lagerstättenwassers in den Vorfluter führt zu diffusen Einträgen in das Grundwasser

5.7 Nachhaltigkeit

Die Nachhaltigkeitskriterien sind nur bedingt quantifizierbar, da vor allem bisher nur begrenzte Erfahrungen beispielsweise über Langzeiteffekte vorliegen, aus denen sich Quantifizierungen ableiten lassen könnten. Die Nachhaltigkeit der zu bewertenden Optionen spielt für die ökologische Bewertung aber eine wichtige Rolle, sodass auch dieses Kriterium zu bewerten ist. Auch für die Nachhaltigkeit werden daher verschiedene Einzelkriterien definiert, um dadurch die Vergleichbarkeit der Optionen zu ermöglichen.

5.7.1 Veränderung des Verbleibortes durch das aufbereitete Lagerstättenwasser

Die Veränderung des Verbleibortes ist ein Nachhaltigkeitskriterium, bei dem bewertet wird, inwieweit es durch das Lagerstättenwasser zu einer stofflichen Veränderung am Verbleibort kommt. Diese Bewertung betrachtet den Verbleibort unabhängig von seinem ökologischen Nutzen.

Bei der Option 1 verbleibt das Lagerstättenwasser an seinem ursprünglichen Ort bzw. wird diesem wieder zugeführt. Es findet keine Veränderung des Verbleibortes statt.

Bei der Option 2 wird Salzwasser einem Salzbergwerk zugeführt. Der Salzgehalt und die Salzzusammensetzung sind mit der Salzsole aus dem Salzbergwerk im unteren Konzentrationsbereich vergleichbar, sodass sich diesbezüglich nur noch eine geringe Restlaugungskapazität und damit eine geringe Veränderung des Verbleibortes ergeben. Eine hauptsächliche Veränderung des Verbleibortes ergibt sich durch die Zufuhr von anderen NORM-Stoffen gegenüber Kalium-40 und durch die Zufuhr von Schwermetallen, wenn die MKW und BTEX zuvor wie geplant entfernt werden.

Bei der Option 3a wird durch die Aufbereitung ein direkt einleitbares Klarwasser erzeugt, sodass eine Einleitung in einen Vorfluter erfolgen könnte. Hierbei kommt es nicht zu Veränderungen am Verbleib- bzw. Zielort, da aufgrund der Aktiv-Kohle-Nachbehandlung des Kondensates von einer zuverlässigen Abreinigung ausgegangen werden kann.

Bei der Option 3b wird das Lagerstättenwasser durch geeignete physikalisch-chemische Verfahren soweit aufbereitet, dass Schwermetalle, BTEX/KW und NORM soweit entfernt werden, dass das resultierende Lagerstättenwasser indirekt einleitfähig wird und über eine Schmutzwasserkanalisation einer Kläranlage zugeleitet werden kann. Allerdings ist hinsichtlich der verbleibenden Salzfracht und der verbleibenden NORM-Anteile eine Prüfung

im Einzelfall erforderlich, zumal die üblichen Klärverfahren zwar wasserlösliche biologisch abbaubare Stoffe (z.B. Glykole, Alkohole etc.), aber nicht die Salzfracht und nur bedingt die NORM-Stoffe entfernen. So können diese in den Vorfluter gelangen, woraus eine negative Bewertung der Veränderung des „Verbleibortes Grundwasser“ resultiert.

Bei Option 3b bleibt der größte Teil des ursprünglichen Salzgehaltes mit einer Fracht von 9.603 Mg/a im aufbereiteten Lagerstättenwasser. Dies entspricht bei kontinuierlichem Anfall und Ableitung ohne weitere Verdünnung einer Salzfracht von ca. 1,1 Mg/h. Für eine Einleitung im Bereich der Kläranlage Verden ist lt. Angaben des Wasserstraßenamtes Verden (www.wsa-verden.wsv.de) unterhalb der Leinemündung bzw. oberhalb der Allermündung mit einem bordvollen Abfluss von 208 bis 215 m³/s zu rechnen. Dies führt zu einer rechnerischen Vermischung von 1,5 ppm Salz. Dies ist gegenüber gültigen Erlaubnissen in Niedersachsen sehr wenig; zum Vergleich ist nach [L5] im Bereich Giesen eine Ableitung von Haldensickerwässern oder Solen mit einer Konzentration von 400 ppm erlaubt worden.

Für den zusammenfassenden Vergleich der Optionen fließen die Sachergebnisse wie folgt in die Bewertungsmatrix ein:

Tabelle 78: Bewertung der Veränderung des Verbleibortes

Option	Beschreibung	Bewertung 1: schlechteste Option 5: beste Option	Bemerkungen
1	Injektion (VK-N Z3)	5	Keine Veränderung des Verbleibortes
2	Flutung in ein Salzbergwerk (Mariagluck, Höfer)	3	Veränderung durch Zufuhr von NORM-Stoffen und Schwermetallen in geringen Konzentrationen
3a	Direkteinleitung (Verdampfung)	5	Keine Veränderung des Verbleibortes
3b	Indirekteinleitung (CP-Anlage)	1	Lokale Veränderungen im Vorfluter durch Salzeinträge, Diffuser Eintrag von NORM-Stoffen, Aufsatzung des Vorfluters

5.7.2 Beeinflussung der Langzeitstabilität des Verbleibortes durch das aufbereitete Lagerstättenwasser

Die Langzeitstabilität des Verbleibortes ist ein Nachhaltigkeitskriterium, bei dem bewertet wird, inwieweit es durch das Lagerstättenwasser zu einer Verbesserung oder einer

Verschlechterung der Standsicherheit des Verbleibortes bzw. des darüber befindlichen Geländes kommt.

Für die Option 1 werden die felsmechanischen Auswirkungen der Injektion untersucht (vgl. Sondergutachten zur Felsmechanik als Sonderteil C). Die Ergebnisse dieser Untersuchungen können zusammenfassend folgendermaßen dargestellt werden:

- Durch die Injektion des Lagerstättenwassers wird die durch die Erdgasförderung verursachte Druckabsenkung teilweise wieder ausgeglichen bzw. bei andauernder Erdgasförderung verlangsamt. Dadurch wird das seismische Risiko verringert, was wiederum zu einer Erhöhung der Langzeitstabilität des Verbleibortes führt.

Für die Option 2 liegen keine entsprechenden Detailuntersuchungen vor. Prinzipiell ist davon auszugehen, dass die Flutung eines Salzbergwerks notwendig ist, um langfristig eine Absenkung an der Erdoberfläche zu verhindern. Insofern ist davon auszugehen, dass die Flutung eines stillgelegten Salzbergwerks mit Lagerstättenwasser eine stabilisierende Wirkung auf den Verbleibort hat.

Bei den Optionen 3a und 3b (Direkt- oder Indirekteinleitung) kommt es weder zu einer positiven noch zu einer negativen Veränderung der Stabilität des Verbleibortes bzw. angrenzender Bereiche.

Für den zusammenfassenden Vergleich der Optionen fließen die Sachergebnisse wie folgt in die Bewertungsmatrix ein. Eine Verschlechterung der Langzeitstabilität würde hier mit 1 bis 2 Punkten bewertet werden, diese ist aber bei den gegebenen Optionen nicht vorhanden:

Tabelle 79: Bewertung der Langzeitstabilität des Verbleibortes

Option	Beschreibung	Bewertung 1: schlechteste Option 5: beste Option	Bemerkungen
1	Injektion (VK-N Z3)	5	Verbesserung der Stabilität (durch geringere Druckabsenkung) und Verringerung des seismischen Risikos
2	Flutung in ein Salzbergwerk (Mariagluck, Höfer)	5	Verbesserung der Stabilität des Salzbergwerkes gegenüber Flutung mit Süßwasser, Auswirkungen sind ggf. im Einzelfall zu prüfen (Restlaugungskapazität)
3a	Direkteinleitung (Verdampfung)	3	Keine Veränderung
3b	Indirekteinleitung (CP-Anlage)	3	Keine Veränderung

5.7.3 Kapazität des Verbleibortes für Lagerstättenwasser und Abfälle

Aufgrund der erwarteten kontinuierlichen Abnahme des Lagerstättenwasseranfalls an den betrachteten Anfallstellen im Laufe des Gasförderfortschritts ist von einem prognostierten Gesamtanfall von 1,2 Mio Kubikmetern Lagerstättenwasser bis 2030 auszugehen. Mit maximalem Anfall bis zu 130.000 m³/a für 2014/2015 errechnet sich eine durchschnittliche jährliche Aufnahmekapazität über 17 Jahre von ca. 70.000 m³/a.

Die benötigte Kapazität für die bei der Aufbereitung anfallenden Abfälle zur Beseitigung (Deponieraumbedarf) hängt stark von der ausgewählten Option ab und lässt sich näherungsweise über das spezifische Abfallaufkommen (kg Abfall/m³ behandeltes Lagerstättenwasser) darstellen. Bereits in Kapitel 5.5.1, Tabelle 64, wurde für ein jährliches Behandlungsvolumen von 130.000 m³ die Abfallmenge bestimmt:

Tabelle 80: (spezifische) Abfallmenge in Abhängigkeit der Option

Nr	Option	Abfallkonsistenz	Jahresmenge absolut in m ³ oder Mg	Spezifisches Abfallaufkommen kg/m ³ LaWa oder kg/m ³ LaWa	Kapazität bei 1,2 Mio m ³ in Mg
1	Injektion	flüssig	1,4	0,01	12
		fest/Schlamm	30,0	0,23	276
2	Flutung	flüssig	53,4	0,41	492
		fest/Schlamm	30,0	0,23	276
3a	Verdampfung	flüssig	1,4	0,01	12
		fest/Schlamm	ca. 12.700	97,69	117.228
3b	CP-Behandlung	flüssig	45,4	0,35	420
		fest/Schlamm	8.125 ohne Aktiv-Kohle aus Abluft	62,50	75.000

Damit ergibt sich hinsichtlich der Kapazitätsfragen für den Verbleib des aufbereiteten Lagerstättenwassers und die Deponierung insbesondere fester und schlammiger Rückstände folgendes Bild (Deponiekapazität auf Basis des akkumulierten Lagerstättenwasser-Anfalls bis 2030):

Option 1 (Injektion):

- Ausreichende Kapazität für injiziertes Lagerstättenwasser
- mit < 0,5 kg/m³ spezifisches Abfallaufkommen keine Relevanz (Kapazitätsbedarf < 600 Mg)

Option 2 (Flutung):

- Ausreichende Kapazität für Lagerstättenwasser, aber Beschränkung des Flutungszeitraumes, Abhängigkeit von Bergwerksbetreiber und behördlicher Genehmigung
- mit < 0,5 kg/m³ spezifisches Abfallaufkommen keine Relevanz (Kapazitätsbedarf < 600 Mg)

Option 3a (Verdampfung, Direkteinleitung):

Nachhaltiger Umgang mit Lagerstättenwasser - Studie

- unbegrenzte Kapazität für eingeleitetes, entsprechend aufbereitetes Lagerstättenwasser (Vorflut)
- mit 97,7 kg/m³ Abfallaufkommen ist Kapazität für Deponieklasse IV erforderlich (Kapazitätsbedarf ca. 117.000 Mg)

Option 3b (CP-Behandlung, Indirekteinleitung):

- Kapazität durch Kläranlage²⁵ bzw. Einleitgenehmigung begrenzt, vgl. vor allem Restgehalte an NORM/Salzgehalt
- mit ca. 63 kg/m³ spezifisches Abfallaufkommen (Deponieklasse IV) ist entsprechende Kapazität erforderlich (Kapazitätsbedarf ca. 75.000 Mg)

Für den zusammenfassenden Vergleich der Optionen fließen die Sachergebnisse wie folgt in die Bewertungsmatrix ein:

Tabelle 81: Bewertung der Kapazität für das aufbereitete Lagerstättenwasser

Option	Beschreibung	Bewertung 1: schlechteste Option 5: beste Option	Bemerkungen
1	Injektion (VK-N Z3)	5	keine Kapazitätsbeschränkung
2	Flutung in ein Salzbergwerk (Mariagluck, Höfer)	4	keine Kapazitätsbeschränkung, aber Betreiberabhängigkeit
3a	Direkteinleitung (Verdampfung)	2	LaWa unbegrenzt, aber hohes Abfallaufkommen
3b	Indirekteinleitung (CP-Anlage)	1	LaWa-Ableitung eingeschränkt und erhöhtes Abfallaufkommen

²⁵ Die Kapazität einer Kläranlage wird häufig über den CSB-Zulauf ermittelt. Bei einer CSB-Fracht von 156.785 kg/a bei 130.000 m³ LaWa lässt sich über den Auslegungswert eines CSB für Einwohner mit 120 g/EW*d ein Einwohnerwert der Einleitung von aufbereitetem LaWa – jedoch ohne Reduktion des CSB – von ca. 3.580 EW ermitteln, was einer Kläranlage der Größenklasse 2 von 5 entspricht.

5.7.4 Langzeitstabilität des Verbleibortes der festen Abfälle/Rückstände

Die Langzeitstabilität für feste Abfälle und Rückstände ist nur für die Optionen relevant, bei denen entsprechende Abfallmengen zur Deponierung, das sind die Optionen 3a und 3b, anfallen.

Für die hier voraussichtlich geforderte Deponieklasse IV, z.B. eine Untertagedeponie UTD wie ein ehemaliges Salzbergwerk, muss aufgrund des Genehmigungsverfahrens von einer entsprechend Stabilität für die Nutzungsphase ausgegangen werden. Damit lässt sich die Bewertung folgendermaßen vornehmen:

Option 1: nicht relevant

Option 2: nicht relevant

Option 3a: wird aufgrund geordneter Verbringung zur Deponie vorausgesetzt

Option 3b: wird aufgrund geordneter Verbringung zur Deponie vorausgesetzt

Für den zusammenfassenden Vergleich der Optionen fließen diese Feststellungen wie folgt in die Bewertungsmatrix ein:

Tabelle 82: Bewertung der Langzeitstabilität des Verbleibortes der festen Abfälle/Rückstände

Option	Beschreibung	Bewertung 1: schlechteste Option 5: beste Option	Bemerkungen
1	Injektion (VK-N Z3)	5	nicht relevant, da kein wesentliches Abfallaufkommen
2	Flutung in ein Salzbergwerk (Mariagluck, Höfer)	5	nicht relevant, da kein wesentliches Abfallaufkommen
3a	Direkteinleitung (Verdampfung)	3	geordnete Deponie
3b	Indirekteinleitung (CP-Anlage)	3	geordnete Deponie

6 VERGLEICHENDE BEWERTUNG

Wie in Kapitel 5 erläutert erfolgt die Bewertung in vier aufeinander folgenden Stufen.

Die Festlegung von ökologischen, human- und ökotoxischen und Nachhaltigkeitskriterien (Stufe 1) erfolgt in Kapitel 5.2.

Die Überprüfung, inwieweit die Kriterien auf die einzelnen Prozessschritte der Optionen anwendbar sind, einschl. der Begründung eines Verzichts auf bestimmte Kriterien angesichts untergeordneter Relevanz für die Optionsauswahl (Stufe 2), erfolgt in den Kapiteln 5.3 bis 5.7.

In diesen Kapiteln erfolgt auch die Bewertung der Kriterienerfüllung für jede Option auf einer Skala von 1 (schlechteste Option) bis 5 (beste Option); die Zwischenstufen 2 bis 4 werden soweit wie möglich äquidistant festgelegt (Stufe 3). Hierfür werden zum Teil quantitative Kennzahlen ermittelt, über die eine objektive vergleichende Bewertung am besten gelingt. Die wichtigsten Kennzahlen sind in der nachfolgenden Tabelle zusammengestellt.

Tabelle 83: Kennzahlenübersicht aus Kapitel 5

Optionen	Energieverbrauch Transport	Energieverbrauch Aufbereitung	Chemikalienverbrauch	Abfallaufkommen, nicht verwertb. Schlämme
Einheit	MJ/m³	MJ/m³	kg/m³	kg/m³
Option 1 (Injektion)	13,8	67,2	0,4	0,23
Option 2 (Flutung)	58,0	214,9	2,0	0,23
Option 3a (Verdampfung)	16,9	148,4	0,9	97,69
Option 3b (CP- Behandlung)	21,7	221,1	22,5	63,50

Neben diesen „rechnerisch“ ermittelten Kennzahlen werden auch Kriterien in die Bewertung einbezogen, die sich nicht quantifizieren lassen. Auch hierfür werden Kriterien entwickelt, anhand derer sich eine entsprechende Abstufung der Optionen (5: beste Option → 1: schlechteste Option) untereinander festlegen lässt.

Erheblich für die vergleichende Bewertung ist allerdings weniger das in Zahlen ausgedrückte Ranking-Ergebnis als die Nachvollziehbarkeit und Transparenz, die eine Einflussnahme von Einzelbewertungen auf das Gesamtergebnis erkennen lassen.

In der nachfolgenden Tabelle sind die Ergebnisse dieser Bewertung zusammenfassend dargestellt (vgl. Erläuterungen dazu in Kapitel 5.3 bis 5.7).

Tabelle 84: Zusammenfassung der vergleichenden Bewertung der einzelnen Kriterien für die jeweiligen Optionen

BEWERTUNGSKRITERIEN	Option 1 (Injektion)	Option 2 (Flutung)	Option 3a (Direkt- einführung)	Option 3b (Indirekt- einführung)
Ressourcenverbrauch				
Primärenergieverbrauch	5	4	1	4
Betriebs- und Hilfsmittelverbrauch, einschließlich Frischwasser	5	5	5	1
Art und Umfang des Platzbedarfs der Aufbereitungsanlage	3	3	3	3
Emission und Schadstofffreisetzung				
Freisetzungsrisiko Transport (ohne NORM)	5	3	1	3
Freisetzungsrisiko Aufbereitung einschl. Lagerung (ohne NORM)	5	1	2	1
Verteilung der Radioaktivität, Strahlenexposition	5	5	5	2
(Verkehrs)lärm	5	1	5	4
Schadstoffverbleib und –verteilung				
Gefährdungspotenzial nicht verwertbarer Rückstände, einschließlich NORM	4	5	1	2
Gefährdungspotenzial des aufbereiteten Lagerstättenwassers	1	2	5	4
Grundwasserschutz				
Gefährdung des Grundwassers durch das aufbereitete Lagerstättenwasser	4	3	5	3
Nachhaltigkeit				
Veränderung des Verbleibortes durch das aufbereitete Lagerstättenwasser	5	3	5	1
Beeinflussung der Langzeitstabilität des Verbleibortes durch das aufbereitete Lagerstättenwasser	5	5	3	3
Kapazität der Verbleiborte für Lagerstättenwasser und Abfall	5	4	2	1
Langzeitstabilität des Verbleibortes der festen Abfälle/Rückstände	5	5	3	3

In der abschließenden Stufe 4 erfolgt ein Vergleich der Bewertungskriterien untereinander: „weniger wichtig als - gleich wichtig wie – wichtiger als“, wobei die Graduierung logarithmisch über Faktoren 0,1 – 1 – 10 erfolgt. Bei dieser Bewertung werden die einzelnen Bewertungskriterien bezüglich ihrer Relevanz direkt miteinander verglichen. Auf diese Weise ergibt sich für jedes Bewertungskriterium eine Gesamtpunktzahl, die wiederum in eine prozentuale Gewichtung umgerechnet werden kann. Diese Graduierung erfolgt gemeinsam durch die Autoren dieser Studie. Dabei muss klar sein, dass die Bewertungspunkte zwar innerhalb eines Kriteriums, nicht aber zwingend von Kriterium zu Kriterium vergleichbar sind, obwohl letztlich eine Aufsummierung der Punkte erfolgt. Diese Unterschiedlichkeit der Bewertungspunkte ist in dem unterschiedlichen Referenzbezug zu sehen: mal wird der Bewertungsrahmen nur zwischen den Optionen skaliert, mal wird auf einen externen Standard Bezug genommen. Dennoch hat diese Vorgehensweise der Gesamtpunktberechnung ihre Berechtigung, weil andererseits eine Wichtung der Kriterien über eine logarithmische Skalierung vorgenommen wird. Diese Wichtung ist nicht frei von einer Gesamtbewertung der konkreten Fragestellung. So kann der Flächenverbrauch in anderen Bewertungszusammenhängen eine höhere Relevanz haben. Im vorliegenden Fall ist der Flächenverbrauch jedoch im Kontext aller ausgewählten Kriterien von untergeordneter Bedeutung. Grundsätzlich liegt der Vorteil in der vorgestellten Methodik darin, dass die Kriterien gewichtet in ein transparentes Bewertungsraster eingehen und damit für weitere Kriterien oder geänderte Bedingungen offen sind und angepasst werden können. Das Ergebnis der Gewichtung ist in der nachfolgenden Tabelle dargestellt.

Nachhaltiger Umgang mit Lagerstättenwasser - Studie

Tabelle 85: Gewichtung der Bewertungskriterien

BEWERTUNGSKRITERIEN	Ressourcenverbrauch	Primärenergieverbrauch	Betriebs- und Hilfsmittelverbrauch, einschließlich Frischwasser	Art und Umfang des Platzbedarfs der Aufbereitungsanlage	Emission und Schadstofffreisetzung	Freisetzungsrisiko Transport (ohne NORM)	Freisetzungsrisiko Aufbereitung einschl. Lagerung (ohne NORM)	Verteilung der Radioaktivität, Strahlenexposition	(Verkehrs)lärm	Schadstoffverbleib und -verteilung	Gefährdungspotenzial nicht verwertbarer Rückstände, einschließlich NORM	Gefährdungspotenzial des aufbereiteten Lagerstättenwassers	Grundwasserschutz	Gefährdung des Grundwassers durch das aufbereitete Lagerstättenwasser	Nachhaltigkeit	Veränderung des Verbleibortes durch das aufbereitete Lagerstättenwasser	Langzeitstabilität des Verbleibortes durch aufbereitetes LaWa	Kapazität der Verbleiborte für Lagerstättenwasser und Abfall	Langzeitstabilität des Verbleibortes der festen Abfälle/Rückstände	Gesamtpunkte	Gewichtung in Prozent			
Ressourcenverbrauch																								
Primärenergieverbrauch			10	10		1	1	1	10		1	1		0,1		10	1	10	1	57	10,1			
Betriebs- und Hilfsmittelverbrauch, einschließlich Frischwasser		0,1		10		0,1	0,1	0,1	1		0,1	0,1		0,1		0,1	0,1	1	1	14	2,5			
Art und Umfang des Platzbedarfs der Aufbereitungsanlage		0,1	0,1			0,1	0,1	0,1	1		0,1	0,1		0,1		0,1	0,1	0,1	0,1	2	0,4			
Emission und Schadstofffreisetzung																								
Freisetzungsrisiko Transport (ohne NORM)		1	10	10			1	1	10		1	1		0,1		1	1	10	1	48	8,5			
Freisetzungsrisiko Aufbereitung einschl. Lagerung (ohne NORM)		1	10	10		1		1	10		1	1		1		1	10	10	1	58	10,3			
Verteilung der Radioaktivität, Strahlenexposition		1	10	10		1	1		10		1	1		1		1	1	10	10	58	10,3			
(Verkehrs)lärm		0,1	1	1		0,1	0,1	0,1			0,1	0,1		0,1		0,1	0,1	0,1	0,1	3	0,6			
Schadstoffverbleib und -verteilung																								
Gefährdungspotenzial nicht verwertbarer Rückstände, einschließlich NORM		1	10	10		1	1	1	10			1		1		1	10	10	1	58	10,3			
Gefährdungspotenzial des aufbereiteten Lagerstättenwassers		1	10	10		1	1	1	10		1			1		1	1	10	1	49	8,7			
Grundwasserschutz																								
Gefährdung des Grundwassers durch das aufbereitete Lagerstättenwasser		10	10	10		10	1	1	10		1	1				1	1	10	10	76	13,5			
Nachhaltigkeit																								
Veränderung des Verbleibortes durch das aufbereitete Lagerstättenwasser		0,1	10	10		1	1	1	10		1	1		1			1	1	1	39	6,9			
Langzeitstabilität des Verbleibortes durch aufbereitetes LaWa		1	10	10		1	0,1	1	10		0,1	1		1		1		10	1	47	8,4			
Kapazität der Verbleiborte für Lagerstättenwasser und Abfall		0,1	1	10		0,1	1	0,1	10		0,1	0,1		0,1		1	0,1		1	25	4,4			
Langzeitstabilität des Verbleibortes der festen Abfälle/Rückstände		1	1	10		1	1	0,1	10		1	1		0,1		1	1	1		29	5,2			
Gesamt																				564	100			
Ranking																								
Vergleich																								
gleichwertig																								
wichtiger																								
weniger wichtig																								

Aus dieser Bewertung ergeben sich aus den Einzelkriterien für die übergeordneten Bewertungskriterien folgende Prozentanteile an der Gesamtbewertung:

Tabelle 86: Gewichtung der übergeordneten Bewertungskriterien

Übergeordnetes Bewertungskriterium	Anzahl der Einzelkriterien	Gewichtung in Prozent, gerundet
Ressourcenverbrauch	3	13
Emission und Schadstofffreisetzung	4	30
Schadstoffverbleib- und –verteilung	2	19
Grundwasserschutz	1	14
Nachhaltigkeit	4	25

Die Zusammenführung der Bewertungen in den Stufen 3 und 4 führt zu einer Bewertungsmatrix, wo für jedes Bewertungskriterium und für jede Option ein Wert ermittelt wird, der sich aus der Multiplikation der Punktzahl aus der vergleichenden Bewertung (Stufe 3) und der ermittelten Relevanz des einzelnen Bewertungskriteriums (Stufe 4) ergibt. Die auf diese Weise errechneten Werte werden für jede Option aufsummiert. Das Ranking für die einzelnen Optionen ergibt sich direkt aus diesen Summen. Demnach ist die Option mit der höchsten ermittelten Summe die im Sinne der Studie beste Option. Die maximal zu erreichende Punktzahl beträgt 5. Die Darstellung erfolgt in Tabelle 87 auf der folgenden Seite.

Tabelle 87: Ermittlung des Rankings aus Punktzahl (P) und Relevanz (R)

BEWERTUNGSKRITERIEN	Gewichtung in Prozent	Option 1 (Injektion)		Option 2 (Flutung)		Option 3a (Direkt- einleitung)		Option 3b (Indirekt- einleitung)	
		P	R	P	R	P	R	P	R
Ressourcenverbrauch	13,0								
Primärenergieverbrauch	10,1	5	0,51	4	0,40	1	0,10	4	0,40
Betriebs- und Hilfsmittelverbrauch, einschließlich Frischwasser	2,5	5	0,13	5	0,13	5	0,13	1	0,03
Art und Umfang des Platzbedarfs der Aufbereitungsanlage	0,4	3	0,01	3	0,01	3	0,01	3	0,01
Emission und Schadstofffreisetzung	29,7								
Freisetzungsrisiko Transport (ohne NORM)	8,5	5	0,43	3	0,26	1	0,09	3	0,26
Freisetzungsrisiko Aufbereitung einschl. Lagerung (ohne NORM)	10,3	5	0,52	1	0,10	2	0,21	1	0,10
Verteilung der Radioaktivität, Strahlenexposition	10,3	5	0,52	5	0,52	5	0,52	2	0,21
(Verkehrs)lärm	0,6	5	0,03	1	0,01	5	0,03	4	0,02
Schadstoffverbleib und –verteilung	19,0								
Gefährdungspotenzial nicht verwertbarer Rückstände, einschließlich NORM	10,3	4	0,41	5	0,52	1	0,10	2	0,21
Gefährdungspotenzial des aufbereiteten Lagerstättenwassers	8,7	1	0,09	2	0,17	5	0,44	4	0,35
Grundwasserschutz	13,5								
Gefährdung des Grundwassers durch das aufbereitete Lagerstättenwasser	13,5	4	0,54	3	0,41	5	0,68	3	0,41
Nachhaltigkeit	24,9								
Veränderung des Verbleibortes durch das aufbereitete Lagerstättenwasser	6,9	5	0,35	3	0,21	5	0,35	1	0,07
Beeinflussung der Langzeitstabilität des Verbleibortes durch das aufbereitete Lagerstättenwasser	8,4	5	0,42	5	0,42	3	0,25	3	0,25
Kapazität der Verbleiborte für Lagerstättenwasser und Abfall	4,4	5	0,22	4	0,18	2	0,09	1	0,04
Langzeitstabilität des Verbleibortes der festen Abfälle/Rückstände	5,2	5	0,26	5	0,26	3	0,16	3	0,16
Gesamtpunktzahl			4,41		3,58		3,13		2,51
Ranking			1.		2.		3.		4.

Die Zusammenführung der beiden Bewertungsstufen „Erfüllung der Beurteilungskriterien“ (Stufe 3) und „Relevanz der Beurteilungskriterien“ (Stufe 4) führt zu einer Bewertungsmatrix, in welcher für jedes Bewertungskriterium und für jede Option ein Wert ermittelt wird, der sich aus der Multiplikation der Punktzahl aus der vergleichenden Bewertung (Stufe 3) und der ermittelten Relevanz des einzelnen Bewertungskriteriums (Stufe 4) ergibt. Die auf diese Weise errechneten Werte werden für jede Option aufsummiert. Die Reihenfolge (Ranking-Ergebnis) für die einzelnen Optionen ergibt sich direkt aus diesen Summen.

Demnach ist die Option mit der höchsten ermittelten Summe die im Sinne der Studie beste Option (Tabelle 88, vgl. auch Tabellen 85 bis 87).

Tabelle 88: Aus den Summenwerten ermittelte Reihenfolge (Ranking-Ergebnis)

Option	Punktzahl	Ranking
Option 1 (Injektion)	4,4	1.
Option 2 (Flutung eines Salzbergwerkes)	3,6	2.
Option 3a (Direkteinleitung)	3,1	3.
Option 3b (Indirekteinleitung)	2,5	4.

Die vergleichende Bewertung der untersuchten Optionen ergibt ein eindeutiges Ergebnis.

Demnach ist die Option 1 (Injektion des Lagerstättenwassers über die Bohrung Völkersen-Nord Z3 in die Gesteinsschichten des Rotliegenden in über 5000 m Tiefe) im Hinblick auf den langfristigen Umgang und im Hinblick auf die Umweltverträglichkeit und die Nachhaltigkeit die beste Option. Entscheidend für die positive Bewertung ist, neben dem relativ geringen Ressourcenverbrauch, die geringe Emission und Schadstofffreisetzung aufgrund der technisch begründeten geringen Aufbereitung, sowie der sichere Verbleib des Lagerstättenwassers, der unter anderem mit den Untersuchungen zur Felsmechanik und zur Bohrungsintegrität belegt wird.

Die nächstbesten Lösungen im Sinne der Zielsetzung der Studie sind demnach die Verwertung des Lagerstättenwassers zur Flutung eines Salzbergwerkes (Option 2) und die Aufbereitung des Lagerstättenwassers für eine Direkteinleitung mittels Verdampfung (Option 3a).

Die Option 2 (Verwertung des Lagerstättenwassers zur Flutung eines Salzbergwerkes) erhielt in den meisten Beurteilungskriterien unter den angenommenen Voraussetzungen zunächst eine mittlere Bewertung. Zum momentanen Zeitpunkt können allerdings viele

Bewertungskriterien nicht abschließend beurteilt werden, sodass hier gegebenenfalls nach Festlegung der genauen Randbedingungen (insbesondere der genaue Standort eines geeigneten Bergwerks und der notwendige Aufbereitungsgrad) anhand der aufgezeigten Bewertungskriterien eine Neubewertung durchgeführt werden sollte.

Die Option 3a (Aufbereitung des Lagerstättenwassers mittels Verdampfung für eine Direkteinleitung) wurde in erster Linie wegen der vollständigen Elimination der Schadstoffe aus dem Lagerstättenwasser positiv bewertet. Der hohe Energieverbrauch und das hohe Gefährdungspotenzial der nicht verwertbaren Rückstände führten zu einer Abstufung dieser Option.

Bei der Option 3b (Aufbereitung des Lagerstättenwassers mittels chemisch-physikalischer Behandlung für eine Indirekteinleitung mit anschließender Weiterbehandlung in einer Kläranlage). Auch wenn diese Option dem Stand der Technik entspricht und in vielen Industriezweigen die am häufigsten eingesetzte Technik zur Verwertung/Beseitigung flüssiger Abfälle ist, werden hier die Nachhaltigkeitskriterien am wenigsten erfüllt. Bei dieser Option resultiert die ökologisch nachrangige Bewertung vorwiegend aus den angelegten Maßstäben bezüglich der Emission und der Schadstofffreisetzung bzw. -verteilung.

7 ALTERNATIVOPTIONEN UND ERGÄNZUNGEN

Die in der Studie betrachteten Optionen 1, 2, 3a und 3b zur Aufbereitung des Lagerstättenwassers wurden unter den folgenden Randbedingungen bewertet:

- a) Die „Vorbehandlung“ des Lagerstättenwassers innerhalb der Gastrocknungsanlage des jeweiligen Sondenplatzes ist nicht Gegenstand der Studie; vielmehr wird für die weitere Aufbereitung von einem Modellabwasser der Mischzusammensetzung entsprechend dem produktionsgewichteten Mittelwert ausgegangen. Für spezielle technische Fragestellungen kann es darüberhinaus sinnvoll sein, die tatsächliche Zusammensetzung des Lagerstättenwassers an der jeweiligen Anfallstelle zu betrachten.
- b) Die Aufbereitung des Lagerstättenwassers zum weiteren Verbleib erfolgt an einer gegenüber den Anfallstellen möglichst zentral gelegenen Stelle. Für die Vergleichsbetrachtung wurde als zentraler Aufbereitungsort im Falle der Injektion (Option 1) der Sondenplatz Völkersen-Nord Z3 (Injektionsort) gewählt, für die übrigen Optionen wurde eine Aufbereitung im Raum Verden unterstellt, für die Option 2 (Flutung eines Salzbergwerkes) wurde zusätzlich die Variante einer Aufbereitung am Salzbergwerk betrachtet. Zusätzlich zu dieser Vorgabe wurden innerhalb der Studie grundlegende Aspekte sowie die konkreten Vor- und Nachteile einer dezentralen gegenüber einer zentralen Aufbereitung betrachtet (vgl. nachfolgendes Kapitel 7.1).
- c) Der Transport des Lagerstättenwassers von den Anfallstellen zur Aufbereitung erfolgt mit Tankfahrzeugen (TKW) im öffentlichen Straßenverkehr. Zusätzlich zu dieser Vorgabe wurden innerhalb der Studie die wesentlichen Aspekte von Transportalternativen betrachtet (vgl. Kapitel 7.2).

7.1 Zentrale bzw. dezentrale Behandlung

Die anlagentechnische Optimierung fordert in der Regel eine Zusammenlegung von Behandlungskapazitäten, da das Verhältnis von Größe der Anlage (Durchsatz) zu Aufwand für den Betrieb sich mit zunehmender Größe günstig entwickelt.

Die folgenden Kriterien können aber eine Entscheidung über den Vorzug kleiner dezentraler Aufbereitungsanlagen gegenüber größeren Zentralanlagen nahelegen. So ist eine Dezentralisierung der Aufbereitung grundsätzlich nur angezeigt, wenn

1. große Unterschiede der Zusammensetzung des Lagerstättenwassers, welche bereits grundsätzlich eine unterschiedliche technische Behandlung erfordern, bestehen,
2. die Gefahr einer unzulässigen Verdünnung der Schadstoffe zur Erreichung von Schadstoffgrenzwerten besteht,
3. ein sehr hohes Transportrisiko für das unbehandelte Lagerstättenwasser vorliegt.

Insgesamt lassen sich hierzu folgende Aussagen treffen:

Die analytischen Bandbreiten zeigen zwar ein Spektrum deutlicher Konzentrationsunterschiede jeweils einzelner Parameter (Salzgehalt, BTEX-Anteil, NORM-Gehalte etc.), aber es zeigt sich auch, dass eine regionale Charakterisierung bezogen auf die Anfallstellen nicht möglich ist, was der Veränderung der Menge und Zusammensetzung im Laufe der Ausförderung zuzurechnen ist. Der bei einer zentralen Aufbereitung über die Zusammenführung stattfindende Konzentrationsausgleich und die Mengenzusammenführung bieten demgegenüber eine Voraussetzung für die in der Regel wesentlich effizienteren kontinuierlichen Verfahrensprozesse mit „konstanter“ Zulaufzusammensetzung. Mit dieser Mengenzusammenführung ist keine unzulässige Verdünnung der Schadstoffe verbunden.

Bei der dezentralen Aufbereitung ist durch den Batchprozess (Chargenbetrieb) die ökologische (und ökonomische) Effizienz i.A. bei großen Mengen deutlich geringer, da unter anderem die An- und Abfahrvorgänge zu berücksichtigen sind. Die dezentrale Behandlung bietet auch keinen Vorteil für die Aufkonzentrierung oder vollständige Entfernung der Schadstoffe; vielmehr müssten aufwändige spezifische Kleinanlagen mit geringerer Auslastung geplant werden. Insgesamt sind die Unterschiede der Schadstoffanteile und die Mengen nicht groß genug, um bei den einzelnen Optionen in der Dezentralisierung einen

Vorteil zu sehen, entsprechend wird eine zentrale Aufbereitung des Lagerstättenwassers empfohlen.

Tabelle 89: Empfehlung zur zentralen/dezentralen Aufbereitung bei den einzelnen Optionen

Option	Empfehlung
Option 1 (Injektion)	Eine Optimierung der Aufbereitung kann im Zusammenhang mit der Verbesserung der dezentralen Schwerkraftabscheidung an den jeweiligen Anfallstellen erfolgen
Option 2 (Flutung Salzbergwerk)	Für die vorgeschlagene Aufbereitung sollte die Vorbehandlung am Standort des Bergwerkes, das für die Flutung vorgesehen ist, vorgenommen werden, um zusätzliche Transporte des Lagerstättenwassers zu vermeiden. In Abhängigkeit von der Aufbereitungsnotwendigkeit kann die Optimierung der Aufbereitung eventuell über die Verbesserung der dezentralen Vorbehandlung an den jeweiligen Anfallstellen erfolgen.
Option 3a (Direkteinleitung)	Die Verdampfung sollte in jedem Fall zentral in möglichst kontinuierlicher Betriebsweise erfolgen.
Option 3b (Indirekteinleitung)	Eine physikalisch-chemische, mehrstufige Behandlung bietet Ansätze für eine dezentrale erweiterte Vorbehandlung durch Verlagerung einzelner Prozessschritte: so ließe sich die Fällung/Flockung mit Bariumsulfat/Eisenhydroxid zur Abtrennung von 90 % NORM auch an den Orten durchführen, die erhöhte NORM-Konzentrationen aufweisen. Dadurch könnte an zentraler Stelle die Behandlung des dort vorbehandelten Lagerstättenwasser zusammen mit den anderen Lagerstättenwässern aus geringer NORM-konzentrierten Bohrungen durchgeführt werden und sich auf die anderen Parameter konzentrieren. Dadurch könnte auch ein Verschleppen der höheren radioaktiven Gehalte vermieden werden.

Nach den Feststellungen der Studie ist das Transportrisiko bei keiner der betrachteten Optionen so hoch, dass aus diesem Grunde auf Transporte des unbehandelten Lagerstättenwassers verzichtet werden müsste.

7.2 Transport (LKW / Bahn / Pipeline)

Die Transportkette beginnt mit der Abfüllung des TKW an der Anfallstelle auf dem jeweiligen Sondenplatz und endet mit der Befüllung eines Stapel- bzw. Misch tanks am Ort der Aufbereitung. Ein Wechsel des Transportmittels bedeutet immer zusätzliche Umschlagflächen mit der zusätzlichen Gefahr von Stoffaustritt.

Als Transportalternative zu den TKW-Transporten kommt der Transport mit der Bahn in Betracht. Da die entlegenen Anfallstellen nicht über eigene Gleisanschlüsse verfügen, wäre

der Transportweg in der Regel mit zwei Umschlägen verbunden. Eine solche Risikoerhöhung wäre nur bei langen Transportstrecken über mehrere hundert Kilometer zu rechtfertigen, da die Bahntransporte mithin als transportsicherer als die Straßenbeförderungen anzusehen sind.

Eine weitere Transportalternative gegenüber dem TKW-Transport besteht im Bau unterirdischer Rohrleitungsanlagen entsprechend den Vorgaben der Verordnung über Anlagen zum Umgang mit wassergefährdenden Stoffen bzw. der Rohrleitungsrichtlinie.

Bei der Planung solcher Anlagen ist ebenfalls zu berücksichtigen, dass eine Rohrleitung nur für durchsatzrelevante Streckenabschnitte sinnvoll ist. Eine Netzplanung sollte erkennen lassen, dass beispielsweise Förderfelder im entfernten Raum Celle zur Anbindung an die Völkersen Nord Z3 oder zu einer Aufbereitungsanlage im Raum Verden über Rohrleitungen wenig geeignet sind. Andererseits lassen sich die Transportstrecken von den Bohrungen im Förderfeld Rotenburg und im Förderfeld Völkersen möglicherweise sinnvoll zu ein oder mehreren Knotenpunkten zusammenführen und diese über eine Rohrleitung bis zur Völkersen Nord Z3 oder bis zu einer zentralen Aufbereitungsanlage anschließen. Auch bei dieser Variante entstehen aber wieder Umschlags- und Abfüllbereiche, die ein zusätzliches Schadensrisiko darstellen.

Das Risiko des Transports in Rohrleitungen ist nach dem heutigen Stand sehr gering, zumal man der Eintrittswahrscheinlichkeit eines Schadens durch Auswahl geeigneter Werkstoffe und Leckageüberwachungen deutlich entgegenwirken kann. Das Schadensausmaß ist, ähnlich dem TKW-Transport, stark vom Schadensort (Wasserschutzgebiet, Wohngebiet) abhängig. Die logistische und umweltrisikoorientierte Optimierung des Transportes muss gegebenenfalls für die einzelnen Optionen betrachtet werden und einer separaten Planung vorbehalten bleiben.

8 GUTACHTERLICHE EMPFEHLUNG UND AUSBLICK

Die Studie hatte zum Ziel, der RWE Dea AG begründete und belastbare Empfehlungen für den nachhaltigen Umgang mit dem bei der Erdgasförderung anfallenden Lagerstättenwasser geben zu können. Hierfür wurden vier verschiedene Optionen betrachtet und bezüglich verschiedener ökologischer Bewertungskriterien beurteilt.

Die innerhalb der Studie entwickelten Kriterien und Bewertungsschemata sind gegebenenfalls aber auch auf weitere oder auf veränderte Optionen anwendbar.

Bei der vergleichenden Betrachtung zeigt sich, dass die Injektion des Lagerstättenwassers in das Rotliegende, d.h. in den Horizont, aus dem sowohl das Erdgas als auch das Lagerstättenwasser ursprünglich herkommen, als ökologisch günstigste Option bewertet wird. Entscheidend für diese positive Bewertung sind, neben dem geringeren Ressourcenverbrauch, die geringe Emission und Schadstofffreisetzung, sowie der sichere Verbleib des Lagerstättenwassers. Der sichere Verbleib des Lagerstättenwassers kann für die Bohrung Völkersen Nord Z3 belegt werden. Inwieweit die für diese Option geplante technische Aufbereitung des Lagerstättenwassers langfristig ausreicht, kann noch nicht abschließend beurteilt werden.

Es wird empfohlen, diese Option weiterzuverfolgen und die entsprechenden technischen Konzepte zur Aufbereitung und zur Injektion vorrangig umzusetzen. Bei Änderungen in den technischen Zielvorgaben ist zu prüfen, ob es dadurch zu einer veränderten ökologischen Bewertung kommt. Hierfür sollten – zur Wahrung einer Vergleichbarkeit – möglichst die innerhalb der Studie entwickelten Kriterien herangezogen werden.

Die beiden nächstfolgenden Optionen 2 (Verwertung des Lagerstättenwassers zur Flutung in einem Salzbergwerk) und 3a (Aufbereitung des Lagerstättenwassers für eine Direkteinleitung durch Verdampfung) unterscheiden sich bei der Betrachtung einzelner Beurteilungskriterien besonders deutlich und hängen deshalb besonders von der gewählten Gewichtung einzelner Beurteilungskriterien ab.

Die Option 2 (Flutung eines Salzbergwerkes) erhält ökologisch die zweitbeste Bewertung. Die Bewertung dieser Option ist allerdings aufgrund fehlender konkreter Vorgaben des Bergwerkbetreibers und/oder der Aufsichtsbehörde, für die innerhalb der Studie gegebenenfalls plausible Annahmen getroffen worden sind, noch nicht abschließend

möglich. So können auch Optimierungsmöglichkeiten für diese Option zum Teil nicht ausreichend berücksichtigt werden. Es wird empfohlen, zunächst die noch offenen Fragen bezüglich der notwendigen Aufbereitung und bezüglich eines konkreten Bergwerkes mit der Aufsichtsbehörde bzw. mit dem Betreiber zu klären. Gegebenenfalls sind nach Klärung dieser Frage die einzelnen Bewertungskriterien für diese Option nochmal konkret zu untersuchen bzw. zu bestimmen, um sie mit den anderen Optionen in einer ähnlichen Untersuchungstiefe vergleichen zu können.

Die Option 3a (Direkteinleitung) erhält die drittbeste Bewertung. Bei dieser Option 3a führen insbesondere das hohe Abfallaufkommen und das darin enthaltene NORM und der hohe Energiebedarf zu einer nachrangigen Bewertung. Für diese Option sind gegebenenfalls Möglichkeiten zur Steigerung der Energieeffizienz bei der Aufbereitung des Lagerstättenwassers zu prüfen, die dann zu einer Neubewertung dieser Option führen kann.

Die Option 3b, das Lagerstättenwasser für eine Indirekteinleitung aufzubereiten, erhält bei der vergleichenden Betrachtung die niedrigste Bewertung. Sowohl die ökologische Bewertung als auch die gutachterliche Empfehlung beziehen sich dabei zunächst nur auf das geprüfte technische Verfahren. Hier ist gegebenenfalls zu prüfen, ob es zu gegebener Zeit durch die Entwicklung neuer technologischer Verfahren oder Verfahrensänderungen zu einer anderen Bewertung kommen könnte. Aus der Bewertung der Kriterienerfüllung lassen sich hierfür entsprechende Optimierungspotentiale ablesen. So ist bei dieser Option insbesondere eine weiter verbesserte Trennung der Nuklide von den gelösten Salzen anzustreben. Es ist zudem zu prüfen, ob diese Option für Teilströme des Lagerstättenwassers mit einer spezifischen Zusammensetzung eine ökologisch sinnvolle Option sein kann.

Insgesamt bieten alle betrachteten Optionen eine grundsätzliche Möglichkeit für den langfristigen Umgang und die Entsorgung des in Niedersachsen bis 2030 anfallenden Lagerstättenwassers der RWE Dea AG. Die in den nächsten Jahren (ab 2015) abnehmende Lagerstättenwassermenge und die aufgezeigten Optimierungsansätze lassen für alle Optionen sowohl eine rechtskonforme als auch eine nach heutigen Gesichtspunkten ökologisch vertretbare Lösung erkennen. Unter heutigen Bedingungen und mit dem derzeitigen Kenntnisstand wird allerdings empfohlen, vorrangig die Injektion des Lagerstättenwassers über die Bohrung Völkersen-Nord Z3 in das Rotliegende zu verfolgen.

Sehnde, den 01.07.2014

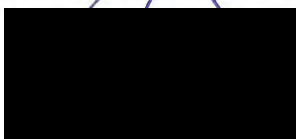
IGU – Institut für Geologie und Umwelt GmbH



Dipl.-Geol. Dr. Hanno Paetsch



Umweltkanzlei Dr. Rhein Beratungs- und Prüfgesellschaft mbH



Dipl.-Chem. Dr. Hans-Bernhard Rhein



Piewak & Partner GmbH – Ingenieurbüro für Hydrogeologie und Umweltschutz



Dipl.-Geol. Dr.-Ing. Thomas Röckel

PIEWAK UND PARTNER GMBH
INGENIEURBÜRO FÜR
HYDROGEOLOGIE UND UMWELTSCHUTZ
Jean-Paul-Str. 30
95444 Bayreuth
Tel. 0921 / 507036-0 - Fax 0921 / 507036-10

IDEAS – Ing.-Büro Axel Sperber



Dipl.-Ing. Axel Sperber



9 VERZEICHNISSE

9.1 Abkürzungsverzeichnis

Hinweis: Zu den Abkürzungen der Rechtsquellen s. dort.

abfilt.	abfiltrierbare (Feststoffe)
absetzb.	absetzbare (Feststoffe)
AGW	Arbeitsplatzgrenzwert, s. auch MAK
A-Kohle	Aktivkohle
AOX	Adsorbierbare organisch gebundene Halogene
ASN	Abfallschlüsselnummer
BCF	Biokonzentrationsfaktor
BGBI.	Bundesgesetzblatt
BGR	Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe
BMU	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit
Bq	Radiokative Einheit Bequerel, entspricht 1 Zerfall pro Sekunde
BSB	Biologischer Sauerstoffbedarf
BTEX	aromatische Kohlenwasserstoffe Benzol, Toluol, Ethylbenzol und Xylole
BVT	Beste verfügbare Technik (engl.: BAT – best available technology)
CFA	Cold Frac-Anlage
CP-Anlagen	Chemisch-physikalisch Behandlungsanlagen
CSB	Chemischer Sauerstoffbedarf
DEV	Deutsche Einheitsverfahren
DIN	Deutsche Industrienorm
DK	Deponieklasse
DOC	Gelöster organischer Kohlenstoff, engl. dissolved organic carbon
DWA	Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall
EFA	Effizienzagentur
ELF	Elektrische Leitfähigkeit

eoh	einfach oder herkömmlich (wasserrechtlicher Anlagenbegriff)
EN	Europäische Norm
EPA	Environmental Protection Agency, amerik. Umweltschutzbehörde
FBN	Förderbetrieb Niedersachsen
freisetzb.	freisetzbar
GC-MS	Gaschromatographie mit massenspektrometrischer Detektion
ges.	Gesamt
GFS	Geringfügigkeitsschwellenwert
H 53	Deutsches Einheitsverfahren H 53 zur Bestimmung abscheidbarer Kohlenwasserstoffe
HEL	Heizöl, extra light
IC	Ionenchromatographie
inkl.	inklusive
i.A.	im Allgemeinen
i.F.	in Form, in Fassung
i.V.	in Verbindung
ISO	Internationale Organisation für Normung, engl.: International Organization for Standardization
KEA	kumulierter Energieaufwand
Konz.	Konzentration
KW	Kohlenwasserstoff, s. auch MKW
KWST	Kohlenwasserstoffe, s. auch KW, MKW
l. freis.	leicht freisetzbar
LAGA	Bund-/Länder-Arbeitsgemeinschaft Abfall
LaWa	Lagerstättenwasser
LAWA	Bund-/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser
LBEG	Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie
LCA	Life Cycle Assessment
LCKW	Leichtflüchtige chlorierte Kohlenwasserstoffe
LHKW	Leichtflüchtige halogenierte Kohlenwasserstoffe
LKW	Lastkraftwagen
LTS	Low Temperature Separation
MAK	Maximale Arbeitsplatzkonzentration, s. auch AGW

MKW	Mineralölkohlenwasserstoffe, s. auch KW
mob.	mobilisiert
MSF	Mehrschichtfilter
MTBE	Methyl-tert-butylether bzw. 2-Methoxy-2-methylpropan
MW	Mittelwert
n.b.	nicht bestimmt
NGS	Niedersächsische Gesellschaft für Sondermüllentsorgung
NORM	Natürlich vorkommendes radioaktives Material, engl.: Naturally Occuring Radioactive Material
PAK	Polycyclische aromatische Kohlenwasserstoffe
PCB	Polychlorierte Biphenyle
PGM	produktionsgewichteter Mittelwert
pH	negativer dekadischer Logarithmus der Wasserstoffionenkonzentration
PIUS	Produktionsintegrierter Umweltschutz
PNEC	predicted no effect concentration
Sv	Sievert, Einheit der radioaktiven Dosis (1 Sv = 100 rem = 1 J/kg)
TDS	Summe gelöster Feststoffe, engl.: total dissolved solids
titrim.	titrimetrisch
TKW	Tankkraftwagen
TM	Trockenmasse, s. auch TR, TS
TOC	Gesamter organischer Kohlenstoff, engl.: total organic carbon
TR	Trockenrückstand, s. auch TM, TS
TS	Trockensubstanz, s. auch TM, TR
UBA	Umweltbundesamt
UEG	Untere Explosionsgrenze
UTD	Untertagedeponie
UVP	Umweltverträglichkeitsprüfung
UVU	Umweltverträglichkeitsuntersuchung
WGK	Wassergefährdungsklasse
ZGTA	Zentrale Gastrocknungsanlage

9.2 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Erdgasfelder mit Angabe der im Untersuchungszeitraum in Förderung befindlichen Bohrplätze.....	10
Tabelle 2:	Entfernungen der Bohrungen zu den jeweiligen Zielorten der verschiedenen Optionen (eigene Erhebung und [U27]).....	16
Tabelle 3:	Prognostizierte Lagerstättenwassermengen einzelner Bohrungen.....	20
Tabelle 4:	Produktionsgewichtete Mittelwerte und Frachten nach [U60] (die angegebenen Werte beruhen auf den von der RWE Dea AG zur Verfügung gestellten Daten [U31, U58], die Werte sind auf drei signifikante Stellen gerundet angegeben, für die weiteren Berechnungen, vgl. nachfolgende Tabellen, werden die zur Verfügung gestellten, nicht gerundeten Werte verwendet)	24
Tabelle 5:	Analysenmethoden lt. Angaben des Analysenlabors GBA [U58, Prüfbericht-Nr.: 2013P604602/ 1], k.A. = keine Angabe	29
Tabelle 6:	Übersicht der vorhandenen B9-Behälter lt. „Auswertung B9“ [U62].....	35
Tabelle 7:	Produktionsgewichtete Mittelwerte und Frachten des Lagerstättenwassers, nach chemischen Kriterien gruppiert, die Werte sind auf drei signifikante Stellen gerundet angegeben (die in der Spalte „Bemerkung“ angegebene Relevanz bezieht sich im wesentlichen auf die ökotoxikologische Betrachtung innerhalb der Studie)	37
Tabelle 8:	Repräsentative Schadstofffrachten im Lagerstättenwasser	40
Tabelle 9:	Vergleich der Salzzusammensetzung Meersalz / Lagerstättenwasser	41
Tabelle 10:	Einteilung salzhaltiger Wässer, vgl. auch [L5].....	42
Tabelle 11:	Vergleich von Salzgehalten im Mineralwasser und genehmigten Direkteinleitungen mit der Zusammensetzung von Lagerstättenwasser	43
Tabelle 12:	Umweltdaten Benzol nach [L6].....	45

Tabelle 13:	Zerfallsreihe, Zerfallsart, Atommasse und Halbwertszeit der im Lagerstättenwasser vorkommenden Isotope	47
Tabelle 14:	Vergleichswerte der NORM-Isotope im Lagerstättenwasser mit Umweltwerten	49
Tabelle 15:	Untersuchungen der Feststoffanteile im Lagerstättenwasser durch Fa. Aquaconsult / RWE Dea AG	51
Tabelle 16:	Entsorgung von Lagerstättenwasser der RWE Dea AG in 2013.....	67
Tabelle 17:	Einstufung des Lagerstättenwassers nach verschiedenen Rechtsvorschriften	68
Tabelle 18:	Aktuelle Literatur zur Aufbereitung von Lagerstättenwasser	69
Tabelle 19:	Unterlagen der RWE Dea AG zur Aufbereitung von Lagerstättenwasser	70
Tabelle 20:	Zusammensetzung der Feststoffe bei verschiedenen Wassergehalten in dem Verdampfungsrückstand	80
Tabelle 21:	Entsorgung von Rückständen aus der Lagerstättenwasseraufbereitung (gelb = ber. Eluatwert hält gesetzte Grenze ein).....	83
Tabelle 22:	Produktionsbezogene Mittelwerte und Frachten je Isotop	85
Tabelle 23:	Spezifische Aktivität pro Isotop im Vergleich zum Maximalwert für Rückstände nach Anlage XII StrISchV	85
Tabelle 24:	Bestehende Erlaubnisse von Solen-Direkteinleitungen in Niedersachsen.....	88
Tabelle 25:	Vergleich der Stoffgehalte [mg/L] im Lagerstättenwasser (Bezug: Mittelwerte für die einzelnen Anfallstellen) mit Vorschriften zur Einleitung [U31, U48, U58]	89
Tabelle 26:	Umweltqualitätsnormen nach OGeWV, Anlage 7 zur Beurteilung des chemischen Zustandes eines Gewässers anhand ausgewählter LaWa-Inhaltsstoffe	92

Tabelle 27:	Notwendige Reduktion einzelner Schadstoffe zur Indirekteinleitfähigkeit, alle Angaben in mg/L, Ausnahme: pH-Wert und absetzbare Stoffe (Bezug: Einzelanalysen)	95
Tabelle 28:	Abfallaufkommen bei der Aufbereitung des LaWa zur Injektion (Option 1).....	109
Tabelle 29:	Abfallaufkommen bei der Aufbereitung des LaWa zur Flutung (Option 2)	117
Tabelle 30:	Abfallaufkommen bei der Aufbereitung des LaWa zur Direkteinleitung (Verdampfung, Option 3a)	126
Tabelle 31:	Angegebene Rückhaltequoten in Prozent (Option 3b) [U55, U56, U59]	133
Tabelle 32:	Abfallaufkommen bei der Aufbereitung des LaWa zur Indirekteinleitung (Option 3b)	135
Tabelle 33:	Wirkungskategorien lt. IFEU-Studie [L28] (Leitparameter), die für die vorliegende Studie zum Lagerstättenwasser relevanten Wirkungskategorien bzw. Leitparameter sind durch rote Schrift gekennzeichnet.....	138
Tabelle 34:	Geringfügigkeitsschwellenwerte anorganischer Stoffe für das Grundwasser im Vergleich mit den LaWa-Gehalten nach [U60] unter Angabe des Risikoquotienten, blaue Schrift: $100 < R < 1000$, rote Schrift: $R > 1000$	142
Tabelle 35:	Geringfügigkeitsschwellenwerte ausgewählter organischer Stoffe für das Grundwasser im Vergleich mit den LaWa-Gehalten nach [U60] unter Angabe des Risikoquotienten, blaue Schrift: $100 < R < 1000$, rote Schrift: $R > 1000$	143
Tabelle 36:	Bezugswerte nach <i>TrinkwV</i> („Grundwasserrelevanz“)	145
Tabelle 37:	Betrachtete Kriterien der Teilprozesse Transport – Aufbereitung - Transport – Verbleib	148
Tabelle 38:	Konstanten und Variablen für die Transportberechnungen.....	151

Tabelle 39:	Übersicht der für die Option 1 „Injektion VK-N Z3“ ermittelten Daten	153
Tabelle 40:	Übersicht der für die Option 2 „Flutung Salzbergwerk“ ermittelten Daten	154
Tabelle 41:	Übersicht der für die Option 3a „Direkteinleitung/Verdampfung“ ermittelten Daten.....	155
Tabelle 42:	Übersicht der für die Option 3b „Indirekteinleitung“ ermittelten Daten	155
Tabelle 43:	Übersicht der für den Ist-Zustand ermittelten Daten [U27]	156
Tabelle 44:	Spezifische Gesamtenergieverbräuche der Transporte von LaWa und Abfällen aus der Aufbereitung bis zum Verbleib	156
Tabelle 45:	Energiebeiträge der Aufbereitungsverfahren der Optionen.....	158
Tabelle 46:	Energiebeiträge der Aufbereitungsverfahren der Optionen.....	159
Tabelle 47:	Gesamtenergiebedarf für Transport LaWa, Aufbereitung und Abfalltransport.....	160
Tabelle 48:	Bewertung des Gesamtenergiebedarfs für Transport LaWa, Aufbereitung.....	161
Tabelle 49:	Verbrauchs- und Hilfsmittelbedarf in den Aufbereitungsverfahren.....	162
Tabelle 50:	Bewertung des Verbrauchs- und Hilfsmittelbedarf in den Aufbereitungsverfahren.....	163
Tabelle 51:	Flächenbedarf der Aufbereitungsverfahren	164
Tabelle 52:	Bewertung des Platzbedarfs der Aufbereitung	165
Tabelle 53:	Unfallstatistik Gefahrgut / Freisetzung wassergefährdender Stoffe	167
Tabelle 54:	Unfallhäufigkeit und „Risikowert“ für den Transport des unbehandelten Lagerstättenwassers (Streckenangaben vgl. Tabelle 39 ff.).....	169
Tabelle 55:	Abfallaufkommen und Transportrisiko der Optionen 1 und 2	170

Tabelle 56:	Abfallaufkommen und Transportrisiko der Optionen 3a und 3b	171
Tabelle 57:	Risikowerte für Transporte von Lagerstättenwasser und Abfällen der Optionen	172
Tabelle 58:	Bewertung des Freisetzungsriskos beim Transport des Lagerstättenwasser und der Aufbereitungsabfälle.....	173
Tabelle 59:	Gefährdungstufen nach §6 VAWs Niedersachsen	174
Tabelle 60:	Gefährdungstufen der einzelnen Optionen hinsichtlich Lagerung/Aufbereitung	176
Tabelle 61:	Bewertung des Freisetzungsriskos der Schadstoffe bei der Aufbereitung, einschließlich Lagerung (ohne NORM)	178
Tabelle 62:	Toleranzschwellen nach <i>StrlSchV</i>	180
Tabelle 63:	Berechnung der Aktivitätskonzentrationen für die Kategorie 1 bei verschiedenen Restgehalten der Nuklide von 10, 5 und 1 % gegenüber dem ursprünglichen Lagerstättenwasser (produktionsgewichtete Mittelwerte, vgl. Tabelle 4), grüne Schrift: Die Bedingungen für die Kategorie 1 (radiologisch nicht relevant) werden eingehalten	181
Tabelle 64:	NORM-Verteilung durch die Aufbereitungsverfahren auf die gebildeten Fraktionen (fett = überwiegender Verbleib der NORM-Inhalte)	184
Tabelle 65:	Konzentrationsverteilung (gerundet) der Radionuklide bei Option 3b.....	185
Tabelle 66:	Spezifische Aktivitäten des Verdampfungsrückstandes nach Option 3a	186
Tabelle 67:	Zusammenfassung der radiologischen Zuordnungen	188
Tabelle 68:	Bewertung der Verteilung der Radioaktivität	190
Tabelle 69:	Bewertung des Verbleibs der Radioaktivität und der Strahlenexposition.....	190
Tabelle 70:	Gesamtfahrstrecken für LaWa- und Abfalltransport als Maß der Lärmimmission.....	191

Tabelle 71:	Bewertung des Verkehrslärms	192
Tabelle 72:	Schadstoffkonzentration (%) in den erzeugten Abfällen der jeweiligen Optionen, der Verbleib der NORM ist hervorgehoben	196
Tabelle 73:	Bewertung des Schadstoffverbleibs und der Schadstoffverteilung (Jahresmengen in Mg)	197
Tabelle 74:	Bewertung des Gefährdungspotentials der nicht verwertbaren Rückstände	199
Tabelle 75:	Bewertung des Gefährdungspotentials des aufbereiteten Lagerstättenwassers	200
Tabelle 76:	Vorgaben und Maßnahmen für den Grundwasserschutz	204
Tabelle 77:	Bewertung des Grundwasserschutzes	205
Tabelle 78:	Bewertung der Veränderung des Verbleibortes	207
Tabelle 79:	Bewertung der Langzeitstabilität des Verbleibortes	209
Tabelle 80:	(spezifische) Abfallmenge in Abhängigkeit der Option	210
Tabelle 81:	Bewertung der Kapazität für das aufbereitete Lagerstättenwasser	211
Tabelle 82:	Bewertung der Langzeitstabilität des Verbleibortes der festen Abfälle/Rückstände	212
Tabelle 83:	Kennzahlenübersicht aus Kapitel 5	213
Tabelle 84:	Zusammenfassend der vergleichenden Bewertung der einzelnen Kriterien für die jeweiligen Optionen	214
Tabelle 85:	Gewichtung der Bewertungskriterien	216
Tabelle 86:	Gewichtung der übergeordneten Bewertungskriterien	217
Tabelle 87:	Ermittlung des Rankings aus Punktzahl (P) und Relevanz (R)	218

Nachhaltiger Umgang mit Lagerstättenwasser - Studie

Tabelle 88:	Aus den Summenwerten ermittelte Reihenfolge (Ranking-Ergebnis)	219
Tabelle 89:	Empfehlung zur zentralen/dezentralen Aufbereitung bei den einzelnen Optionen	223

9.3 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Übersichtskarte über die Förderregionen der RWE Dea AG in Niedersachsen	11
Abbildung 2: Erdgasbetrieb Rotenburg mit der Lage der einzelnen Bohrplätze	12
Abbildung 3: Erdgasbetrieb Verden mit der Lage der einzelnen Bohrplätze	13
Abbildung 4: Erdgasbetrieb Celle und Heidekreis mit der Lage der einzelnen Bohrplätze	14
Abbildung 5: Lagerstättenwasserprognose bis 2030	19
Abbildung 6: Low Temperature Separation (LTS), mit zusätzlicher Cold-Frac-Anlage (CFA), optional bei sinkendem Gasdruck einsetzbar	32
Abbildung 7: Glykoltrocknung	32
Abbildung 8: Aktivitätsverhältnis der Radiumisotope Ra-226/Ra-228 in Abhängigkeit von der Gesamtmineralisation (TDS: total dissolved solids)	50
Abbildung 9: Feststofffraktionen im Lagerstättenwasser	51
Abbildung 10: Verteilung der Salzgehalte (TDS: Total dissolved solids) im Lagerstättenwasser, Erdgasgebiet Celle und Heidekreis	54
Abbildung 11: Verteilung der Salzgehalte (TDS: Total dissolved solids) im Lagerstättenwasser, Erdgasgebiet Rotenburg und Verden	55
Abbildung 12: Verteilung der BTEX-Gehalte im Lagerstättenwasser, Erdgasgebiet Celle und Heidekreis	56
Abbildung 13: Verteilung der BTEX-Gehalte im Lagerstättenwasser, Erdgasgebiet Rotenburg und Verden	57
Abbildung 14: Verteilung von Radium-226 im Lagerstättenwasser, Erdgasgebiet Celle und Heidekreis	58

Abbildung 15: Verteilung von Radium-226 im Lagerstättenwasser, Erdgasgebiet Rotenburg und Verden.....	59
Abbildung 16: Zu untersuchende Entsorgungspfade, Prozesswerte vorläufig [U49]	77
Abbildung 17: Aufbereitungskonzept für die Aufbereitung des Lagerstättenwassers zur Injektion, Teller-Separator [U55]	107
Abbildung 18: Aufbereitungskonzept für die Aufbereitung des Lagerstättenwassers zur Verwertung in einem Salzbergwerk [U55].....	115
Abbildung 19: Aufbereitungskonzept für die Aufbereitung des Lagerstättenwassers zur Direkteinleitung (Eindampfung) [U50]	124
Abbildung 20: Aufbereitungskonzept für die Aufbereitung des Lagerstättenwassers zur Direkteinleitung (Eindampfung) [U55]	132
Abbildung 21: Bewertungsschema für das Freisetzungsrisiko Aufbereitung, inkl. Lagerung	177
Abbildung 22: Verteilung der Radioaktivität in den Kompartimenten “aufbereitetes Lagerstättenwasser” und Abfälle	189

9.4 Verzeichnis der verwendeten Rechtsquellen

<i>/4.BImSchV/</i>	Vierte Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über genehmigungsbedürftige Anlagen - 4. BImSchV) vom 02.05.2013
<i>/12.BImSchV/</i>	Zwölfte Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Störfallverordnung – 12. BImSchV) vom 26.04.2000, Neufassung vom 08.06.2005, veröffentlicht BGBl. 2005 I Nr. 33 vom 16.06.2005, Seite 1598, zuletzt geändert am 14.08.2013
<i>/AbwV/</i>	Verordnung über Anforderungen an das Einleiten von Abwasser in Gewässer (Abwasserverordnung – AbwV) vom 21.03.1997, Neufassung vom 17.06.2004 veröffentlicht BGBl. 2004 I Nr. 28 vom 22.07.2004, Seite 1108, Berichtigung veröffentlicht BGBl. 2004 I Nr. 55 vom 27.10.2004, Seite 2625, zuletzt geändert am 02.05.2013
<i>/ADR/</i>	Zweiundzwanzigste Verordnung zur Änderung der Anlagen A und B zum ADR-Übereinkommen (22. ADR-Änderungsverordnung) vom 31. August 2012, veröffentlicht im BGBl. 2012 II Nr. 27 vom 11. September 2012, Seite 954 mit Anlage zur Verordnung Dreiundzwanzigste Verordnung zur Änderung der Anlagen A und B zum ADR-Übereinkommen (23. ADR-Änderungsverordnung) vom 8. März 2013, veröffentlicht im BGBl. 2013 II Nr. 7 vom 20. März 2013, Seite 309
<i>/AtG/</i>	Gesetz über die friedliche Verwendung der Kernenergie und den Schutz gegen ihre Gefahren (Atomgesetz) vom 23.12.1959, Neufassung vom 15.07.1985, veröffentlicht BGBl. 1985 I Nr. 41 vom 31.07.1985, Seite 1565, zuletzt geändert am 25.07.2013
<i>/AVV/</i>	Verordnung über das Europäische Abfallverzeichnis (Abfallverzeichnis-Verordnung – AVV) vom 10.12.2001, veröffentlicht BGBl. 2001 I Nr. 65 vom 12.12.2001, Seite 3379, zuletzt geändert am 24.02.2012
<i>/BBergG/</i>	Bundesberggesetz vom 13.08.1980, zuletzt geändert am 31.07.2009
<i>/BImSchG/</i>	Gesetz zum Schutz vor schädlichen Umwelteinwirkungen durch Luftverunreinigungen, Geräusche, Erschütterungen und ähnliche

	Vorgänge (Bundes-Immissionsschutzgesetz – BImSchG) vom 15.03.1974, Neufassung vom 17.05.2013, veröffentlicht BGBl. I Nr. 25 vom 27.05.2013, Seite 1274, zuletzt geändert am 02.07.2013
<i>/BMU Hinweise/</i>	Hinweise zur Anwendung der Abfallverzeichnis-Verordnung vom 10. Dezember 2001, veröffentlicht als Beilage Nr. 148a zum Bundesanzeiger 2005 Nr. 148, Seite 12083
<i>/BVOT/</i>	Bergverordnung für Tiefbohrungen, Untergrundspeicher und für die Gewinnung von Bodenschätzen durch Bohrungen im Land Niedersachsen (Tiefbohrverordnung – BVOT) vom 20.09.2006, veröffentlicht Nds. MBl. Seite 887
<i>/ChemG/</i>	Gesetz zum Schutz vor gefährlichen Stoffen (Chemikaliengesetz – ChemG) vom 16.09.1980, Neufassung vom 02.07.2008, veröffentlicht BGBl. 2008 I Nr. 28 vom 11.07.2008, Seite 1146, zuletzt geändert am 23.07.2013
<i>/CLP/</i>	Verordnung (EG) Nr. 1272/2008 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 16. Dezember 2008 über die Einstufung, Kennzeichnung und Verpackung von Stoffen und Gemischen, zur Änderung und Aufhebung der Richtlinien 67/548/EWG und 1999/45/EG und zur Änderung der Verordnung (EG) Nr. 1907/2006, veröffentlicht im EU ABl. L 353 vom 31. Dezember 2008, Seite 1, in der konsolidierten Fassung vom 19.04.2011
<i>/DepV/</i>	Verordnung über Deponien und Langzeitlager (Deponieverordnung – DepV) vom 27.04.2009, veröffentlicht BGBl. 2009 I Nr. 22 vom 29.04.2009, Seite 900, zuletzt geändert am 02.05.2013
<i>/DWA-M115-1/</i>	Merkblatt DWA-M 115-1: Indirekteinleitung nicht häuslichen Abwassers Teil 1: Rechtsgrundlagen, Hrsg.: Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (DWA), Stand 11/2004, aktualisiert mit Ausgabe 02/2013
<i>/DWA-M115-2/</i>	Merkblatt DWA-M 115-2: Indirekteinleitung nicht häuslichen Abwassers Teil 2: Anforderungen, Hrsg.: Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (DWA), Stand 07/2005, aktualisiert mit Ausgabe 02/2013

- /E2000/* 2000/532/EG: Entscheidung der Kommission vom 3. Mai 2000 zur Ersetzung der Entscheidung 94/3/EG über ein Abfallverzeichnis gemäß Artikel 1 Buchstabe a) der Richtlinie 75/442/EWG des Rates über Abfälle und der Entscheidung 94/904/EG des Rates über ein Verzeichnis gefährlicher Abfälle im Sinne von Artikel 1 Absatz 4 der Richtlinie 91/689/EWG über gefährliche Abfälle, veröffentlicht im EU ABI. L 226 vom 6. September 2000, Seite 3, in der konsolidierten Fassung vom 1. Januar 2002
- /E2003/* 2003/33/EG: Entscheidung des Rates vom 19. Dezember 2002 zur Festlegung von Kriterien und Verfahren für die Annahme von Abfällen auf Abfalldeponien gemäß Artikel 16 und Anhang II der Richtlinie 1999/31/EG, veröffentlicht im EU ABI. L11 vom 16. Januar 2003, Seite 27
- /EMAS-Leitfaden/* 2001/680/EG: Empfehlung der Kommission vom 7. September 2001 über Leitlinien für die Anwendung der Verordnung (EG) Nr. 761/2001 des Europäischen Parlaments und des Rates über die freiwillige Beteiligung von Organisationen an einem Gemeinschaftssystem für das Umweltmanagement und die Umweltbetriebsprüfung (EMAS), veröffentlicht im EU Abl. L 274 vom 17.09.2001, Seite 1-23
- /GefStoffV/* Verordnung zum Schutz vor Gefahrstoffen (Gefahrstoffverordnung – GefStoffV) vom 26.11.2010, veröffentlicht BGBl. 2010 I Nr. 59 vom 30.11.2010, Seite 1643, zuletzt geändert am 15.07.2013
- /GGBefG/* Gesetz über die Beförderung gefährlicher Güter (Gefahrgutbeförderungsgesetz – GGBefG) vom 06.08.1975, Neufassung vom 07.07.2009, veröffentlicht BGBl. 2009 I Nr. 40 vom 15.07.2009, Seite 1774, Berichtigung veröffentlicht BGBl. 2009 I Nr. 81 vom 30.12.2009, Seite 3975, zuletzt geändert am 07.08.2013
- /GGVSEB/* Verordnung über die innerstaatliche und grenzüberschreitende Beförderung gefährlicher Güter auf der Straße, mit Eisenbahnen und auf Binnengewässern (Gefahrgutverordnung Straße, Eisenbahn und Binnenschifffahrt - GGVSEB) vom 17.06.2009, Neufassung vom 22.01.2013, veröffentlicht BGBl. 2013 I Nr. 4 vom 06.02.2013, Seite 110

<i>/IED/</i>	Richtlinie 2010/75/EU des Europäischen Parlaments und des Rates vom 24. November 2010 über Industrieemissionen (integrierte Vermeidung und Verminderung der Umweltverschmutzung), veröffentlicht im EU Abl. L 334 vom 17.12.2010, Seite 17-119, in der konsolidierten Fassung vom 06.01.2011
<i>/KrWG/</i>	Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen (Kreislaufwirtschaftsgesetz – KrWG) vom 24.02.2012, veröffentlicht BGBl. 2012 I Nr. 10 vom 29.02.2012, Seite 212, zuletzt geändert am 22.05.2013
<i>/LAWA GFS/</i>	Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA) (Hrsg.): Ableitung von Geringfügigkeitsschwellenwerten für das Grundwasser, Düsseldorf, Dezember 2004
<i>/NWG/</i>	Niedersächsisches Wassergesetz vom 19.02.2010, veröffentlicht Nds. GVBl. 2010, Seite 64, zuletzt geändert am 03.04.2012
<i>/OGewV/</i>	Verordnung zum Schutz der Oberflächengewässer (Oberflächengewässerverordnung) vom 20. Juli 2011, BGBl. I S 1429
<i>/RundVLBEG/</i>	Rundverfügung des Landesamtes für Bergbau, Energie und Geologie (LBEG) über Mindestanforderungen an Betriebspläne, Prüfkriterien und Genehmigungsablauf für hydraulische Bohrlochbehandlungen in Erdöl- und Erdgaslagerstätten in Niedersachsen vom 31.10.2012
<i>/Satzung Verden/</i>	Abwasserbeseitigungssatzung der Stadt Verden (Aller) vom 25.09.2012
<i>/StrlSchV/</i>	Verordnung über den Schutz vor Schäden durch ionisierende Strahlen (Strahlenschutzverordnung – StrlSchV) vom 20.07.2001, veröffentlicht im BGBl. 2001 I Nr. 38 vom 26. Juli 2001, Seite 1714, zuletzt geändert am 24. Februar 2012
<i>/TA Luft/</i>	Erste Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz (Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft-TA Luft) vom 24.07.2002, veröffentlicht GMBI. 2002, Heft 25 – 29, Seite 511 – 605
<i>/TrinkwV2001/</i>	Verordnung über die Qualität von Wasser für den menschlichen Gebrauch (Trinkwasserverordnung – TrinkwV 2001) vom 21.05.2001,

	Neufassung vom 28.11.2011 veröffentlicht BGBl. 2011 I Nr. 61 vom 6. Dezember 2011, Seite 2370, zuletzt geändert am 5. Dezember 2012
<i>/UBA Leitfaden/</i>	Einstufung von Stoffen und Gemischen in Wassergefährdungsklassen gemäß der Verwaltungsvorschrift wassergefährdende Stoffe (VwVwS) vom 17.05.1999 und der Allgemeinen Verwaltungsvorschrift zur Änderung der VwVwS vom 27.07.2005 – Leitfaden für Selbsteinstufer, Umweltbundesamt, Juni 2008 [www.umweltbundesamt.de/wgs/archiv/einstuf.pdf] Aufgrund neuer Seitenstruktur derzeit nicht abrufbar.
<i>/UVPg/</i>	Gesetz über die Umweltverträglichkeitsprüfung (UVPg) vom 12.02.1990, Neufassung vom 24.02.2010, veröffentlicht BGBl. 2010 I Nr. 7 vom 26.02.2010, Seite 94, zuletzt geändert am 25.07.2013
<i>/VAwS Nds./</i>	Verordnung über Anlagen zum Umgang mit wassergefährdenden Stoffen und über Fachbetriebe (Anlagenverordnung - VAwS -) vom 17.12.1997, veröffentlicht Nds. GVBl. 1997, Seite 549, zuletzt geändert am 24.01.2006
<i>/VwVwS/</i>	Verwaltungsvorschrift wassergefährdende Stoffe (VwVwS) vom 17. Mai 1999, veröffentlicht als Beilage Nr. 98a zum Bundesanzeiger 1999 Nr. 98
<i>/VwVwS2/</i>	Allgemeine Verwaltungsvorschrift zur Änderung der Verwaltungsvorschrift wassergefährdende Stoffe vom 17. Juli 2005, veröffentlicht als Beilage Nr. 142a zum Bundesanzeiger 2005 Nr. 142, Seite 11673
<i>/WHG/</i>	Gesetz zur Ordnung des Wasserhaushalts (Wasserhaushaltsgesetz – WHG) vom 31.07.2009, veröffentlicht BGBl. 2009 I Nr. 51 vom 06.08.2009, zuletzt geändert am 08.04.2013
<i>/WRRL/</i>	Richtlinie 2000/60/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. Oktober 2000 zur Schaffung eines Ordnungsrahmens für Maßnahmen der Gemeinschaft im Bereich der Wasserpolitik (Wasserrahmenrichtlinie), veröffentlicht im EU Abl. L 327 vom 22.12.2000, Seite 1-73, in der konsolidierten Fassung vom 25.06.2009

9.5 Verzeichnis der Anhänge/Sondergutachten

Sonderteil A: Gefahreneinstufung und Grenzwerte aufgrund verschiedener Rechtsgebiete als ökotoxikologische Bewertungsgrundlage (Dr. Hans-Bernhard Rhein & Dr. Hans-Jürgen Streibel, Umweltkanzlei Rhein GmbH)

Sonderteil B: Geomechanische Bewertung einer Injektion von Lagerstättenwasser in das Rotliegende (Dr. Ing. Thomas Röckel, Piewak & Partner GmbH)

Sonderteil C: Überprüfung der Bohrung Völkersen Nord Z3 auf Eignung als Injektionsbohrung (Dipl.-Ing. Axel Sperber, IDEAS)

Sonderteil D: Ökologische Bewertung von 4 Verfahrensvarianten zur Vorbehandlung des Lagerstättenwassers zum Zwecke der Injektion (Dr. Hans-Bernhard Rhein, Umweltkanzlei Rhein GmbH)

Die Sondergutachten werden dem Gutachten angehängt (sowohl in der Druckversion als auch in der CD-Version).

9.6 Quellenverzeichnis

Lfd. Nr.		Titel	Autor/Ersteller	Datum
U	1	Future Production Water Treatment Facility in Völkersen Concept Study	██████████, RWE Dea AG	01.06.12
U	2	Formation Water Treatment RWE DEA VÖLKERSEN GERMANY Integrated Solution Concept	Siemens AG	20.04.12
U	3	Völkersen, Produced Treatment Water Facility Offer-No.: 12-18-0057(0)	BAUER Water GmbH	25.05.12
U	4	BUDGET - Angebot Prozesswasseraufbereitung, Angebot Nr.: V26/A006065	BERKEFELD VWS GmbH (VEOLIA Water)	25.05.12
U	5	Technische Beschreibung	BERKEFELD VWS GmbH (VEOLIA Water)	25.05.12
U	6	Budget Quotation & Technical Description Scope of Supply for Produced Water Treatment Facility	██████████ RWE Dea AG	04.05.12
U	7	Wasseraufbereitung Völkersen Verfahrensfließbild	BERKEFELD VWS GmbH (VEOLIA Water)	24.08.12
U	8	Wasseraufbereitung Völkersen Verfahrensfließbild	BERKEFELD VWS GmbH (VEOLIA Water)	10.08.12
U	9	Änderungen Wassermengen-aufteilung VKRN Z7 und Z8	██████████ RWE Dea AG	11.12.12
U	10	Wasseranfallprognose pro Lokation	██████████ RWE Dea AG	06.12.12
U	11	Datenblatt: Gefährliche Stoffe enthaltende Abfälle aus der physikalischen und chemischen Weiterverarbeitung von nichtmetallhaltigen Bodenschätzen	RWE Dea AG	01.11.12
U	12	LAWA-Transporte/Entsorger ab Januar 2013	RWE Dea AG	29.01.13
U	13	Gasbohrungen- und Leitungen Landkreis Celle / SFA	RWE Dea AG, Vertragswesen und Vermessung, Wietze	09.10.12

Nachhaltiger Umgang mit Lagerstättenwasser - Studie

Lfd. Nr.		Titel	Autor/Ersteller	Datum
U	14	Gasbohrungen- und Leitungen Landkreis Rotenburg / Verden	RWE Dea AG, Vertragswesen und Vermessung, Wietze	22.10.12
U	15	Übersichtskarte Erdgasbetrieb Celle und Soltau-Fallingbostel	RWE Dea AG, Vertragswesen und Vermessung, Wietze	01.03.12
U	16	Übersichtskarte Erdgasleitungssystem Nordhannover	RWE Dea AG, Vertragswesen und Vermessung, Wietze	01.10.10
U	17	Übersichtskarte Erdgasbetrieb Rotenburg	RWE Dea AG, Vertragswesen und Vermessung, Wietze	01.06.12
U	18	Übersichtskarte Erdgasbetrieb Verden	RWE Dea AG, Vertragswesen und Vermessung, Wietze	01.06.12
U	19	Chemische Zusammensetzung und radiologische Parameter von Lagerstättenwässern	RWE Dea AG, Labor Wietze, [REDACTED]	10.08.12
U	20	Radiologische Bewertung und chemische Zusammensetzung der Produktionswässer des Förderbetriebes Niedersachsen Gas	RWE Dea AG, Labor Wietze, [REDACTED]	25.10.12
U	21	Radiologische Bewertung und chemische Zusammensetzung der Produktionswässer des Förderbetriebes Niedersachsen Gas	RWE Dea AG, Labor Wietze, [REDACTED]	25.10.12
U	22	Radiologische Bewertung und chemische Zusammensetzung der Produktionswässer des Förderbetriebes Niedersachsen Gas	RWE Dea AG, Labor Wietze, [REDACTED]	08.02.13
U	23	Sensitivity 2012	RWE Dea AG	01.02.11
U	24	Förderraten Böttersen Z6 und Völkersen Z2	[REDACTED], Labor Wietze, RWE Dea AG	16.08.12
U	25	Gutachten zur Prüfung und Bewertung von Produktionswässern in Hinblick auf strahlenschutzfachliche Fragen im Zusammenhang mit der Entsorgung	[REDACTED], NCC GmbH	12.12.12
U	26	LaWa Völkersen - Konzeptstudie und Basic Engineering Planung für primäre und sekundäre Aufbereitung	[REDACTED] RWE Dea AG	30.01.13

Lfd. Nr.		Titel	Autor/Ersteller	Datum
U	27	Kilometeraufstellung Ist-Transporte	Firmen Fischer, Zimmermann und Küpers	11.09.13
U	28	Grundfließbilder	Firmen Aquaconsult, Berkefeld, RWE	04.09.13
U	29	Massenbilanz	Firmen Aquaconsult, Berkefeld, RWE	04.09.13
U	30	Brennwertkontrolle Erdgas	RWE Dea AG, Labor Wietze, [REDACTED]	01.09.12
U	31	Analysedaten und Wassermengen	[REDACTED] RWE Dea AG	12.09.13
U	32	Water prediction all wells	[REDACTED]	15.02.13
U	33	Hg-Schlämme -allgemein	[REDACTED]	18.02.13
U	34	Einblicke in die Gasaufbereitung	[REDACTED]	18.02.13
U	35	Datenauszug IBIS	[REDACTED]	18.02.13
U	36	Auswertung B9	[REDACTED]	27.05.14
U	37	Weissenmoor Z1 Verfahrensfliessbild einfach	[REDACTED]	07.11.12
U	38	Schema HD-Anlage Völkersen NORD Z4	[REDACTED]	10.03.00
U	39	Schema Wasser/KWST+ Glykol/KWST Trennung Völkersen Nord Z4	[REDACTED]	10.03.00
U	40	Schema LTS-Anlage/Messung Völkersen NORD Z4	[REDACTED]	10.03.00
U	41	Schema Regeneration Flashgasaufbereitung Völkersen NORD Z4	[REDACTED]	13.03.00
U	42	M+W Anlagenfunktionsbeschreibung Gasaufbereitung Völkersen Nord Z6	[REDACTED]	23.12.11
U	43	Anlagenbeurteilung nach VAWS (Niedersachsen), Beispiel Böttersen Z10	RWE Dea Förderbetrieb Nds.	11.03.09
U	44	Prüfbescheinigung TÜV nach VAWS (Niedersachsen)/BetrSichV, Beispiel Böttersen Z10	TÜV Nord	22.10.08
U	45	Mindestanforderungen an Betriebspläne: Prüfkriterien und Genehmigungsablauf für hydraulische Bohrlochbehandlungen in Erdöl- und Erdgaslagerstätten in Niedersachsen	Pospich, LBEG	31.10.12
U	46	Liste aller LaWa-Tanks (B9)	RWE Dea AG, SAP-Auszug	25.02.13

Nachhaltiger Umgang mit Lagerstättenwasser - Studie

Lfd. Nr.		Titel	Autor/Ersteller	Datum
U	47	Auslegungsparameter LAWA	██████████ RWE Dea AG	15.04.13
U	48	Vollanalysen B9-Stapeltanks	██████████ RWE Dea AG	24.04.13
U	49	Kurzreport LaWa-Völkersen	██████████ aquaconsult, ██████████, aquaconsult	26.04.13
U	50	Bericht LaWa-Völkersen - Konzeptstudie, Planung für primäre und sekundäre Aufbereitung	aquaconsult	18.07.13
U	51	Gefahrgutrechtliche Stellungnahme zur Beurteilung von Produktionswassern aus einem Förderbetrieb	██████████ GeCCo	22.03.13
U	52	Grundfliessbilder	aquaconsult	04.09.13
U	53	Minimale und maximale Betriebsdrücke der Lagerstättenwasser-sammelbehälter	██████████ RWE Dea AG	28.02.13
U	54	Präsentation LBEG, 15.08.2013	RWE Dea AG	27.08.13
U	55	Konzeptstudie zur Aufbereitung von Lagerstättenwasser	IGB, RWE, Aquaconsult Ingenieur GmbH	22.07.13
U	56	Untersuchung von Fällungsmethoden zur Behandlung von Lagerstättenwässern	██████████, IAF Radioökologie GmbH	10.08.12
U	57	Festoffuntersuchungen im Lagerstättenwasser	██████████ RWE Dea AG	05.07.13
U	58	Prüfbericht 2013 P 604602/1	GBA GmbH	28.06.13
U	59	Analysen LaWa	GBA GmbH	04.07.13
U	60	Zusammenfassung Analysen	██████████, Umweltkanzlei	09.10.13
U	61	Analysendatei IGU	██████████ IGU GmbH	26.05.14
U	62	Bericht über die Durchführung von Korrosionstests gemäß UNECE/ADR mit Aluminium- und Stahl-Coupons in Lagerstättenwässern unterschiedlicher Salinität	██████████, TÜV NORD EnSys Hannover GmbH & Co. KG	29.04.14

10 LITERATURVERZEICHNIS

L01	RWE Dea, <i>Erdgasförderbetrieb Niedersachsen</i> , Firmenbroschüre, Mai 2013
L02	Tanner, D.: <i>Erstellung eines Konzeptes zur Aufbereitung von Lagerstättenwasser aus Rotliegend Lagerstätten (Diplomarbeit)</i> , Braunschweig, Dezember 2012
L03	DGMK u.a., Gock, E.; Kähler, J.; Bombka, H.-D.; Kleinitz; Zettlitzer, W.; RWE Dea AG; Markurt, R.; Sewe, K.-U.; Burgstaller, C.: <i>DGMK Forschungsbericht 629-1 Machbarkeitsstudie zur Wasseraufbereitung in der Tailend-Phase der Gasförderung</i> , Hamburg, Mai 2007
L04	DGMK u.a., Gock, E.; Kähler, J.; Bombka, H.-D.; Kleinitz; Zettlitzer, W.; RWE Dea AG; Markurt, R.; Sewe, K.-U.; Winter, I.: <i>DGMK Forschungsbericht 629-2 Wasseraufbereitung in der Tailendphase der Gasförderung</i> , Hamburg, August 2008
L05	Niedersächsischer Landtag, 16. Wahlperiode, DS 16/2670: <i>Antwort auf eine grosse Anfrage zum Meeresschutz in Niedersachsen (DS 16/2105)</i> , ausgegeben 19.08.2010
L06	Rippen, G., <i>Handbuch der Umweltchemikalien</i> , ecomед Verlagsgesellschaft mbH, Landsberg, 1984
L07	Rudolph, P.; Boje, R., <i>Ökotoxikologie</i> ecomед Verlagsgesellschaft mbH, Landsberg, 1986
L08	Besch, W.-K.; Hamm, A.; Lenhart, B.; Melzer, A.; Scharf, B.; Steinberg, C. <i>Limnologie für die Praxis</i> ecomед Verlagsgesellschaft mbH, Landsberg, 1984
L09	Zettlitzer, M.; Schöler, H. F.; Eiden, R.; Falter, R.: <i>Determination of Elemental, Inorganic and Organic Mercury in North German Gas Condensates and Formation Brines</i> in: International Symposium on Oilfield Chemistry, 18-21 February 1997 (Vortragsband), Society of Petroleum Engineers, Inc., Houston, Texas, 1997
L10	Veith, H.-M. <i>Strahlenschutzverordnung</i> (Textausgabe mit einer erläuternden Einführung), Bundesanzeiger Verlag, Köln, 2012

L11	Kalender, W., <i>Natürliche und zivilisatorische Strahlenexposition</i> , Vorlesung zum Radiologischen Kurs, IMP Uni Erlangen, http://www.imp.uni-erlangen.de/lehre/RadKurs_NatMedExp.pdf
L12	DIN EN 12457-4: 2003-01 „Charakterisierung von Abfällen – Auslaugung; Übereinstimmungsuntersuchung für die Auslaugung von körnigen Abfällen und Schlämmen – Teil 4: Einstufiges Schüttelverfahren mit einem Flüssigkeits-/Feststoffverhältnis von 10 L/kg für Materialien in einer Korngröße unter 10 mm.“
L13	K+S Entsorgung GmbH, Kassel: <i>Annahmebedingungen Untertage-Deponie Zielitz</i> , Stand 04/2013
L14	K+S Entsorgung GmbH, Kassel: <i>Annahmebedingungen Untertage-Deponie Herfa-Neurode</i> , Stand 04/2012
L15	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU), Referat Öffentlichkeitsarbeit: <i>Umweltauswirkungen von Fracking bei der Aufsuchung und Gewinnung von Erdgas aus unkonventionellen Lagerstätten (Kurzfassung)</i> Berlin, November 2012
L16	Kosinowski, M.; Berner, U.; Franke, D.; Gaedicke, C.; Gerling, P.; Himmelsbach, T.; Jatho, R.; Klinge, H.; Krug, S.; Ladage, S.; Tischner, T.; Vassolo, S.; Zaepke, M.: <i>Umweltauswirkungen von Fracking bei der Aufsuchung und Gewinnung von Erdgas aus unkonventionellen Lagerstätten - Risikobewertung, Handlungsempfehlungen und Evaluierung bestehender rechtlicher Regelungen und Verwaltungsstrukturen (FKZ 3711 23 299)</i> , Hannover, Oktober 2012
L17	Bergmann, A.: <i>Umweltauswirkungen von Fracking bei der Aufsuchung und Gewinnung von Erdgas aus unkonventionellen Lagerstätten - Risikobewertung, Handlungsempfehlungen und Evaluierung bestehender rechtlicher Regelungen und Verwaltungsstrukturen</i> http://www.umweltdaten.de/wasser/themen/fracking/120919_bmu_3b_stoffe_iww.pdf
L18	Umweltbundesamt: Erwiderung zur Stellungnahme der BGR vom 01.10.2012, Berlin,
L19	Schmitt-Jansen, M.; Aulhorn, S.; Faetsch, S.; Riedl, J.; Rotter, S.; Altenburger, R.: <i>Gutachten: Ökotoxikologische Beurteilung von beim hydraulischen Fracking eingesetzten Chemikalien</i>
L20	Ewers, E.; Frimmels, F. H.; Gordalla, B.: <i>Humantoxikologische Bewertung der beim Fracking eingesetzten Chemikalien im Hinblick auf das Grundwasser, das für die Trinkwassergewinnung genutzt</i>

L21	Roßnagel, A.; Hentschel, A.; Polzer, A.: <i>Rechtliche Rahmenbedingungen der unkonventionellen Erdgasförderung mittels Fracking</i>
L22	Sauter, M.; Helmig, R.; Schetelig, K.: <i>Abschätzung der Auswirkungen von Fracking-Maßnahmen auf das oberflächennahe Grundwasser - Generische Charakterisierung und Modellierung</i>
L23	Uth, H.-J.: <i>Technische Sicherheit von Anlagen und Verfahren zur Erkundung und Förderung von Erdgas aus nichtkonventionellen Lagerstätten</i>
L24	<i>Statt Pipeline: Kaliabwässer durch Eindampfung entsorgen</i> , EUWID Recycling und Entsorgung, <u>31</u> , 2013
L25	Statistisches Bundesamt, Fachserie 8, Reihe 1.4, Gefahrguttransporte 2011
L26	Statistisches Bundesamt, Unfälle von Güterkraftfahrzeugen 2011
L27	Neunert, U., Quantitative Riskobetrachtungen von Pipeline-Systemen, in: Infobrief Nr. 37 vom Juli 2013, Fachgemeinschaft Anlagen- und Prozeßsicherheit, DECHEMA e. V., Frankfurt
L28	Giegrich, J.; Fehrenbach, H.; Knappe, F.; Detzel, A.; Kröger, K., <i>Bewertung der Umweltverträglichkeit von Entsorgungsoptionen</i> , Ministerium für Umwelt und Verkehr, Reihe Abfall, Heft 63, April 2002
L29	Forschungsstelle für Energiewirtschaft der Gesellschaft für praktische Energiekunde e. V. <i>Ökobilanzierung mit Hilfe der KEA-Datenbank</i> München, Juli 1999
L30	Stephan, T. A.; Moch, E.; Hauschild, J.; Rumpf, J.; Herrmann, J.; Hauptmanns, U.: <i>Probabilistische Analysen zur Anwendung in der Anlagensicherheit</i> Chemie Ingenieur Technik, <u>85</u> , 2013 Nr. 8, 1263-71
L31	Danz, C., <i>Risikoanalysen im internationalen Vergleich</i> , Bergische Universität Wuppertal, FB Maschinenbau/Werkstofftechnik, in: www.smk.uni-wuppertal.de
L32	Helble, A., <i>Beispiele technischer und technologischer Risiken im Umweltbereich</i> , Vortrag, Wiesbaden, 24.06.2008
L33	Rosenwinkel, K.-H.; Hinken, L.: <i>Energieverbrauch und -erzeugung in der Wasser-, Abwasser- und Abfallwirtschaft</i> <i>Nutzung erneuerbarer Energien</i> , Hannover, 29.11.2006

L34	Thüringer Ministerium für Landwirtschaft, Forsten, Umwelt und Naturschutz (Hrsg.): <i>Energieverbrauch und Energieerzeugung in Thüringer Kläranlagen – Bestandserhebung und Abschätzung von Einsparpotenzialen</i> , Erfurt, (Energieverbrauch_klaeranlagen_th.pdf)
L35	Haberkern, B.; Maier, W.; Schneider, U.: <i>Steigerung der Energieeffizienz auf kommunalen Kläranlagen</i> Hrsg.: Umweltbundesamt, Forschungsbericht 205 26 307, UBA-FB 001075, Dessau, März 2008
L36	Statistisches Bundesamt: <i>Umwelt - Öffentliche Wasserversorgung und öffentliche Abwasserentsorgung – Öffentliche Abwasserbehandlung und -entsorgung 2010</i> , Wiesbaden, 05.08.2013
L37	Mitsdoerffer, R.; Thöle, D.: <i>Energieanalysen auf Abwasseranlagen</i> , DWA Special „Wasser und Energie“, IFAT ENTSORGA, 14.09.2010
L38	Fraunhofer Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung e. V. (München), <i>Verfahren zur Reinigung von Bergbauwässern</i> , Patentblatt, Dok-Id.: DE 4322663, C2 vom 07.09.1995
L39	Rhein, H.-B., <i>Der Abfallbeauftragte</i> Verlagsgruppe Hüthig Jehle Rehm GmbH, Landsberg, Aug. 2013
L40	Lenz, K.; Rhein, H.-B. <i>Abfallbeauftragtentools</i> Verlagsgruppe Hüthig Jehle Rehm GmbH, Landsberg, Sept. 2013
L41	Wagner, K.; Richter, M. <i>Abfallkatalog</i> Verlagsgruppe Hüthig Jehle Rehm GmbH, Landsberg, 2005
L42	Parlar, H.; Angerhöfer, D. <i>Chemische Ökotoxikologie</i> , Springer Verlag, Berlin, 1995
L43	Bund/Länder Arbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA): <i>Richtlinie für das Vorgehen bei physikalischen und chemischen Untersuchungen von Abfällen, verunreinigten Böden und Materialien aus dem Altlastenbereich; Herstellung und Untersuchung von wässrigen Eluat</i> , LAGA EW 98, Stand November 2012
L44	Rosenwinkel, H.; Weichgrebe, D.; Olsson, O.: <i>Stand der Technik und fortschrittliche Ansätze zur Entsorgung des Flowback</i> Hannover, Mai 2012

L45	Lenz, K. <i>Pflichtenheft Abfallrecht</i> Verlagsgruppe Hüthig Jehle Rehm GmbH, Landsberg Aug. 2013
L46	www.wsa-verden.wsv.de/Wasserstrassen/index.html

Sonderteil A
GefahrenEinstufung und Grenzwerte
als ökotoxikologische Bewertungsgrundlage
im Gutachten
„Nachhaltiger Umgang mit Lagerstättenwasser aus der
Erdgasförderung der RWE Dea AG in Niedersachsen“

Gutachten-Nr.:	RWEDea_SonderteilA_058_12_HBR_20140701
Auftraggeber:	IGU – Institut für Geologie und Umwelt GmbH Glückaufstraße 50 31319 Sehnde
Ansprechpartner	Dr. H. Paetsch
Auftragsdatum:	08/2012 c./o IGU
Gesamtprojektleitung:	RWE Dea AG Überseering 40 22297 Hamburg
Ansprechpartner RWE Dea	[REDACTED]
Gutachter:	Dr. Hans-Bernhard Rhein Dr. Hans-Jürgen Streibel
Vorlagedatum:	01.07.2014

Sarstedt, den 01.07.2014

[REDACTED]

Dr. Hans-Bernhard Rhein



[REDACTED]

Dr. Hans-Jürgen Streibel

Inhaltsverzeichnis

Vorwort und Analysengrundlage	3
1 Grundsätzliches	13
2 Einstufung des Lagerstättenwassers nach Chemikalienrecht	14
2.1 Physikalische Gefahren.....	14
2.2 Gesundheitsgefahren	16
2.3 Umweltgefahren	21
2.4 Weitere Gefahren	23
3 Einstufung des Lagerstättenwassers nach Gefahrgutrecht	24
4 Einstufung des Lagerstättenwassers nach Wasserrecht.....	27
5 Einstufung analog zur Strahlenschutzverordnung.....	30
5.1 Lagerstättenwasser	30
5.2 Feste Rückstände aus der Aufbereitung	34
6 Einstufung nach Abfallrecht	37
7 Tabellarische Zusammenfassung der Einstufungen des Lagerstättenwassers.	41
8 Schema zur Bewertung der Umweltgefährlichkeit von Chemikalien.....	46
9 Verwendete Quellen.....	48

Vorwort und Analysengrundlage

Dieser Sonderteil ist Bestandteil der Studie „**Nachhaltiger Umgang mit Lagerstättenwasser aus der Erdgasförderung der RWE Dea AG in Niedersachsen**“ und befasst sich mit der Einstufung des Lagerstättenwassers und fester Rückstände aus seiner Aufbereitung aufgrund verschiedener Regelungsvorgaben, insbesondere

1. Die Einstufung des Lagerstättenwassers und einer daraus resultierenden Kennzeichnung nach den Vorschriften des Chemikalienrechts
dient in erster Linie der ökologischen Bewertung anhand human- und ökotoxischer Grenzwerte als Gefahrstoff
2. Die Einstufung des Lagerstättenwassers nach den Vorschriften des Gefahrgutrechts für einen TKW-Transport
dient der Gefährdungsidentifikation beim Straßentransport als Gefahrgut.
3. Die Einstufung des Lagerstättenwassers nach den Vorschriften des Wasserrechts
dient der Zuweisung des Lagerstättenwassers zur erforderlichen Anlagensicherheit; zur Abwasserbeseitigung s. Grenzwerte im Hauptgutachten
4. Die Einstufung des Lagerstättenwassers nach den Regelungen der Strahlenschutzverordnung und den Euratom-Vorgaben
dient sowohl der Einordnung des Lagerstättenwassers unter der Sichtweise als mit natürlich vorkommenden radioaktiven Stoffen belastetes Abwasser als auch der Einordnung der Aufarbeitungs-Rückstände zur Verwertung und Beseitigung in Anlehnung an die StrlSchV.
5. Die Einstufung des Lagerstättenwassers nach den Vorschriften des Abfallrechts.
dient der Zuweisung des Entsorgungsverfahrens, wenn das Lagerstättenwasser selbst bzw. die Aufarbeitungsrückstände als Abfall zu betrachten sind; für die Zuordnung von Abfällen aus der Aufbereitung des LaWa s. Hauptgutachten.

Dabei kommt es in der Zielsetzung des Gutachtens zur Bewertung von Lagerstättenwasser zwar auch auf die konkrete Anwendbarkeit der genannten Rechtsvorschriften vor allem aber auf die zugrundeliegenden unterschiedlichen Einstufungskriterien an. Diese Kriterien, die zu einer bestimmten Einstufung eines Stoffgemisches führen, sind Ausdruck des jeweils identifizierten Schutzzieles. So wird beim Transport vorwiegend auf die Umweltgefahren gesehen, die als unmittelbare Folge eines Transportunfalles auftreten können (Brand, Explosion, Bodenkontamination), während gefahrstoffrechtlich im Sinne des Arbeitsschutzes auch toxische Langzeitfolgen in Betracht gezogen werden. Die Beschreibung der Gefahrenlage anhand des Schutzzieles verlangt nach jeweils spezifischen Parametern, die für die in der Studie angestrebte ökologische Bewertung zum nachhaltigen Verbleib von Lagerstättenwasser wichtige Orientierung sind.

Die Bewertung nach den einzelnen Regelungsvorgaben erfolgt auf Basis der folgenden Analyse:

Tabelle 1:

Konzentrationen, Frachten und produktionsbezogene Mittelwerte

Parameter	Produktions- gewichteter Mittelwert	Einheit	Fracht	Einheit	Max./Min. bezogen auf gemittelte Analysen der Bohrstellen				Einheit	Bestimmungs- grenze
					Max	Bohrung	Min	Bohrung		
Dichte 20°C	1,06	[g/mL]		[g/mL]	1,16	Becklingen Z2	0,99	Hemsbünde Z6	[g/mL]	
pH-Wert	5,8	[-]		[-]	6,65	Hemsbünde Z4	4,50	Becklingen Z1	[-]	
ELF 25°C	89,9	[mS/cm]			203	Becklingen Z2	0,2	Hemsbünde Z1	mS/cm	
Chlor, freies	0,20	[mg/L]	23,8	[kg/a]	1,2	Hemsbünde Z3	< 0,03	Bötersen Z8	[mg/L]	0,03
Gesamthärte	765	[°dH]			4.490	Völkersen NZ6	0,08	Hemsbünde Z3	°dH	
CSB	2.960	[mg/L]	360.000	[kg/a]	9.500	Völkersen NZ1/5	210	Hemsbünde Z3	[mg/L]	
BSB ₅	210	[mg/L]	25.200	[kg/a]	740	Völkersen NZ2	64,0	Hemsbünde Z3	[mg/L]	
Abfiltrierbare Stoffe	19,1	[mg/L]	2.300	[kg/a]	59,0	Bötersen Z10	< 1	Hemsbünde Z2	[mg/L]	1
Absetzbare Stoffe	0,10	[mg/L]	12,0	[kg/a]	< 0,1	alle	< 0,10	alle	[mL/L]	0,1
Lipophile Stoffe	34,7	[mg/L]	4.170	[kg/a]	440	Hemsbünde Z2	0,60	Bötersen Z8	[mg/L]	
Kalium	1.000	[mg/L]	120.000	[kg/a]	3.150	Becklingen Z1	0,75	Hemsbünde Z4	[mg/L]	0,1
Natrium	14.400	[mg/L]	1.740.000	[kg/a]	42.800	Becklingen Z1	2,43	Hemsbünde Z4	[mg/L]	0,1
Calcium	14.900	[mg/L]	1.790.000	[kg/a]	46.400	Bötersen Z6	3,84	Hemsbünde Z4	[mg/L]	0,1
Magnesium	74,7	[mg/L]	8.980	[kg/a]	212	Becklingen Z2	0,04	Hemsbünde Z2	[mg/L]	0,1
Lithium	35,0	[mg/L]	4.210	[kg/a]	196	Becklingen Z1	0,004	Völkersen Z3/11	[mg/L]	
Strontium	647	[mg/L]	77.800	[kg/a]	1.400	Bötersen Z6	0,13	Hemsbünde Z4	[mg/L]	0,001
Aluminium	0,29	[mg/L]	34,6	[kg/a]	1,10	Völkersen NZ6	< 0,01	Hemsbünde Z1	[mg/L]	0,01
Ammonium-Stickstoff	5,42	[mg/L]	652	[kg/a]	9,60	Langenhörn Z1	2,30	Völkersen Z3/11	[mg/L]	0,02

Tabelle 1:

Konzentrationen, Frachten und produktionsbezogene Mittelwerte

Parameter	Produktions- gewichteter Mittelwert	Einheit	Fracht	Einheit	Max./Min. bezogen auf gemittelte Analysen der Bohrstellen				Einheit	Bestimmungs- grenze
					Max	Bohrung	Min	Bohrung		
Arsen	0,099	[mg/L]	11,9	[kg/a]	0,86	Völkersen NZ6	< 0,0005	Hemsbünde Z3	[mg/L]	0,0005
Blei	9,00	[mg/L]	1.080	[kg/a]	31	Becklingen Z2	< 0,001	Weissenmoor Z1	[mg/L]	0,001
Cadmium	0,042	[mg/L]	5,02	[kg/a]	0,26	Völkersen NZ6	< 0,0003	Bötersen Z8	[mg/L]	0,0003
Chrom ges.	0,001	[mg/L]	0,16	[kg/a]	0,01	Weissenmoor Z1	< 0,001	Hemsbünde Z1	[mg/L]	0,001
Chrom (VI)	0,005	[mg/L]	0,60	[kg/a]	< 0,005	diverse	< 0,005	diverse	[mg/L]	0,005
Kupfer	0,009	[mg/L]	1,11	[kg/a]	0,03	Völkersen NZ2	< 0,001	Hemsbünde Z1	[mg/L]	0,001
Nickel	0,007	[mg/L]	0,87	[kg/a]	0,03	Völkersen NZ6	0,002	Völkersen NZ1/5	[mg/L]	0,001
Quecksilber	0,044	[mg/L]	5,32	[kg/a]	0,121	Westerholz Z1	0,0015	Höhnsmoor Z1	[mg/L]	0,0002
Zink	1,48	[mg/L]	178	[kg/a]	9,20	Völkersen NZ6	0,02	Höhnsmoor Z1	[mg/L]	0,005
Antimon	0,001	[mg/L]	0,14	[kg/a]	0,0028-	Völkersen NZ6	< 0,001	Bötersen Z8	[mg/L]	0,001
Barium	34,4	[mg/L]	4.130	[kg/a]	81,4	Becklingen Z1	0,024	Hemsbünde Z4	[mg/L]	0,0005
Bor	14,8	[mg/L]	1.780	[kg/a]	73,0	Völkersen NZ6	2,0	Hemsbünde Z3	[mg/L]	0,01
Cobalt	0,002	[mg/L]	0,27	[kg/a]	0,094	Völkersen NZ6	< 0,001	Bötersen Z8	[mg/L]	0,001
Eisen	29,8	[mg/L]	3.590	[kg/a]	110	Becklingen Z1	2,12	Völkersen Z10	[mg/L]	0,005
Mangan	9,13	[mg/L]	1.100	[kg/a]	51,0	Völkersen NZ6	0,057	Hemsbünde Z2	[mg/L]	0,001
Molybdän	0,021	[mg/L]	2,57	[kg/a]	0,12	Bötersen Z10	< 0,001	Hemsbünde Z2	[mg/L]	0,001
Phosphor ges.	0,58	[mg/L]	70,3	[kg/a]	1,50	Völkersen NZ2	< 0,01	Hemsbünde Z1	[mg/L]	0,005
Selen	0,003	[mg/L]	0,33	[kg/a]	0,01	Völkersen NZ6	< 0,001	Bötersen Z8	[mg/L]	0,001
Silicium	4,90	[mg/L]	589	[kg/a]	27,0	Völkersen NZ6	< 0,05	Hemsbünde Z2	[mg/L]	0,01
Tellur	0,01	[mg/L]	1,03	[kg/a]	0,059	Völkersen NZ6	< 0,001	Bötersen Z8	[mg/L]	0,001

Tabelle 1:

Konzentrationen, Frachten und produktionsbezogene Mittelwerte

Parameter	Produktions- gewichteter Mittelwert	Einheit	Fracht	Einheit	Max./Min. bezogen auf gemittelte Analysen der Bohrstellen				Einheit	Bestimmungs- grenze
					Max	Bohrung	Min	Bohrung		
Titan	0,03	[mg/L]	4,10	[kg/a]	0,10	Bötersen Z10	< 0,01	Hemsbünde Z1	[mg/L]	0,005
Thallium	0,048	[mg/L]	5,76	[kg/a]	0,25	Völkersen NZ6	< 0,001	Hemsbünde Z1	[mg/L]	0,001
Uran	n.n.	[mg/L]	-	[kg/a]	< 0,0001	(Bötersen Z8)	< 0,0001	diverse	[mg/L]	0,0001
Vanadium	0,006	[mg/L]	0,70	[kg/a]	0,031	Völkersen NZ6	< 0,001	Hemsbünde Z1	[mg/L]	0,001
Zinn	0,01	[mg/L]	1,40	[kg/a]	0,022	Bötersen Z10	< 0,001	Hemsbünde Z1	[mg/L]	0,001
Zirkonium	0,01	[mg/L]	0,84	[kg/a]	0,02	Völkersen NZ6	< 0,001	Hemsbünde Z1	[mg/L]	0,001
Chlorid	48.000	[mg/L]	5.770.000	[kg/a]	138.500	Becklingen Z1	13,3	Hemsbünde Z4	[mg/L]	0,6
Sulfat (SO ₄)	201	[mg/L]	24.200	[kg/a]	522	ZGTA	0,65	Völkersen Z4	[mg/L]	0,5
Chromat	0,002	[mg/L]	0,18	[kg/a]	< 0,0015	Bötersen Z8	< 0,0015	Bötersen Z8	[mg/L]	0,0015
Nitrat-N	2,02	[mg/L]	243	[kg/a]	4,23	ZGTA	0,07	Völkersen Z4	[mg/L]	0,1
Nitrit-N	0,003	[mg/L]	0,36	[kg/a]	< 0,003	Bötersen Z8	< 0,003	Bötersen Z8	[mg/L]	0,003
Fluorid	4,76	[mg/L]	572	[kg/a]	20,0	Bötersen Z10	< 0,15	Hemsbünde Z1	[mg/L]	0,15
Cyanid ges.	0,005	[mg/L]	0,60	[kg/a]	< 0,005	Bötersen Z8	< 0,005	Bötersen Z8	[mg/L]	0,005
Cyanid. l. freis.	0,005	[mg/L]	0,60	[kg/a]	< 0,005	Bötersen Z8	< 0,005	Bötersen Z8	[mg/L]	0,005
Iodid	9,87	[mg/L]	1.190	[kg/a]	40,0	Bötersen Z10	0,16	Hemsbünde Z1	[mg/L]	
Bromid	424	[mg/L]	51.000	[kg/a]	888	ZGTA	0,38	Hemsbünde Z4	[mg/L]	0,5
Hydrogencarbonat (HCO ₃)	56,4	[mg/L]	6.780	[kg/a]	98	Völkersen NZ4	23	Hemsbünde Z3	[mg/L]	
Phosphat	0,11	[mg/L]	12,8	[kg/a]	0,28	Völkersen Z3/11	< 0,1	Hemsbünde Z1	[mg/L]	0,1

Tabelle 1:

Konzentrationen, Frachten und produktionsbezogene Mittelwerte

Parameter	Produktions- gewichteter Mittelwert	Einheit	Fracht	Einheit	Max./Min. bezogen auf gemittelte Analysen der Bohrstellen				Einheit	Bestimmungs- grenze
					Max	Bohrung	Min	Bohrung		
Silicat (SiO ₂)	10,5	[mg/L]	1.260	[kg/a]	58,0	Völkersen NZ6	< 0,11	Hemsbünde Z2	[mg/L]	
Sulfid, l. freis.	0,04	[mg/L]	4,89	[kg/a]	0,06	Hemsbünde Z5	< 0,04	Bötersen Z8	[mg/L]	0,04
Phenolindex	2,86	[mg/L]	344	[kg/a]	4,70	Weissenmoor Z1	1,30	Langenhörn Z1	[mg/L]	0,05
TOC	348	[mg/L]	41.800	[kg/a]	2.000	Völkersen NZ2	21,5	Völkersen Z1	[mg/L]	1
n-Pentan	n.n.	[mg/L]	-	[kg/a]	< 1	Bötersen Z8	< 1	Bötersen Z8	[mg/L]	0,1
n-Hexan	n.n.	[mg/L]	-	[kg/a]	< 1	Bötersen Z8	< 1	Bötersen Z8	[mg/L]	0,1
n-Heptan	1,07	[mg/L]	128	[kg/a]	2,2	Weissenmoor Z1	< 1	Bötersen Z8	[mg/L]	0,1
n-Octan	1,03	[mg/L]	124	[kg/a]	1,53	Weissenmoor Z1	< 1	Bötersen Z8	[mg/L]	0,1
n-Nonan	n.n.	[mg/L]	-	[kg/a]	< 1	Bötersen Z8	< 1	Bötersen Z8	[mg/L]	0,1
n-Decan	n.n.	[mg/L]	-	[kg/a]	< 1	Bötersen Z8	< 1	Bötersen Z8	[mg/L]	0,1
AOX	0,21	[mg/L]	25,3	[kg/a]	0,33	Völkersen NZ6	0,20	Bötersen Z8	[mg/L]	0,01
MKW (nicht aromatisch C10-C40)	8,52	[mg/L]	1.030	[kg/a]	93,0	Völkersen Z10	0,034	Becklingen Z1	[mg/L]	0,1
Summe BTEX	434	[mg/L]	52.200	[kg/a]	1.010	Völkersen Z10	24,5	Becklingen Z1	[mg/L]	0,001
Benzol	321	[mg/L]	38.600	[kg/a]	744	Hemsbünde Z1	18,1	Becklingen Z1	[mg/L]	0,001
Toluol	70,9	[mg/L]	8.530	[kg/a]	218	Völkersen Z10	4,87	Becklingen Z1	[mg/L]	0,001
Ethylbenzol	5,76	[mg/L]	693	[kg/a]	32,9	Völkersen Z10	0,14	Becklingen Z1	[mg/L]	0,001
m+p-Xylol	20,0	[mg/L]	2.400	[kg/a]	120	Völkersen Z10	0,37	Becklingen Z1	[mg/L]	0,001

Tabelle 1:

Konzentrationen, Frachten und produktionsbezogene Mittelwerte

Parameter	Produktions- gewichteter Mittelwert	Einheit	Fracht	Einheit	Max./Min. bezogen auf gemittelte Analysen der Bohrstellen				Einheit	Bestimmungs- grenze
					Max	Bohrung	Min	Bohrung		
o-Xylol	16,3	[mg/L]	1.960	[kg/a]	73,7	Völkersen Z10	1,04	Becklingen Z1	[mg/L]	0,001
Summe C3-Aromaten	4,34	[mg/L]	522	[kg/a]	8,81	Völkersen Z3/11	0,95	Bötersen Z10	[mg/L]	0,001
iso-Propylbenzol	0,257	[mg/L]	30,9	[kg/a]	0,74	Völkersen Z3/11	0,041	Völkersen NZ6	[mg/L]	0,001
n-Propylbenzol	0,129	[mg/L]	15,5	[kg/a]	0,34	Völkersen Z3/11	0,023	Völkersen NZ6	[mg/L]	0,001
2-Ethyltoluol	0,627	[mg/L]	75,4	[kg/a]	1,60	Völkersen Z3/11	0,15	Bötersen Z10	[mg/L]	0,001
3-Ethyltoluol	0,341	[mg/L]	41,1	[kg/a]	0,90	Hemsbünde Z4	0,049	Bötersen Z10	[mg/L]	0,001
4-Ethyltoluol	0,076	[mg/L]	9,16	[kg/a]	0,26	Hemsbünde Z4	0,012	Bötersen Z10	[mg/L]	0,001
1,3,5-Trimethylbenzol	0,582	[mg/L]	70,1	[kg/a]	1,30	Hemsbünde Z4	0,011	Bötersen Z10	[mg/L]	0,001
1,2,4-Trimethylbenzol	1,14	[mg/L]	138	[kg/a]	2,60	Hemsbünde Z4	0,24	Bötersen Z10	[mg/L]	0,001
1,2,3-Trimethylbenzol	1,18	[mg/L]	142	[kg/a]	3,20	Hemsbünde Z6	0,26	Völkersen Z5/6	[mg/L]	0,001
Styrol	0,017	[mg/L]	2,10	[kg/a]	0,29	Weissenmoor Z1	< 0,001	Bötersen Z8	[mg/L]	0,001
Cumol	0,247	[mg/L]	30,0	[kg/a]	0,74	Völkersen Z3/11	0,041	Völkersen NZ6	[mg/L]	0,001
Summe PAK (EPA)	0,549	[mg/L]	66,0	[kg/a]	1,82	Hemsbünde Z2	0,0865	Völkersen NZ6	[mg/L]	0,00001
Naphthalin	0,542	[mg/L]	65,2	[kg/a]	1,80	Hemsbünde Z2	0,0850	Völkersen NZ6	[mg/L]	0,00001
Acenaphthylen	n.n.	[mg/L]	-	[kg/a]	<0,001	Hemsbünde Z2	< 0,00001	Bötersen Z8	[mg/L]	0,00001
Acenaphthen	n.n.	[mg/L]	-	[kg/a]	<0,001	Hemsbünde Z2	< 0,00001	Bötersen Z8	[mg/L]	0,00001
Fluoren	n.n.	[mg/L]	-	[kg/a]	<0,001	Hemsbünde Z2	< 0,00001	Bötersen Z8	[mg/L]	0,00001
Phenanthren	n.n.	[mg/L]	-	[kg/a]	<0,001	Hemsbünde Z2	< 0,00001	Bötersen Z8	[mg/L]	0,00001

Tabelle 1:

Konzentrationen, Frachten und produktionsbezogene Mittelwerte

Parameter	Produktions- gewichteter Mittelwert	Einheit	Fracht	Einheit	Max./Min. bezogen auf gemittelte Analysen der Bohrstellen				Einheit	Bestimmungs- grenze
					Max	Bohrung	Min	Bohrung		
Anthracen	n.n.	[mg/L]	-	[kg/a]	<0,001	Hemsbünde Z2	< 0,00001	Bötersen Z8	[mg/L]	0,00001
Fluoranthen	n.n.	[mg/L]	-	[kg/a]	<0,001	Hemsbünde Z2	< 0,00001	Bötersen Z8	[mg/L]	0,00001
Pyren	n.n.	[mg/L]	-	[kg/a]	<0,001	Hemsbünde Z2	< 0,00001	Bötersen Z8	[mg/L]	0,00001
Benz(a)anthracen	n.n.	[mg/L]	-	[kg/a]	<0,001	Hemsbünde Z2	< 0,00001	Bötersen Z8	[mg/L]	0,00001
Chrysen	n.n.	[mg/L]	-	[kg/a]	<0,001	Hemsbünde Z2	< 0,00001	Bötersen Z8	[mg/L]	0,00001
Benzo(b)fluoranthen	n.n.	[mg/L]	-	[kg/a]	<0,001	Hemsbünde Z2	< 0,00001	Bötersen Z8	[mg/L]	0,00001
Benzo(k)fluoranthen	n.n.	[mg/L]	-	[kg/a]	<0,001	Hemsbünde Z2	< 0,00001	Bötersen Z8	[mg/L]	0,00001
Benzo(a)pyren	n.n.	[mg/L]	-	[kg/a]	<0,001	Hemsbünde Z2	< 0,00001	Bötersen Z8	[mg/L]	0,00001
Dibenz(ah)anthracen	n.n.	[mg/L]	-	[kg/a]	<0,001	Hemsbünde Z2	< 0,00001	Bötersen Z8	[mg/L]	0,00001
Benzo(g,h,i)perylene	n.n.	[mg/L]	-	[kg/a]	<0,001	Hemsbünde Z2	< 0,00001	Bötersen Z8	[mg/L]	0,00001
Indeno(1,2,3-cd)pyren	n.n.	[mg/L]	-	[kg/a]	<0,001	Hemsbünde Z2	< 0,00001	Bötersen Z8	[mg/L]	0,00001
LCKW										
Dichlormethan	n.n.	[mg/L]	-	[kg/a]	<0,0001	Bötersen Z8	<0,0001	Bötersen Z8	[mg/L]	0,0001
Trichlormethan	n.n.	[mg/L]	-	[kg/a]	<0,0001	Bötersen Z8	<0,0001	Bötersen Z8	[mg/L]	0,0001
1,1,1-Trichlorethan	n.n.	[mg/L]	-	[kg/a]	<0,0001	Bötersen Z8	<0,0001	Bötersen Z8	[mg/L]	0,0001
Tetrachlormethan	n.n.	[mg/L]	-	[kg/a]	<0,0001	Bötersen Z8	<0,0001	Bötersen Z8	[mg/L]	0,0001
Trichlorethen	n.n.	[mg/L]	-	[kg/a]	<0,0001	Bötersen Z8	<0,0001	Bötersen Z8	[mg/L]	0,0001
Tetrachlorethen	n.n.	[mg/L]	-	[kg/a]	<0,0001	Bötersen Z8	<0,0001	Bötersen Z8	[mg/L]	0,0001
Vinylchlorid	n.n.	[mg/L]	-	[kg/a]	<0,0001	Bötersen Z8	<0,0001	Bötersen Z8	[mg/L]	0,0001

Tabelle 1:

Konzentrationen, Frachten und produktionsbezogene Mittelwerte

Parameter	Produktions- gewichteter Mittelwert	Einheit	Fracht	Einheit	Max./Min. bezogen auf gemittelte Analysen der Bohrstellen				Einheit	Bestimmungs- grenze
					Max	Bohrung	Min	Bohrung		
1,1-Dichlorethan	n.n.	[mg/L]	-	[kg/a]	<0,0001	Bötersen Z8	<0,0001	Bötersen Z8	[mg/L]	0,0001
1,1-Dichlorethen	n.n.	[mg/L]	-	[kg/a]	<0,0001	Völkersen Z3/11	<0,0001	Bötersen Z8	[mg/L]	0,0001
1,2-Dichlorethan	0,0027	[mg/L]	0,33	[kg/a]	0,024	Weissenmoor Z1	<0,0001	Bötersen Z8	[mg/L]	0,0001
cis-1,2-Dichlorethen	n.n.	[mg/L]	-	[kg/a]	<0,0001	Bötersen Z8	<0,0001	Bötersen Z8	[mg/L]	0,0001
trans-1,2-Dichlorethen	n.n.	[mg/L]	-	[kg/a]	<0,0001	Hemsbünde Z1	<0,0001	Bötersen Z8	[mg/L]	0,0001
Aceton	8,99	[mg/L]	1.080	[kg/a]	21,0	Weissenmoor Z1	0,53	Hemsbünde Z3	[mg/L]	
iso-Butanol	3,64	[mg/L]	438	[kg/a]	30,0	Weissenmoor Z1	1,0	Hemsbünde Z1	[mg/L]	
Butylacetat	0,06	[mg/L]	6,96	[kg/a]	0,1	Weissenmoor Z1	0,05	Bötersen Z8	[mg/L]	
Cyclohexan	0,96	[mg/L]	116	[kg/a]	9,4	Weissenmoor Z1	0,06	Hemsbünde Z6	[mg/L]	
Ethanol	0,90	[mg/L]	108	[kg/a]	3,8	Höhnsmoor Z1	< 0,5	Hemsbünde Z2	[mg/L]	0,5
Ethylacetat	0,10	[mg/L]	11,9	[kg/a]	0,5	Völkersen NZ6	0,05	Bötersen Z10	[mg/L]	
2-Propanol	1,43	[mg/L]	172	[kg/a]	6,6	Langenhörn Z1	0,2	Hemsbünde Z3	[mg/L]	
Methanol	2,09	[mg/L]	252	[kg/a]	3,0	Hemsbünde Z5	2,0	Bötersen Z8	[mg/L]	
Formiat	56,4	[mg/L]	8.350	[kg/a]						
Acetat	182	[mg/L]	21.900	[kg/a]	9.660	Becklingen Z2	11,5	Langenhörn Z1	[mg/L]	
Glykolsäure	87,2	[mg/L]	10.500	[kg/a]	201	Becklingen Z2	15,0	Völkersen Z10	[mg/L]	

Tabelle 1:

Konzentrationen, Frachten und produktionsbezogene Mittelwerte

					Max./Min. bezogen auf gemittelte Analysen der Bohrstellen					
Parameter	Produktions- gewichteter Mittelwert	Einheit	Fracht	Einheit	Max	Bohrung	Min	Bohrung	Einheit	Bestimmungs- grenze
Summe Kationen (Lithium, Kalium, Natrium, Calcium, Magnesium, Barium, Strontium)	31.100	[mg/L]	3.740.000	[kg/a]	83.700	Becklingen Z2	18	Völkersen Z10	[mg/L]	-
Summe Anionen (Chlorid, Bromid, Iodid, Fluorid, Sulfat, Hydrogencarbonat, Phosphat)	48.700	[mg/L]	5.850.000	[kg/a]	143.000	Becklingen Z1	32	Hemsbünde Z4	[mg/L]	-
Ges-Salinität	79.800	[mg/L]	9.590.000	[kg/a]	226.000	Becklingen Z1	57	Weissenmoor Z1	[mg/L]	
U-238	0,003	[Bq/L]	0,39	[MBq/a]	0,006	Hemsbünde Z5	0,001	Becklingen Z2	[Bq/L]	
U-234	0,004	[Bq/L]	0,43	[MBq/a]	0,006	Hemsbünde Z5	0,001	Becklingen Z2	[Bq/L]	
Ra-226	10,5	[Bq/L]	1.260	[MBq/a]	36,5	Bötersen Z6	0,018	Becklingen Z2	[Bq/L]	
Pb-210	14,3	[Bq/L]	1.720	[MBq/a]	59,0	Bötersen Z6	0,018	Becklingen Z2	[Bq/L]	
Po-210	1,25	[Bq/L]	150	[MBq/a]	4,00	Becklingen Z1	0,001	Becklingen Z2	[Bq/L]	
U-235	n.n.	[Bq/L]	n.n.	[MBq/a]	n.n.		n.n.		[Bq/L]	
Ra-228	10,8	[Bq/L]	1.290	[MBq/a]	29,7	Bötersen Z2	0,017	Becklingen Z2	[Bq/L]	

Hinweise:

Die in der Tabelle 1 angegebenen LCKW sind auf Verunreinigungen durch Betriebs- oder Reinigungsmittel zurückzuführen, sie bleiben bei der weiteren Betrachtung der Lagerstättenwasserzusammensetzung unberücksichtigt.

Die Bestimmung des in der Tabelle angegebenen AOX-Wertes ist aufgrund der hohen Cl/Br-Gehalte fehlerhaft und bleibt bei der weiteren Betrachtung der Lagerstättenwasserzusammensetzung unberücksichtigt.

In der Tabelle sind für alle einzelnen Analysenparameter, soweit positive Befunde vorliegen, Konzentrationen und Frachtmengen angegeben.

Durch die Worst-case-Betrachtung kann es aufgrund unterschiedlicher Nachweisgrenzen und aufgrund einer unterschiedlichen Analysenanzahl dazu kommen, dass eine Teilmenge, z.B. Chrom(VI), einen höheren Gehalt bzw. eine höhere Fracht aufweist als die Gesamtmenge, in diesem Fall Chrom (gesamt).

Die Stickstoffverbindungen sind jeweils bezogen auf die Stickstoffmenge angegeben, die Konzentrationen der jeweiligen Ionen lassen sich folgendermaßen berechnen:

- 1 g NO_3^- -N entspricht 4,43 g NO_3^-
- 1 g NO_2^- -N entspricht 3,29 g NO_2^-
- 1 g NH_4^+ -N entspricht 1,29 g NH_4^+

Aus der angegebenen Borkonzentration lässt sich folgendermaßen die Konzentration von Borat berechnen:

- 1 g Bor entspricht 5,44 g BO_3^{3-}

Die angegebenen Bestimmungsgrenzen beziehen sich auf die von Firma GBA durchgeführten Analysen, s. Hauptgutachten, und können im Einzelfall von den Nachweis-/Bestimmungsgrenzen der RWE Dea-Laboranalytik abweichen.

Die Konzentrationsangaben erfolgten zum besseren Verständnis für den Leser in mg/L, wenngleich die Abwasseranalysen für z.B. LCKW oder PAK üblicherweise in µg/L ausgewiesen werden.

1 Grundsätzliches

Da aufgrund der Analysen der anorganischen Bestandteile des Lagerstättenwassers jeweils die Kationen oder Anionen bestimmt werden, eine Beurteilung aber nur auf Basis von Stoffen (Verbindungen) erfolgen soll und kann, müssen einige Annahmen und Vorgehensweisen im Vorfeld getroffen werden.

Aus den ermittelten Kationen und Anionen werden die theoretisch möglichen Verbindungen ermittelt und aufgrund der gemessenen Konzentrationen der Anionen und Kationen wird die maximal mögliche Konzentration dieser Verbindungen bestimmt und für die weitere Beurteilung verwendet. **Zu beachten ist, dass die auf diese Weise ermittelten Verbindungen nicht im Lagerstättenwasser tatsächlich zwingend nachgewiesen wurden bzw. in der berechneten Konzentration vertreten sind.**

In Summe ergeben die so verwendeten Konzentrationen eine höhere Salinität als die wahren ermittelten Werte. Im Sinne einer „worst-case“-Betrachtung erfolgt die Bewertung mit höheren Konzentrationen der Salze als real gegeben, und es wird damit insgesamt eine ungünstigere Bewertung in Kauf genommen. Dieses Verfahren wird z.B. bei der Berechnung der akuten und der aquatischen Toxizität angewendet. Eine Korrektur der Salinität ist nicht notwendig, da sich eine solche in den verwendeten Formeln wieder aufhebt. Mit Hilfe der so ermittelten Werte werden die unterschiedlichen Toxizitäten z.B. der möglichen Bleiverbindungen bei der Gesamtbewertung gewichtet berücksichtigt.

Für die Einstufung hinsichtlich der akuten und der aquatischen Toxizität werden ausschließlich Werte aus der GESTIS-Datenbank /GESTIS/ des Instituts für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung verwendet. Sind dort für diese Werte Bereichsangaben vorhanden, so wird für die Betrachtung der niedrigste – also kritische- Wert verwendet. Somit wird auch hier im Sinne einer „worst-case“-Betrachtung vorgegangen.

Stoffe, für die keine Werte vorlagen, können in der Betrachtung nicht berücksichtigt werden.

Die Einstufung nach Chemikalienrecht erfolgt auf Basis der CLP-Verordnung /CLP/, welche durch das zugrunde liegende GHS (Global Harmonized System) mit dem Gefahrgutrecht harmonisiert ist. Im Gegensatz zu der Berechnung der akuten und aquatischen Toxizität, die, wie oben angegeben, über alle möglichen Verbindungen und deren Toxizitätswerte ohne Berücksichtigung des realen Gehalts an Kationen und Anionen erfolgt, wird bei den Einstufungen, bei denen es nur auf den Gehalt ankommt, die Auswahl der Verbindungen eingeschränkt. Dabei werden die betrachteten Verbindungen so gewählt, dass eine möglichst hohe Konzentration berücksichtigt wird (im Sinne einer „worst-case“-Betrachtung), aber trotzdem die gewichteten bzw. Maximalkonzentrationen der einzelnen Kationen und Anionen eingehalten werden. Hierbei wird nicht mathematisch exakt vorgegangen, sondern über das jeweilige chemische Äquivalent abgeschätzt. Grundsätzlich werden für eine Ionenart die Verbindungen so ausgewählt, dass die zu „verteilende“ Menge überschritten wird. Damit wird immer ein höherer Wert ermittelt als bei mathematisch korrekter Rechnung - und somit eher eine ungünstigere Einstufung erzielt. Dieses Verfahren wird im Folgenden als „Auswahlverfahren“ bezeichnet.

In den Fällen, bei denen die Abschätzung in den Bereich von einstufigsrelevanten Grenzen kommt, ist eine genauere Betrachtung durchzuführen.

Die Einstufung nach Chemikalien- und Gefahrgutrecht erfolgt zunächst auf Basis der im Mai 2013 vorgelegten Analysendaten. Im Juli 2013 vorgelegte weitere Analysen, die auch Angaben über zusätzliche Kationen und Anionen enthielten, werden über Faktoren bei der Einstufung berücksichtigt. Eine gravierende Änderung der ermittelten Toxizitäten ist nicht erkennbar, so dass auf eine formale Einbindung der neuen Daten verzichtet wird.

Hinsichtlich der verwendeten Dichten wird vereinfachend von 1 kg/L ausgegangen, was gegenüber den realen Werten leicht über 1 kg/L, eine konservative Vereinfachung darstellt.

2 Einstufung des Lagerstättenwassers nach Chemikalienrecht

Mit der Umsetzung des GHS in das europäische Chemikalienrecht /CLP/ wurde die Anzahl der Gefahrenklassen deutlich erweitert.

Die einzelnen Gefahrenklassen werden anhand der jeweiligen Einstufungskriterien überprüft und bezüglich einer Zuordnung bewertet:

2.1 Physikalische Gefahren

Explosive Stoffe/Gemische und Erzeugnisse mit Explosivstoff

Das Lagerstättenwasser besitzt aufgrund der Zusammensetzung und seines Verhaltens keine erkennbaren explosiven Eigenschaften.

Entzündbare Gase

Aus den bisher übermittelten Informationen zum Lagerstättenwasser ist in Luft bei 20 °C und einem Standarddruck von 101,3 kPa kein Explosionsbereich ableitbar.

Entzündbare Aerosole

Lagerstättenwasser wird nicht in Aerosolpackungen transportiert, gelagert oder behandelt.

Oxidierende Gase

Eine Bildung von Gasen, die die Verbrennung anderer Materialien eher verursachen oder begünstigen können als Luft, ist nicht bekannt.

Gase unter Druck

Lagerstättenwasser wird unterhalb von 200 kPa gehandhabt und ist weder ein verflüssigtes noch tiefgeköhltes Gas.

Entzündbare Flüssigkeiten

Für eine Einstufung als entzündbare Flüssigkeit ist primär der Flammpunkt entscheidend, in zweiter Linie der Siedebeginn. Die Umsetzung des GHS in Europa für entzündbare Flüssigkeiten beschränkt sich auf die drei Kategorien, wie sie auch im Gefahrgutrecht zur Anwendung kommen.

Der Flammpunkt muss unterhalb oder gleich 60 °C sein, um eine Einstufung in diese Gefahrenklasse vornehmen zu können. Nach Angaben seitens des Auftraggebers wurden Untersuchungen an den Lagerstättenwässern vorgenommen.

Hierbei wurden Flammpunkte im Bereich von 75 °C oder darüber gemessen.

Die gemessenen Flammpunkte liegen deutlich über dem Grenzwert von 60 °C, so dass eine Einstufung in diese Gefahrenklasse nicht vorzunehmen ist.

Entzündbare Feststoffe Lagerstättenwasser ist flüssig.

Selbstzersetzliche Stoffe und Gemische

Bei der Lagerung von Lagerstättenwasser wurden bisher keine Zersetzungen beobachtet.

Pyrophore Flüssigkeiten Beim Lagerstättenwasser wurde bisher bei Berührung mit Luft keine Entzündung innerhalb von 5 Minuten beobachtet.

Pyrophore Feststoffe Lagerstättenwasser ist flüssig.

Selbsterhitzungsfähige Stoffe und Gemische

Bei der Lagerung von Lagerstättenwasser wurde bisher keine Selbsterhitzung oder gar Entzündung beobachtet.

Stoffe und Gemische, die in Berührung mit Wasser entzündbare Gase entwickeln

Lagerstättenwasser ist selbst weitgehend Wasser, so dass eine Berührung mit Wasser keine Gasentwicklung bewirkt.

Oxidierende Flüssigkeiten

Die Zusammensetzung von Lagerstättenwasser lässt keine Sauerstoff abgebenden Inhaltsstoffe erkennen.

Oxidierende Feststoffe Lagerstättenwasser ist flüssig.

Organische Peroxide Lagerstättenwasser ist kein organisches Peroxid. Hinsichtlich des Gehaltes an organischen Peroxiden liegen keine Informationen vor, aber sie sind aufgrund der Herkunft des Wassers nicht zu erwarten.

Korrosiv gegenüber Metallen

Vergleicht man die Salinität aus den gewichteten Mittelwerten von ca. 8 % mit dem durchschnittlichen Wert von Meerwasser in Höhe von ca. 3,5 %, so liegt das Lagerstättenwasser zwar deutlich höher, weist aber gegenüber Meerwasser nur geringe Sauerstoffgehalte auf. Die vorherrschenden Anionen und Kationen im Meerwasser sind die gleichen wie im Lagerstättenwasser. Da bekannt ist, dass Meerwasser – auch wegen seines Sauerstoffgehaltes - korrosiv gegenüber Metallen ist, war das Lagerstättenwasser auch bei Abwesenheit von Sauerstoff auf seine Korrosionswirkung zu untersuchen, ob die im UN-Handbuch /UN-Handbuch/ geforderte Korrosionsrate von 6,25 mm pro Jahr bei 55 °C überschritten wird und damit eine Einstufung nach CLP-Verordnung als korrosiv erfolgen muss.

Im Zeitraum April bis Juni 2014 wurden seitens RWE Dea entsprechende Korrosionsuntersuchungen gemäß /UN-Handbuch/ veranlasst. Es wurden Lagerstättenwasser

unterschiedlicher Salinität gemäß des Handbuchs an Stahl und Aluminium geprüft. In allen Fällen /B 140211/ wurden die Grenzen für eine Einstufung als „korrosiv gegenüber Metallen“ sowohl nach Massenverlust als auch nach Mindesteindringtiefe nicht überschritten. Somit ist **keine Einstufung als „korrosiv gegenüber Metallen“** vorzunehmen.

2.2 Gesundheitsgefahren

Akute Toxizität

Bei der akuten Toxizität wurden 4 Kategorien des GHS in europäisches Recht übernommen, wobei als Kriterien die approximativen Werte LD50 (oral, dermal) oder LC50-Werte (inhalativ) oder der neue Schätzwert „Akute Toxizität“ (acute toxicity estimate – ATE) zur Anwendung kommt. Da in der Datenbank noch keine ATE-Werte und fast keine LC50-Werte für die inhalative Toxizität vorhanden sind, wurden die Betrachtungen auf die LD50-Werte für die akute und die dermale Toxizität beschränkt.

Es wurden jeweils zwei Berechnungen durchgeführt.

- Eine Berechnung erfolgt gewichtet über das gesamte Lagerstättenwasser und den so ermittelten gewichteten Mittelwerten.
- Als zweite Berechnung werden ohne Rücksicht auf die Bohrstellen die jeweils höchsten Konzentrationswerte im Sinne einer „worst-case“-Betrachtung für die Bewertung der Einstufung verwendet.

In beiden Fällen wird die in Anhang 1 Nummer 3.1.3.6.2.3 /CLP/ angegebene Formel verwendet, da nicht für alle möglichen Stoffe Daten zur Verfügung stehen.

Für die orale Toxizität bei gewichteten Konzentrationsmittelwerten wurde ein Wert von ca. 1.400 mg/kg Körpergewicht ermittelt. Gemäß den Einstufungskriterien ist das Lagerstättenwasser somit in die Kategorie 4 (Bereich über 300 bis 2000 mg/kg Körpergewicht) für die orale Toxizität einzustufen. Bei der dermalen Toxizität ergibt sich rechnerisch ein Wert von ca. 10.000 mg/kg Körpergewicht, was unter Anwendung von /CLP/ zu keiner Einstufung führt.

Die gleichen Berechnungen mit den maximalen Konzentrationen ergeben für die orale Toxizität einen Wert von ca. 1700 mg/kg Körpergewicht und für die dermale Toxizität einen Wert von ca. 10.000 mg/kg Körpergewicht.

Auch hier ergibt sich für die orale Toxizität bei entsprechender Anwendung der CLP-Verordnung eine Einstufung in die Kategorie 4, während sich für die dermale Toxizität keine Einstufung ergibt.

Als Gesamteinstufung der Toxizität ist für das Lagerstättenwasser aufgrund der rechnerischen Werte für die orale Toxizität eine Einstufung nach Chemikalienrecht in die Kategorie 4 vorzunehmen. Die Kennzeichnung im Sinne des Chemikalienrechts müsste demzufolge mit GHS07 und H302 erfolgen.

Die rechnerischen Werte werden aufgrund des gebildeten Summenverhältnisses nach CLP-Verordnung maßgeblich durch solche Verbindungen bestimmt, die gleichzeitig in hohen Konzentrationen vorhanden sind. Allein Calciumchlorid mit einem Lösungsanteil von 4,3 % weist einen LD50 von 1.000 mg/kg Körpergewicht auf. Zusammen mit Natriumchlorid (3,7 % und LD50 von 3.000 mg/kg) ergibt sich nach der Formel eine akute Toxizität (rechnerischer LD50 der Mischung) von 1.460 mg/kg. **Dabei ist zu beachten, dass Natrium, Calcium und Chlorid zu etwa 95 % die Ionenkonzentration im Lagerstättenwasser bestimmen und somit auch dessen akute Toxizität.**

Sinkt die Calciumchloridkonzentration bei gleichem NaCl-Gehalt auf unter 1,2 %, so wäre eine Einstufung in „akut toxisch Kat. 4“ nicht mehr erforderlich.

Umgekehrt machen alle anderen Salze und organischen Verbindungen einen Anteil von ca. 0,7 % am Lagerstättenwasser aus und führen zu einem LD50-Wert von 1.460 mg/kg Körpergewicht, was etwa der reinen NaCl-CaCl₂-Einstufung (1.460 mg/kg) entspricht. Auch die weiteren noch vorgelegten Analysendaten zusätzlicher Parameter (s. Tabelle 1) führen zu keiner geänderten Einstufung.

Ätz-/Reizwirkung auf die Haut

Aus den Daten kann keine direkte Bewertung in dieser Gefahrenklasse erfolgen.

Aufgrund der angegebenen pH-Werte von 4,5 bis 6,7 unter Berücksichtigung der Säure-Basen-Kapazität ist normalerweise eine Ätz-/Reizwirkung auf die Haut kaum zu erwarten. Die allgemeinen Grenzwerte für eine Einstufung eines Gemisches als hautätzend liegen bei mindestens 5 % hautätzender Bestandteile. Sind mindestens 1 % hautätzende Bestandteile enthalten, so ist das Gemisch als hautreizend einzustufen. Gleiches gilt, wenn mindestens 10 % hautreizende Stoffe im Gemisch enthalten sind. Somit müssen mindestens 10 g hautätzende Bestandteile im Gemisch enthalten, um das Gemisch mindestens als hautreizend einzustufen.

Nach Anhang 6 /CLP/ und nach Datenbank /GESTIS/ ist Quecksilberdichlorid als hautätzend einzustufen. Quecksilberdichlorid liegt mit einem theoretisch berechnetem Wert von ca. 65 µg/L bzw. 165 µg/L deutlich unter der 10-Gramm-Grenze. Aus diesem Grund ist das Lagerstättenwasser nicht als hautätzend einzustufen.

Da sowohl hautätzende als auch hautreizende Verbindungen im Lagerstättenwasser enthalten sind, sind die hautätzenden Bestandteile mit dem Faktor 10 gegenüber den hautreizenden Bestandteilen bei der Rechnung zu berücksichtigen. Das Gemisch ist als hautreizend einzustufen, wenn das Ergebnis mindestens 10 % hautreizende Komponenten ausweist.

Mit dem beschriebenen Auswahlverfahren ergeben sich Quecksilberdichlorid (mit Faktor 10 gewichtet), Eisen(III)sulfat, Strontiumnitrat, Calciumbromid, Calciumformiat, Benzol, Toluol und die Xylole als zu berücksichtigende Verbindungen.

Die damit ermittelten Gehalte sind bei den gewichteten Konzentrationen ca. 1,8 g/L, während sich bei den Maximalkonzentrationen ca. 2,9 g/L ergeben. Sowohl nach gewichteten Konzentrationen als auch nach Maximalwerten ist das Lagerstättenwasser nicht als hautreizend einzustufen, da die notwendige Konzentration von 100 g/L (entsprechend 10 %) deutlich unterschritten wird.

Schwere Augenschädigung/Augenreizung

Aus den Daten über das Lagerstättenwasser ist direkt keine Bewertung hinsichtlich der Augenschädigung/Augenreizung möglich.

Gemäß /CLP/ ist neben der Augenschädigung bzw. Augenreizung der Bestandteile auch die Hautätzung und -reizung mit zu berücksichtigen. Es sind mindestens 1 % augenschädigender oder hautätzender Bestandteile, entsprechend 10 g/L, für eine Einstufung als augenreizend notwendig. Für die Einstufung als augenschädigend sind mindestens 3 % entsprechend 30 g/L notwendig.

Nach dem Auswahlverfahren sind als augenschädigende Verbindungen Eisen(III)chlorid und Bleinitrat sowie zusätzlich das hautätzende Quecksilberdichlorid zu berücksichtigen. Die theoretisch berechneten Gehalte sind in Summe mit ca. 100 mg/L bzw. ca. 350 mg/L deutlich unter den Grenzwerten, so dass eine Einstufung als augenschädigend nicht erfolgt.

Für die Bewertung der Augenreizung sind die augenschädigenden bzw. hautätzenden Bestandteile mit dem Faktor 10 zusätzlich zu den augenreizenden Bestandteilen zu berücksichtigen. Über das Auswahlverfahren wurden Lithiumchlorid, Strontiumchlorid, Eisen(III)sulfat, Strontiumnitrat, Calciumbromid, Calciumformiat

und Benzol als augenreizende Bestandteile ermittelt. Mit den augenschädigenden Bestandteilen (unter Berücksichtigung des Faktors) ergeben sich insgesamt als Gehalte ca. 2,6 g/L bzw. ca. 10 g/L.

Nach den Gehalten für die gewichteten Konzentrationen als auch nach den Maximalwerten ist das Lagerstättenwasser nicht als augenschädigend einzustufen, da die Grenze von 10 % (entsprechend 100 g/L) deutlich unterschritten wird.

Sensibilisierung der Atemwege oder der Haut

Aus den bereitgestellten Daten ist direkt keine Bewertung ableitbar.

Auf Basis der Datenbank /GESTIS/ ist keine der möglichen Verbindungen (sofern dort enthalten) als atemwegssensibilisierend eingestuft. Somit ist eine solche Einstufung für das Gemisch nicht vorzunehmen.

Hinsichtlich der Hautsensibilisierung ist nur Eisentrichlorid eingestuft, welches theoretisch mit ca. 90 mg/L bzw. 320 mg/L angesetzt werden könnte. Da für eine Einstufung als hautsensibilisierend Untergruppe 1A mindestens 0,1 % hautsensibilisierender Bestandteile (entsprechend 1 g/L) für eine entsprechende Einstufung vorhanden sein müssen, ist das Lagerstättenwasser auch nicht als hautsensibilisierend einzustufen.

Keimzellmutagenität

Gemische sind nach /CLP/ als keimzellmutagen einzustufen, wenn mindestens ein keimzellmutagener Bestandteil mit 0,1 Gewichtsprozent oder mehr enthalten ist, was 1 g/L entspricht. Für die Kategorie 2 liegt die Grenze bei 1 % (entsprechend 10 g/L).

Als keimzelltoxisch Kategorie 1 ist Benzol eingestuft, während das hier hypothetische Quecksilberdichlorid keimzelltoxisch Kategorie 2 zugeordnet ist. Beide erreichen aber nicht die notwendige Konzentration für eine Einstufung (maximal Benzol ca. 750 mg/L bzw. Quecksilberdichlorid ca. 0,165 mg/L). Bei dieser Gefahrenklasse ist zudem keine Summenregel definiert, sondern die Entscheidung nur für jede Kategorie getrennt erfolgt; aber selbst wenn, so wäre das Lagerstättenwasser nicht als keimzellmutagen einzustufen.

Karzinogenität

Für eine Einstufung als karzinogen sind mindestens 0,1 % Bestandteile mit dieser Eigenschaft notwendig, was einer Konzentration von 1 g/L entspricht. Für die Kategorie 2 gilt die Grenze von 1 % (entsprechend 10 g/L).

Nach Anhang 6 von /CLP/ ist Benzol als karzinogen eingestuft, Bleiacetat dagegen nicht. Gemäß /GESTIS/ wird Bleiacetat als H351 („kann vermutlich Krebs erzeugen“) eingestuft, was für die weitere Betrachtung mitberücksichtigt wird. Auch hier besteht keine Summenregel für die verschiedenen Kategorien, so dass

beide getrennt betrachtet werden. In beiden Fällen liegen die Maximalkonzentrationen unterhalb der Einstufungsgrenze (Benzol: ca. 750 mg/L bzw. Bleidiacetat: ca. 50 mg/L), so dass keine Einstufung des Lagerstättenwassers als karzinogen erfolgt.

Reproduktionstoxizität

Als reproduktionstoxisch sind neben Toluol und dem hypothetisch angenommen Quecksilberdichlorid auch Bleiverbindungen und metallisches Quecksilber eingestuft. Im Sinne einer „worst-case“-Betrachtung ergibt sich aus den Quecksilberionenkonzentrationen theoretisch eine höhere Konzentration für Quecksilberdichlorid als für metallisches Quecksilber, so dass für die weitere Betrachtung Quecksilberdichlorid als worst-case-Maßstab genommen wird. Bei den möglichen Bleiverbindungen liefert das Bleidibromid den höchsten Konzentrationswert, so dass dieser für die Berechnung verwendet wird (Auswahlverfahren).

Es gibt keine Summenregel, sondern für die verschiedenen Kategorien müssen die Einstufungsgrenzwerte einzeln überschritten werden. Für die Kategorie 1 gilt eine Grenze von 0,3 % (entsprechend 3 g/L), während für die Kategorie 2 eine Grenze von 3 % (entsprechend 30 g/L) gilt.

Bleiverbindungen sind in die Kategorie 1 eingestuft, während Toluol und Quecksilberdichlorid in die Kategorie 2 eingestuft sind. Die theoretischen Maximalkonzentrationen der Verbindungen mit ca. 55 mg/L für die Kategorie 1 und mit der Summe von ca. 220 mg/L für die Kategorie 2 liegen weit unter den Einstufungsgrenzwerten, so dass keine Einstufung des Lagerstättenwassers als reproduktionstoxisch erforderlich wäre.

Spezifische Zielorgan-Toxizität (einmalige Exposition)

Nach Datenbank /GESTIS/ ist keine der möglichen Verbindungen in die spezifische Zielorgan-Toxizität (einmalige Exposition) Kategorie 1 und 2 eingestuft. Da mindestens 1 % Bestandteile mit diesen Konzentrationen enthalten sein müssen, ist keine Einstufung des Lagerstättenwassers in diese Gefahrenklasse notwendig.

Hinsichtlich der Kategorie 3 sind Einstufungen mit H335 („Kann die Atemwege reizen“) oder H336 („Kann Schläfrigkeit und Benommenheit verursachen“) zu berücksichtigen, wobei ein allgemeiner Konzentrationsgrenzwert von 20 % als zweckmäßig angegeben wird. Mit H335 sind die Verbindungen Strontiumchlorid, Quecksilberchlorid, Calciumbromid und Calciumformiat gekennzeichnet. Als Gehalte ergeben sich aus den gewichteten Konzentrationen ca. 1,8 g/L und für die Maximalkonzentrationen ca. 4,2 g/L, welche beide deutlich unterhalb der Grenzkonzentration von 200 g/L (entsprechen 20 %) liegen. Somit ist eine Einstufung des Lagerstättenwassers mit H335 nicht notwendig.

Spezifische Zielorgan-Toxizität (wiederholte Exposition)

Mit dem Auswahlverfahren lassen sich als eingestuft in die spezifische Zielorgan-Toxizität Kategorie 1 Quecksilberdichlorid, Bariumnitrat und Benzol bestimmen. Für die Kategorie 2 ergibt das Auswahlverfahren Bleibromid, Quecksilberdibromid und Toluol.

Ab einer Konzentration von 1 % (entsprechend 10 g/L) Bestandteilen der Kategorie 1 ist das Gemisch mindestens in die Kategorie 2 und ab 10 % (entsprechend 100 g/L) in die Kategorie 1 einzustufen. Rechnerisch ergeben sich für die Kategorie 1 Gehalte von ca. 350 mg/L bzw. ca. 800 mg/L. Hieraus folgt keine Einstufung des Lagerstättenwasser auf Basis des vorhandenen Benzols oder der hypothetisch angenommenen Verbindungen Bariumnitrat und Quecksilberdichlorid.

Da auch Kategorie 2 Stoffe enthalten sind, ist zu prüfen, ob hier die Konzentrationsgrenze von 10 % (entsprechend 100 g/L) überschritten ist. Mit Gehalten von ca. 90 mg/L bzw. ca. 270 mg/L liegen diese ebenfalls deutlich unter der Konzentrationsgrenze.

Somit ist das Lagerstättenwasser nicht in die Gefahrenklasse spezifische Zielorgan-Toxizität (wiederholte Exposition) einzustufen.

Aspirationsgefahr

Eine Einstufung des Lagerstättenwassers als aspirationsgefährlich wäre ab einem Gemischanteil von 10 % aspirationsgefährlicher Bestandteile, was 100 g pro Liter Wasser entspricht, bei hinreichend geringer Viskosität notwendig. Die Viskosität von Wasser liegt unter der Viskositätsgrenze von 20,5 mm²/s, aber die Summe aspirationstoxischer Verbindungen, hier Benzol und Toluol, liegen deutlich unter den notwendigen 100 g/L. Eine Einstufung in diese Gefährdungskategorie muss deshalb nicht vorgenommen werden.

2.3 Umweltgefahren

Gewässergefährdend

Unter „Umweltgefährdung“ ist im Chemikalienrecht im Wesentlichen die Gefährdung der aquatischen Umwelt zu verstehen. Je nach Verfügbarkeit toxikologischer Daten und Abbaubarkeit des Stoffes unterteilt die CLP-Verordnung – ähnlich auch das Gefahrgutrecht – anhand von Konzentrationsschwellenwerten für LC50 oder EC50 in die Kategorien

- Gewässergefährdend, akute Wirkung („Kategorie Akut 1“)
- Gewässergefährdend, langfrist. Wirkung („Chronisch 1-4“)

Zur Abgrenzung dienen zumeist die „*No observed effect concentrations*“ NOEC mit dem Ziel des Schutzes verschiedener Wasserorganismen.

Aufgrund der zur Verfügung stehenden aquatischen Toxizitätsdaten erfolgt eine Betrachtung nur auf Basis der akuten aquatischen Toxizität. Für das Lagerstättenwasser wird für die hypothetisch möglichen Verbindungen aus den ermittelten Kationen und Anionen sowie den gemessenen BTEX-Verbindungen mit deren niedrigsten LC50-Werten aus der verwendeten Datenbank mit Hilfe der Formel nach Anhang 1 Nummer 4.1.3.5.2 a /CLP/ ein Gemisch-LC50-Wert ermittelt. Hierbei werden zwei Berechnungen durchgeführt. Zum einen wird jeweils der über die Lagerstättenwässer gewichtete Mittelwert verwendet und zum anderen der jeweils höchste Konzentrationswert aller Bohrstellen, um zum einen die durchschnittliche Belastung und zum anderen die „worst-case“-Betrachtung abzubilden.

Bei Verwendung der gewichteten Mittelwerte ergibt sich rechnerisch ein LC50-Wert für das Gemisch für die Toxizität gegenüber Fischen von ca. 7,1 mg/L, was über der Einstufungsgrenze von 1 mg/L liegt. Die gleiche Berechnung mit den Werten für Krebse liefert einen LC50-Wert von ca. 8,2 mg/L, was ebenfalls über dem Einstufungsgrenzwert liegt. Führt man die gleiche Berechnung für die Maximalkonzentrationen durch, so lauten die Werte für Fische ca. 8,7 mg/L und für Krebse ca. 11 mg/L.

Sowohl für die gewichteten Mittelwerte als auch die Maximalwerte ist anhand der Fisch- und Krebstoxizitätsschwellen **rechnerisch keine Einstufung als gewässergefährdend** vorzunehmen.

Diese Ergebnisse beruhen auf der Additivitätsformel nach Anhang I Nr. 4.1.3.5.2 /CLP/ und dem Vergleich des resultierenden Toxizitätswertes für das Gemisch. Dieses Verfahren gilt nach Anhang I Nr. 4.1.3.5.5.1 /CLP/ unter der Voraussetzung, dass für alle hochtoxischen Bestandteile des Gemisches Toxizitätsdaten vorliegen und es schlüssige Belege dafür gibt, dass sämtliche anderen Bestandteile wenig oder gar nicht toxisch sind und somit nicht deutlich zur Umweltgefährdung des Gemisches beitragen.

Das an dieser Stelle als Alternative beschriebene Stufenkonzept nach Nr. 4.1.3.5.5.3 ff berücksichtigt die Gefährlichkeit hochtoxischer Bestandteile durch einen Faktor mit dem die Konzentration multipliziert wird. Das Gemisch ist dann als „Gewässergefährdend Akut 1“ einzustufen, wenn auf diesem Rechenweg ein Anteil von mindestens 25 % erreicht wird. Führt man dieses Verfahren für die akute Ökotoxizität durch, so erhält man rechnerisch bei Verwendung der Mittelwerte ca. 0,7 % als „Akut 1“ einzustufende Stoffe, was weit unterhalb der für eine Einstufung notwendigen 25 % liegt.

Für die Maximalkonzentrationen ergibt sich bei dieser Rechnung

ca. 1,7 % einzustufender Stoffanteil. Somit ist auch nach dieser Rechenmethode das Lagerstättenwasser nicht als „Gewässergefährdend Akut 1“ einzustufen.

Da für die Beurteilung der langfristigen Gewässergefährdung keine Daten vorhanden sind, kann auf direktem Weg keine Einstufung vorgenommen werden. Nach Anhang I Nr. 4.1.3.6.1 soll beim Fehlen verwertbarer Informationen für relevante Bestandteile, eine Einstufung aufgrund der Daten der bekannten Bestandteile erfolgen und mit einem „Zusatzhinweis auf dem Etikett und dem Sicherheitsdatenblatt“¹ auf die fehlenden Bestandteile hingewiesen werden. Da derzeit in der /GESTIS/ Datenbank keine Daten hinsichtlich der langfristigen Wassergefährdung (NOEC – No Observed Effect Concentration) zu finden sind, ist eine direkte Bewertung als „Gewässergefährdend Chronisch“ nicht vorzunehmen.

Hinweis: die Einstufung der Gewässergefährdung aufgrund der CLP-Verordnung ist nicht identisch mit der Zuordnung eines Gemisches zu Wassergefährdungsklassen aufgrund der VwVwS.

2.4 Weitere Gefahren

Die Ozonschicht schädigend Gemäß den bereitgestellten Daten sind keine die Ozonschicht schädigenden Stoffe im Lagerstättenwasser vorhanden, die über erkennbare Emissionen wirksam sind.

¹ Dieser Hinweis gilt natürlich für solche Gemische, die aufgrund der CLP-Verordnung in Verkehr gebracht werden und als solche zu kennzeichnen sind.

3 Einstufung des Lagerstättenwassers nach Gefahrgutrecht

Das Gefahrgutrecht /ADR/ kennt 9 Klassen für die wesentlichsten Gefährdungen beim Transport von Stoffen und Gegenständen.

Klasse 1 Explosive Stoffe und Gegenstände mit Explosivstoff

Es sind keine explosiven Eigenschaften aufgrund der Zusammensetzung und des Verhaltens des Lagerstättenwassers erkennbar und bisher beobachtet worden.

Klasse 2 Gase

Da das Lagerstättenwasser weder bei 20 °C und Standarddruck vollständig gasförmig ist, noch bei 50 °C einen Dampfdruck von mehr als 300 kPa (Wasser bei 50 °C 12,35 kPa) aufweist, hat keine Zuordnung zu dieser Klasse zu erfolgen.

Klasse 3 Entzündbare flüssige Stoffe

Seitens RWE Dea wurden beim Lagerstättenwasser Flammpunktbestimmungen vorgenommen, welche über 75 °C lagen. Da der Flammpunkt für eine Einstufung als Gefahrgut der Klasse 3 bei 60 °C oder darunter liegt, ist eine Einstufung in diese Klasse nicht vorzunehmen. Das Auftreten von brennbaren Dämpfen oder Gasen über der transportierten Flüssigphase wird über die Begrenzung des Füllgrades erfasst und geregelt.

Klasse 4.1 Entzündbare feste Stoffe, selbstzersetzliche Stoffe und desensibilisierte explosive feste Stoffe

Das Lagerstättenwasser ist weder ein Feststoff noch selbstzersetzlich.

Klasse 4.2 Selbstentzündliche Stoffe

Es sind weder pyrophore Eigenschaften (Entzündung an Luft innerhalb von 5 Minuten) noch Selbsterhitzung (bei längerer Lagerung keine Temperaturerhöhung) beobachtet worden.

Klasse 4.3 Stoffe, die in Berührung mit Wasser entzündbare Gase entwickeln

Da das Lagerstättenwasser selbst eine wässrige Phase ist, sind bei Zugabe von Wasser keine gefährlichen Gase zu erwarten.

Klasse 5.1 Entzündend (oxidierend) wirkende Stoffe

Die im Lagerstättenwasser vorliegenden Ionen haben keine Eigenschaften, die eine Einstufung in diese Klasse erfordern.

Klasse 5.2 Organische Peroxide

Beim Lagerstättenwasser handelt es sich nicht um ein organisches Peroxid.

Klasse 6.1 Giftige Stoffe

Gemäß den unter „Grundsätzliches“ angegebenen Annahmen werden die vorliegenden akuten Toxizitäten der Stoffe gemäß der in 2.2.61.1.1 /ADR/

in Verbindung mit 2.2.61.1.9.1 /ADR/ und 2.2.61.1.9.10 /ADR/ für zwei Konzentrationsprofile verrechnet.

Die Berechnungsverfahren entsprechen denen nach Chemikalienrecht, so dass die dort ermittelten Ergebnisse als Grundlage verwendet werden können. Im Unterschied dazu berücksichtigt das Gefahrgutrecht nur die Kategorien 1-3 bei der Einstufung. Somit ergibt sich aufgrund der chemikalienrechtlichen Einstufung in Kategorie 4 bei der oralen Toxizität keine Einstufung nach Gefahrgutrecht.

Das Lagerstättenwasser ist in der Zusammensetzung nach Tabelle 1 dieses Sonderteils nach Gefahrgutrecht nicht in die Klasse 6.1 einzustufen.

Klasse 6.2 Ansteckungsgefährliche Stoffe

Es wird angenommen, dass keine Krankheitserreger im Lagerstättenwasser enthalten sind. Untersuchungen hierzu liegen nicht vor.

Klasse 7 Radioaktive Stoffe

Stoffe, die Radionuklide enthalten, sind der Klasse 7 zuzuordnen, wenn sowohl die Aktivitätskonzentrationen als auch die Gesamtaktivität der Sendung (Ladung) die für die Radionuklide im ADR angegebenen Werte übersteigt.

Die Beförderung des Lagerstättenwassers erfolgt mittels Tankfahrzeugen, welche unterschiedliche Größen haben können. Für die weitere Betrachtung werden max. 30 m³ als Transportmenge (Sendung) angenommen (z.Z. erfolgen die Transporte mit 25 m³).

	Messwerte [Bq/L]	Max. Aktivität [Bq/g]	Max. Aktivität Sendung [Bq]	Abgeleiteter Aktivitätswert A ₂ [TBq]	ADR- Sendung freigestellt [Bq]
Ra-226	0,018 – 36,5	0,0365	1.095.000	3 * 10 ⁻³	10.000
Ra-228	0,017 – 29,7	0,0297	891.000	2 * 10 ⁻²	100.000
Pb-210	0,018 – 59,0	0,059	1.770.000	5 * 10 ⁻²	10.000
Po-210	0,001 – 4,00	0,004	120.000	2 * 10 ⁻²	10.000
U-234	0,001 – 0,006	0,000006	180	6 * 10 ⁻³	10.000
U-238	0,001 – 0,006	0,000006	180	unbegrenzt	10.000

(Bei den Urannukliden wurde der jeweils niedrigste Wert aus dem ADR übernommen.)

Berechnet man aus der maximalen Aktivität die der Sendung (Ladung) [Spalte 4 der Tabelle] für die einzelnen Nuklide, so wird der Grenzwert für eine freigestellte Sendung [Spalte 6] bei allen Nukliden außer den Urannukliden überschritten. Für die Urannuklide ist eine weitere Prüfung nicht

mehr notwendig, da die Sendung hier freigestellt ist. Für die anderen Nuklide führt aber die Überschreitung allein nicht zu einer Einstufung in die Klasse 7. Es muss auch der abgeleitete Aktivitätswert A_2 überschritten sein.

Vergleicht man die maximal gemessenen Aktivitäten [Spalte 4] mit den abgeleiteten Aktivitätswerten A_2 [Spalte 5] für die einzelnen Nuklide, so liegen diese für eine Sendung deutlich (ca. 3 Zehnerpotenzen) unter den angegebenen Grenzwerten. Damit wird die zweite Bedingung bei den Ra-, Pb- und Po--Nukliden für eine Einstufung nicht erfüllt.

Somit ist das Lagerstättenwasser anhand der vorliegenden Analysen nicht in die Klasse 7 einzustufen.

Klasse 8 Ätzende Stoffe

Aufgrund der festgestellten pH-Werte von 4,5 bis 6,7 und unter Berücksichtigung der Säure/Basen-Kapazitäten ist keine ätzende Wirkung zu erwarten. Die durchgeführten Untersuchungen zur Metallkorrosivität anhand der Kriterien nach */UN-Handbuch/* machen auch von daher keine Einstufung als korrosiv erforderlich.

Klasse 9 Verschiedene gefährliche Stoffe und Gegenstände

Die in Nummer 2.2.9.1.10.4.5 */ADR/* angegebenen Formeln entsprechen denen nach Anhang 1 Nummer 4.1.3.5.2 a */CLP/*, so dass die für das Chemikalienrecht ermittelten Werte verwendet werden können.

Die Einstufungsgrenze für die Kategorie „Akut“ entspricht ebenfalls den nach Chemikalienrecht geltenden Grenzen von 1 mg/L. Somit kann die dort ermittelte Einstufung auf das Gefahrgutrecht direkt übernommen werden.

Da keine Einstufung nach Chemikalienrecht als gewässergefährdend erfolgt, ist auch eine Einstufung als gewässergefährdend (umweltgefährdend) nach Gefahrgutrecht nicht notwendig.

Zusammenfassend ist das Lagerstättenwasser aufgrund der vorliegenden Daten keiner Gefahrenklasse zuzuordnen und damit nicht als Gefahrgut zu transportieren.

4 Einstufung des Lagerstättenwassers nach Wasserrecht

Die Bewertung von Schutzmaßnahmen von Anlagen zum Umgang mit wassergefährdenden Stoffen im Sinne des Wasserrechts erfolgt unter Verwendung einer logarithmisch abgestuften Kenngröße: die Wassergefährdungsklasse (WGK). Die Einstufung in Wassergefährdungsklassen erfolgt gemäß der Verwaltungsvorschrift **wassergefährdende Stoffe** /VwVwS/ vom 17. Mai 1999, zuletzt geändert am 27. Juli 2005 /VwVwS2/. Verwendung findet hier der vom Umweltbundesamt hierzu veröffentlichte „Leitfaden für Selbsteinstufer“ vom Juni 2008 /UBA Leitfaden/. Im Kapitel 5 wird die Einstufung von Gemischen beschrieben, wobei speziell das Kapitel 5.1 „Einstufung aufgrund der WGK der Komponenten“ Anwendung findet.

Da die Wassergefährdungsklasse für Verbindungen definiert wird und nicht auf Kationen und Anionen basiert, wurden aus den Kationen und Anionen, in der von RWE Dea zur Verfügung gestellten Datei „Wassermengenundwerte2013_GPOJP_24052013_Rev01.xlsx“ aufgeführt sind, alle sinnvoll kombinierbaren Verbindungen ermittelt. Wie im Kapitel 1 beschrieben, wurden die theoretisch maximal möglichen Konzentrationen dieser Verbindungen bestimmt. Im Gegensatz zur Toxizität ist hier eine Korrektur der Salinität notwendig, da die Konzentrationen bei der Bewertung eine entscheidende Rolle spielen. Aus diesem Grund wird das Verhältnis aus der wahren Salinität und der rechnerisch ermittelten Salinität als Faktor bestimmt, mit dem die Konzentrationswerte multipliziert werden.

In der Datenbank /GESTIS/ sind nicht für alle so bestimmten Verbindungen Einstufungen in die Wassergefährdungsklassen angegeben. Aus diesem Grund wurde für die fehlenden Verbindungen eine sinnvolle WGK-Einstufung vorgenommen, wobei im Wesentlichen die Kationen für die Einstufung entscheidend waren.

Aus den errechneten Verbindungskonzentrationen und den zugeordneten WGK-Klassen wurden die Anteile der einzelnen WGK-Klassen im Lagerstättenwasser bestimmt.

Auch hier wurden die Bestimmungen der Gehalte an Stoffen der verschiedenen Wassergefährdungsklassen zum einen für die gewichteten Mittelwerte über alle Lagerstättenwasser und zum anderen für die maximal möglichen Konzentrationen der Stoffe einzelner Bohrstellen als „worst-case“-Betrachtung durchgeführt.

Nach /VwVwS/ bzw. /VwVwS2/ sind die Berücksichtigungsgrenzen für krebserregende Stoffe 0,1 % (entspricht ca. 1 g/L) bzw. bei allen übrigen Stoffen 0,2 % (entspricht ca. 2 g/L) jeweils bezogen auf den Einzelstoff. Mit dieser hier unterschrittenen Maßgabe sind bei den Mittelwerten nur Calciumchlorid und Natriumchlorid zu berücksichtigen, die beide in die WGK 1 eingestuft sind. Somit würde nach dieser Berechnung eine Wassergefährdungsklasse 1 für das Lagerstättenwasser resultieren.

Bei den Maximalwerten wären für die WGK 1 nur Calciumchlorid, Kaliumchlorid, Natriumchlorid, Calciumacetat, Kaliumacetat und Natriumacetat und in der WGK 2 Strontiumacetat zu berücksichtigen. Als Gehalte für das Lagerstättenwasser sind so ca. 20,2 % WGK-1-Stoffe und ca. 0,24 % WGK-2-Stoffe zu berücksichtigen, was zu einer Gesamteinstufung ebenfalls in die Wassergefährdungsklasse 1 führt.

Lässt man die Berücksichtigungsgrenzen außer Acht, so ergeben sich mit der Bestimmung über alle Verbindungen die folgenden Werte. Da kein krebserzeugender Einzelstoff die Berücksichtigungsgrenze überschreitet, wurden im Folgenden die Sondergrenzen bei krebserzeugenden Inhaltstoffen nicht berücksichtigt. Ein solcher Stoff wurde aber auch unterhalb der Berücksichtigungsgrenze in die Berechnung mit seiner WGK einbezogen.

Im Falle der Mittelwerte ergeben sich rechnerisch für die Lagerstättenwasser Gehalte an Stoffen der

- WGK 3 ca. 0,01 %
- WGK 2 ca. 0,12 % und
- WGK 1 ca. 8,04 %.

Gemäß den in Tabelle 5 des Leitfadens /UBA Leitfaden/ angegebenen Grenzen

WGK 3	bei ≥ 3 % WGK 3	
WGK 2	bei max. 0,2 bis 3 % WGK 3	und
	bei ≥ 5 % WGK 2	
WGK 1	bei $< 0,2$ % WGK 3	und
	bei max. 0,2 % bis 5 % WGK 2	und
	bei ≥ 3 % WGK 1	

resultiert eine Gesamteinstufung des Lagerstättenwassers in die **WGK 1**.

Betrachtet man die maximal möglichen Konzentrationen nach gleichem Rechenverfahren, so ergeben sich für das Lagerstättenwasser Gehalte an

- WGK-3-Stoffen ca. 0,11 %,
- WGK-2-Stoffen ca. 0,48 % und
- WGK-1-Stoffen ca. 22,32 %.

Auch hier resultiert eine Gesamteinstufung des Lagerstättenwassers in die WGK 1.

Zusammenfassend ergibt sich für die Einstufung nach Wasserrecht die Wassergefährdungsklasse 1 für das Lagerstättenwasser.

Die WGK-Einstufung basiert auf RWEDea-Analysen aus dem Zeitraum Mai 2013.. Die Berücksichtigung zusätzlicher Anionen und Kationen aufgrund von Analysen aus Juli 2013 ergibt eine geringfügige Reduzierung der Salinität der Lagerstättenwasser, so dass die oben angegebenen Gehalte leicht nach unten korrigiert werden müssten, was aber an der Einstufung nichts ändert.

Die Summe der Mittelwerte der zusätzlichen Kationen beträgt 25,7 mg/L, was gegenüber dem Gesamtgehalt an Kationen in der Lösung von ca. 31.100 mg/L einem Anteil von ca. 0,08 % entspricht. Da der Anteil der hinzugekommenen Kationen bzw. der Verbindungen so gering ist und die Verbindungen der hinzugekommenen signifikanten Kationen (B, Mn, Zn) meist in die Wassergefährdungsklasse 1 einzuordnen sind, **wurde auf eine Neuberechnung verzichtet**, da keine Änderung der Einstufung in die Wassergefährdungsklasse 1 resultieren kann. Ähnlich verhält es sich bei den maximal möglichen Konzentrationen. Zwar ist der Anteil der zusätzlichen Kationen mit 0,4 % höher, aber auch hier sind als signifikante Kationen B, Mn und Zn auszumachen, deren Verbindungen in die Wassergefährdungsklasse 1 einzuordnen sind. Auch hier sind die Änderungen an den

Verhältnissen der WGK-Stoffe zueinander nur geringfügig, so dass keine Änderung der Gesamteinstufung zu erwarten ist. Ähnlich verhält es sich bei den zusätzlich bestimmten Anteilen organischer Verbindungen, weshalb sich an der Gesamteinstufung für das Lagerstättenwasser keine Änderung ergibt.

Die Wassergefährdungsklasse stellt eine Schutzstufe hinsichtlich Vorkehrungen beim Umgang mit dem betreffenden Stoff dar. Gefährdungsklassen werden deshalb häufig über die Kombination von WGK und Menge sowie eventuell den Aggregatzustand (fest, flüssig) definiert.

Für die Abwasserbeseitigung gibt es demgegenüber nur die Möglichkeit, das Abwasser über die Herkunftsbereiche nach den Anhängen der Abwasserverordnung /AbwV/ zu charakterisieren oder anhand eines Vergleichs der Inhaltsstoffe mit den Indirekteinleiter-Grenzwerten der kommunalen Abwasserbeseitigungssatzungen; eine Katalog-mäßig abschließende Gliederung der Abwässer wie nach der Abfallverzeichnisverordnung für Abfälle gibt es nicht.

Hinweis:

Aufgrund der geplanten neuen bundesweiten Anlagenverordnung AwSV (Entwurf vom 22.07.2013) ist eine wesentliche Änderung bei der Einstufung von Gemischen abzusehen; so sind u.a. Kriterien für die Einstufung in „allgemein nicht wassergefährdend“ geplant.

5 Einstufung analog zur Strahlenschutzverordnung

In diesem Kapitel werden abweichend von der bisherigen Einstufung des unbehandelten Lagerstättenwassers auch die Kriterien für eine Einstufung der bei der Aufbereitung anfallenden (festen) Rückstände angegeben. Die rechtlich verankerte Differenzierung zwischen Abwässern aus Strahlenschutzbereichen (hier nicht relevant) und Anforderungen an natürliche Radionuklide in Abwässern oder Rückständen aufgrund von Tätigkeiten gemäß Teil 3 der /StrlSchV/ ist ökologisch nicht nachvollziehbar. Laut der aktuellen Richtlinie 2013/59/Euratom vom 05.12.2013 wird im Einklang mit dieser Kritik begründet:

„Der Schutz vor natürlichen Strahlungsquellen sollte nicht getrennt in einem eigenen Abschnitt behandelt, sondern vollständig in die allgemeinen Anforderungen integriert werden. Insbesondere sollten Industriezweige, in denen Materialien verarbeitet werden, die natürlich vorkommende Radionuklide enthalten, innerhalb desselben Regelungsrahmens wie andere Tätigkeiten behandelt werden.“

In Konsequenz dieser Diskrepanz zwischen geltendem deutschen Recht und den Zielvorgaben im Rahmen des EURATOM-Abkommens bzw. den ökologischen Grundsätzen wird in diesem Sonderteil und im Hauptgutachten einerseits auf die rechtlich bindende Differenzierung von Teil 2 und Teil 3 der Strahlenschutzverordnung Bezug genommen, zur Bewertung der NORM-Stoffe aber auch auf Teil 2 /StrlSchV/ zurückgegriffen, der der Bewertung radioaktiver Stoffe im Rahmen von Tätigkeiten in Strahlenschutzbereichen vorbehalten ist.

5.1 Lagerstättenwasser

Aus den Analysendaten der RWE Dea wurden folgende Aktivitäten bzw. Frachten radioaktiver Nuklide in den Lagerstättenwassern entnommen.

Tabelle 2: Produktionsbezogene Mittelwerte und Frachten je Isotop

	Produktionsgewichteter Mittelwert	Fracht	Ermittelter Maximalwert
Isotop	Bq/L	MBq/a	Bq/L
U 238	0,003	0,39	0,006
U 234	0,004	0,43	0,006
Ra 226	10,5	1.260	36,5
Pb 210	14,3	1.720	59,0
Po 210	1,25	150	4,0
U 235	n.n.	n.n.	n.n.
Ra 228	10,8	1.290	29,7

Unter Bezugnahme auf das Gutachten /U25/ zur strahlenschutzfachlichen Bewertung der Lagerstättenwasser vom 12.12.2012 wird das Lagerstättenwasser in eine von vier Kategorien eingeteilt:

1. Kategorie 1: radiologisch nicht relevant
2. Kategorie 2: radiologisch indifferent
3. Kategorie 3: radiologisch ggf. relevant
4. Kategorie 4: radiologisch relevant nach Teil 3 Strahlenschutzverordnung /StrlSchV/

Produktionswässer aus der Erdgasförderung (Lagerstättenwasser) sind nicht als Rückstände im Sinne der /StrlSchV/ anzusehen, wohl aber als Materialien nach § 3 (2) Nr. 20 /StrlSchV/, für die eine strahlenschutzrechtliche Überwachung angeordnet werden kann.

Die Überwachungsgrenzen für Rückstände i.S. Anlage XII Teil B geben spezifische Aktivitäten an, bei deren Unterschreitung die Strahlenexposition für Einzelpersonen die Richtdosis von 1 mSv/a eingehalten ist.

Für Abwasser, das aus Strahlenschutzbereichen in eine Kanalisation abgeleitet wird (Indirekteinleitung -> Kläranlage -> Klärschlamm) kann die Behörde davon ausgehen, dass die Anforderungen an die Begrenzung der Strahlenexposition von Einzelpersonen der Bevölkerung nach § 47 StrlSchV von 0,3 mSv/a erfüllt sind, wenn die in Anlage VII Teil D Nr. 2 aufgeführten Werte eingehalten sind.

Obwohl es sich bei der Erdöl-/Erdgasgewinnung nicht um einen zu genehmigenden Umgang mit radioaktiven Stoffen im Sinne von Teil 2 StrlSchV handelt, geben die in der Anlage VII Teil D genannten Aktivitätskonzentrationen eine (konservative) Indikation für die Einhaltung der Schutzziele des Strahlenschutzes.

Die im o.g. Gutachten vorgenommene Kategorisierung führt zu folgenden Ergebnissen:

Kategorie 1: radiologisch nicht relevant

Radionuklidkonzentrationen in Abwasser, das in Abwasserkanäle eingeleitet wird und das die in Anlage VII Teil D Nr. 2 der /StrlSchV/ genannten Aktivitätskonzentrationen C_i^* einhält, wird als radiologisch nicht relevant bewertet.

Bei Gemischen gelten folgende Aktivitätskonzentrationen nach Anlage VII Tabelle 4 Spalte 3 bzw. Tabelle 6 Spalte 4 /StrlSchV/

$$\sum_i \frac{C_i}{C_{i*}} \leq 1, \text{ wenn Ableitung} > 100.000 \text{ m}^3/\text{a}$$

$$\sum_i \frac{C_i}{C_{i*}} \leq 10, \text{ wenn Ableitung} \leq 100.000 \text{ m}^3/\text{a}$$

wobei folgende Bezugswerte einzusetzen sind.

Tabelle 3: Bezugswerte für Einleitung in Kanalisation und nach TrinkwV („Grundwasserrelevanz“)

Nuklid	$C_i^*(\text{Bq/L})$ Indirekteinleitung	$C_{i,\text{ref}}(\text{Bq/L})$ TrinkwV
U-238	3,0	3,0
U-234	2,0	2,8
Ra-226	0,20	0.5

Pb-210	0,10	0,2
Po-210	0,03	0,1
Ra-228	0,03	0,2

Unterschreiten die o.g. Summenwerte im Jahresmittel bzw. abhängig von den Jahreswassermengen den Wert 1 oder 10, so ist von einer zusätzlichen Strahlenexposition (effektive Dosis) für Einzelpersonen der Bevölkerung von deutlich weniger als 0,3 mSv/a auszugehen. Eine realistische Betrachtung der Strahlenexposition wird zu deutlich geringeren Dosen führen, da in die Werte nach Anlage VII StrlSchV für die Ableitung von Wasser sowohl aus der Belastung durch „Aufenthalt auf Sediment“ als auch durch Aufnahme radioaktiver Stoffe mit der Nahrung („Ingestion“) eingegangen sind. Von einer standortbezogenen Betrachtung, bei der bestimmte Expositionspfade (z.B. Trinkwasser, Wasser-Fisch, Pflanze-Nutztier etc.) ausgeschlossen werden können und damit nicht zu berücksichtigen wären, ist damit eine geringere Dosis als 0,3 mSv/a zu erwarten.

Ähnlich dem Konzept der Risikoquotienten in Bezug auf Geringfügigkeitsschwellenwerte werden lt. /U25/ mittlerweile Richtwerte $C_{i,ref}$ nach Trinkwasserverordnung /TrinkwV2001/ für natürliche Radionuklide festgelegt, die über einen Jahresverzehr von 730 L definiert sind und sich aus den in der vorgenannten Tabelle 3 aufgelisteten Referenzkonzentrationen ergeben; es gilt unabhängig von der Jahresmenge²:

$$\sum_i \frac{C_i}{C_{iRef}} < 1$$

Kategorie 2: radiologisch indifferent

Bezüglich einer möglichen Differenzierung der einzelnen Bohrstellen mit unterschiedlicher radioaktiver Belastung und jährlicher Einleitmenge schlägt /U25/ eine Kategorie vor, die eine Zuordnung zu Kategorie 1 oder 3 in Abhängigkeit von der Jahreseinleitmenge ermöglichen soll. Es gilt:

$$V^o = \frac{100.000 \text{ m}^3}{\sum_i \frac{C_i}{C_{i*}}},$$

wobei für den Summenwert der Radionuklide nach Anlage VII Tabelle 4 Spalte 3 bzw. Tabelle 6 Spalte 4 /StrlSchV/ gilt: $10 < \text{Summenwert} < 60$.

Liegen dann die Einleitmengen unter dem vorgenannten Volumenstrom im (Kalender)Jahr, so kann eine Einordnung in Kategorie 1 erfolgen.

Kategorie 3: radiologisch ggf. relevant

Für den Fall, dass die Summenwerte der im Abwasser enthaltenen Radionuklide im Sinne Anlage VII, Teil D Nr.2 den Wert 60 übersteigt, ist gegebenenfalls eine Anzeigepflicht im Sinne §§ 71 (2) u. (3) /StrlSchV/ zu beachten, es gilt:

$$\sum_i \frac{C_i}{C_{i*}} > 60.$$

In solchen Fällen besteht gegenüber dem Betreiber der Abwasserbehandlungsanlage ein Informationsgebot, damit dieser ggf. unter Berücksichtigung weiterer Zuleitungen radioaktiv

² Die Anwendung geringfügiger Kontaminationen auf Basis der TrinkwV sind restriktiver als die Werte nach Anlage VII Teil D StrlSchV, da diese auch bereits für Mengen unter 100.000 m³/a anzuwenden sind.

belasteter Abwässer seiner Pflicht einer Anzeige erhöhter Radionuklidkonzentrationen gegenüber der Behörde nachkommen kann.

Kategorie 4: radiologisch relevant nach Teil 3 /StrlSchV/

Aufgrund der natürlich vorkommenden Radionuklidbestandteile des Lagerstättenwassers ist lt. /U25/ Teil 3 der /StrlSchV/ grundsätzlich einschlägig. Stellt man damit eine Analogie zu Anlage XII /StrlSchV/ her, so gilt unter der Annahme einer Dichte von 1 kg/L ein Wert von 0,2 Bq/g bzw. 200 Bq/L für die Aktivitätskonzentrationen aller untersuchten Radionuklide. Liegen die spezifischen Aktivitäten aller Radioisotope der Zerfallsreihen U-238sec und Th-232sec über diesem Wert, so könnte das Material als Rückstand im Sinne § 97 /StrlSchV/ betrachtet werden; aufgrund seiner besonderen Eigenschaften (Flüssigkeit) ist es nicht von den Spezifikationen der Anlage XII Teil B /StrlSchV/ erfasst und somit kann die Notwendigkeit bestehen, vor einer Entsorgung eine Entlassung aus der radiologischen Überwachung zu beantragen, vgl. hierzu Anlage XII Teil B und D /StrlSchV/.

Zusammenfassend lassen sich die Lagerstättenwasser wie folgt nach /U25/ kategorisieren, wobei in dem zitierten Gutachten die Zuordnung der untersuchten Lagerstättenwässer aus den Einzelbohrungen vorgenommen wurde. Zum Vergleich wurde in diesem Gutachten das Lagerstättenwasser mit der Mischzusammensetzung (produktionsgewichtete Mittelwerte) zugeordnet:

Tabelle 4 (ex /U25/): Kategorisierung der Bohrungen nach radiologischer Relevanz des LaWa

Kategorie	Bewertung / Handlungserfordernis	Prüfkriterium	Anzahl der Bohrungen
1	(a) Radiologisch nicht relevant	(a) Summenwert StrlSchV < 10	10 (+)
	(b) Wasserrechtlich geringfügig	(b) Summenwert TrinkwV < 1	6
	keine Handlungserfordernisse für (a) und (b)		
2	Radiologisch indifferent / Handlungserfordernis nach Kategorie 3 möglich	10 < Summenwert StrlSchV < 60	5
3	Radiologisch ggf. relevant / Information an Abwasserentsorger	Summenwert StrlSchV > 60	10 (+)
4	Radiologisch relevant / Überwachung nach Teil 3 StrlSchV	200 Bq/l für mindestens 1 Radionuklid	Keine

(+) abhängig von der Zuordnung der Produktionswässer der Kategorie 2 ggf. auch mehr.

Für die Zuordnung des vermischten Lagerstättenwassers bei einer zentralen Aufbereitung gilt:

Tabelle 5: Summenwerte nach StrlSchV für LaWa

Nuklid	C_i (Bq/L)	C_i/C_i^* Abwasser	$C_i/C_{i,ref}$ TrinkwV (Grundwasser)
U-238	0,003	0,001	0,001
U-234	0,004	0,002	0,001
Ra-226	10,5	52,5	21,0
Pb-210	14,3	143	71,5
Po-210	1,25	41,7	12,5
Ra-228	10,8	360	54,0
Summe Σ		597,2	159,0
Jahresmenge	Ca. 130.000 m³/a		
Einleitung ohne Aufbereitung		Kategorie 3 $V^{\circ}_{Grenz} = \text{ca.} 167 \text{ m}^3/\text{a}$	> 1

Anhand dieser Werte wird deutlich, dass weder eine Direkteinleitung noch eine Indirekteinleitung (bei den derzeitigen Jahresmengen) ohne Aufbereitung des Lagerstättenwassers möglich ist; im Hauptgutachten werden einige Fälle betrachtet, in denen durch Vorbehandlung/Aufbereitung des LaWa eine Reduzierung der Radionuklide vorgenommen wird und wie sich dies auf die Einleitfähigkeit auswirkt.

5.2 Feste Rückstände aus der Aufbereitung

Die Einordnung der Schlämme aus der Aufbereitung von Lagerstättenwasser erfolgt nach der Strahlenschutzverordnung. Hier wird in Teil 3 der Schutz von Mensch und Umwelt vor natürlichen Strahlungsquellen bei Arbeiten behandelt. In Kapitel 3, Schutz der Bevölkerung bei natürlich vorkommenden radioaktiven Stoffen, definiert der § 97 „überwachungsbedürftige Rückstände“.

Handelt es sich bei dem Abfall um Rückstände nach § 3, § 97 und Anlage XII Teil A /StrlSchV/, gelten die in der Anlage XII Teil B genannten Überwachungsgrenzen für eine Verwertung oder Beseitigung von Rückständen. Soweit 0,2 Bq/g für die spezifische Aktivität der Nuklide der Nuklidkette U-238 sec (hier: U 234, Ra 226, Pb 210 und Po 210) und Th-232 sec (hier: Ra 228) unterschritten wird, liegt kein Rückstand im Sinne Anlage XII Teil A vor. Eine Abstimmung mit der zuständigen Aufsichtsbehörde wird empfohlen. Auf die differenzierenden Regelungen des Überwachungswertes nach Art und Größe der Deponie in Teil B der Anlage XII wird hingewiesen.

Wird der Abfall aufgrund seiner Herkunft (Abwasserbehandlungsanlage) nicht als Rückstand eines bergbaulichen Prozesses angesehen, gilt der § 102 aus Teil 3 der /StrlSchV/, in dem die Überwachung sonstiger Materialien geregelt ist. Die zuständige Behörde kann in diesem

Fall in einer Einzelfallbetrachtung die Anordnungen zum Umgang mit dem Abfall/Rückstand zum Schutz der Bevölkerung bei natürlich vorkommenden radioaktiven Stoffen treffen. Hier werden zur Einstufung der Unbedenklichkeit wiederum die Überwachungsgrenzen der Anlage XII, Teil B, herangezogen.

Eine Gegenüberstellung der spezifischen Aktivität der wesentlichen Isotope aus den letzten Analysenwerten mit der spezifischen Aktivitätsgrenze nach Anlage XII Teil A der /StrlSchV/ von 0,2 Bq/g ist in der folgenden Tabelle durchgeführt worden.

Tabelle 6: Spezifische Aktivität pro Radionuklid im Vergleich zu dem Wert für Rückstände nach Anlage XII StrlSchV

	Spez. Aktivität	Anlage XII
Radionuklid	Bq/g	
U 238	4,0 E-05	0,2
U 234	4,5 E-05	
Ra 226	0,131	
Pb 210	0,179	
Po 210	0,016	
Ra 228	0,134	

In Teil B (Überwachungsgrenzen für Rückstände nach Teil A), wird die Überwachungsgrenze bei untertägiger Verwertung oder Deponierung angegeben. Für repräsentativ ermittelte Werte $C_{U238 \text{ max.}}$ und $C_{Th232 \text{ max.}}$ der größten spezifischen Aktivitäten der Radionuklide der Nuklidketten U-238sec und Th-232sec in Becquerel durch Gramm (Bq/g) gilt die nachfolgende Summenformel:

$$C_{U238 \text{ max.}} + C_{Th232 \text{ max.}} \leq C \text{ mit der Überwachungsgrenze } C = 5 \text{ Bq/g}$$

Mit den maximalen Konzentrationen der Nuklide Pb 210 und Ra 228 aus vorstehender Tabelle ergibt sich eine Summe von 0,313 Bq/g, die deutlich unter der Überwachungsgrenze für untertägige Verwertung oder Deponierung liegt.

Da die entsprechenden Bezugswerte eingehalten sind, können die Rückstände in einer untertägigen Deponie entsorgt werden, soweit keine weiteren Annahmegrenzen der Deponiebetreiber eine Deponierung ausschließen. Eine abfallrechtliche Verwertung oder Beseitigung ohne Entlassung aus der Überwachung wäre im Falle überwachungsbedürftiger Rückstände im Sinne Anlage XII Teil A in Verbindung mit § 97 StrlSchV nicht zulässig (§ 98 StrlSchV)

Hinweis: Fa. K+S als Betreiber zugelassener Untertagedeponien (UTD) entscheidet im Einzelverfahren anhand der Deponieordnung, ob Abfälle mit radioaktiven Bestandteilen angenommen werden! Nach unseren Informationen wird hier häufig mit den viel niedrigeren Freigrenzen bzw. Freigabewerten aus Teil 2 der /StrlSchV/ für künstliche Radioaktivität argumentiert.

Der Richtwert hinsichtlich der durch die Beseitigung oder Verwertung bedingten Strahlenexposition von Einzelpersonen der Bevölkerung darf dabei eine effektive Dosis von 1 Millisievert im Kalenderjahr auch ohne weitere Maßnahmen nicht überschreiten.

Grundsätzlich sind Kriterien aus Anlage XII Teil A Nr. 1 und Teil B *StrlSchV* mit der spezifischen Aktivitätsgrenze von 0,2 Bq/g für Rückstände im Sinne § 97 und den Überwachungsgrenzen nach Teil B auch in Fällen des § 102 *StrlSchV* anwendbar.

6 Einstufung nach Abfallrecht

Eine Einstufung des Lagerstättenwassers als Abfall ist nach Abfallrecht entsprechend den Vorgaben der Abfallverzeichnis-Verordnung /AVV/ vorzunehmen. Die Zuordnung zu den Abfallarten erfolgt unter den im Abfallverzeichnis vorgegebenen Kapiteln (zweistellige Kapitelüberschrift) und Gruppen (vierstellige Kapitelüberschrift). Innerhalb einer Gruppe hat eine speziellere Abfallart vor einer allgemeineren Abfallart Vorrang. Die Reihenfolge der Prüfung ist durch die Nummer 2 des Anhangs zur /AVV/ näher spezifiziert.

Für die Bestimmung der Abfallart ist die Herkunft der Abfälle entscheidend. Das Lagerstättenwasser ist dem Herkunftsbereich Kapitel 01 „Abfälle, die beim Aufsuchen, Ausbeuten und Gewinnen sowie bei der physikalischen und chemischen Behandlung von Bodenschätzen entstehen“ zuzuordnen.

Aus gleichem Grund ist als Gruppe die „01 04 Abfälle aus der physikalischen und chemischen Weiterverarbeitung von nichtmetallhaltigen Bodenschätzen“ auszuwählen.

Als Abfallarten kommen dann in Frage:

„01 04 07* gefährliche Stoffe enthaltenden Abfälle aus der physikalischen und chemischen Weiterverarbeitung von nichtmetallhaltigen Bodenschätzen“

und

„01 04 12 Aufbereitungsrückstände und andere Abfälle aus der Wäsche und Reinigung von Bodenschätzen mit Ausnahme derjenigen, die unter 01 04 07 und 01 04 11 fallen“.

Da es sich bei der Abfallart 01 04 07* um einen gefährlichen Abfall handelt, während die Alternative 01 04 12 keinen gefährlichen Abfall darstellt, müssen weitere Prüfungen erfolgen. Zur AVV wurden seitens des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit „Hinweise zur Anwendung der Abfallverzeichnis-Verordnung vom 10. Dezember 2001, BGBl. I Seite 3379“ veröffentlicht /*BMU Hinweise*/.

Die Hinweise sollen insbesondere bei der Zuordnung der gefahrenrelevanten Eigenschaften bei den sogenannten Spiegeleinträgen helfen und eine Anleitung für die Zuordnung von Abfällen zu den als gefährlich bzw. nicht gefährlich geltenden Abfallarten anhand konkretisierender Merkmale geben.

Im Anhang II ist die Liste der Spiegeleinträge aufgeführt, in welcher für den gefährlichen Abfall 01 04 07 die ungefährlichen Abfälle 01 04 08, 01 04 10, 01 04 11, 01 04 12 und 01 04 13 angegeben sind, wobei die Abfallart 01 04 12 auf das Lagerstättenwasser am besten anwendbar ist. Somit entspricht die zuvor getroffene Auswahl mit den vom Gesetzgeber gewünschten Zuordnungen überein.

Im Anhang III der Richtlinie 2008/98/EG /*RiL2008*/ sind die Kriterien für einen gefährlichen Abfall als sogenannte H-Kriterien aufgeführt. Der Abfall gilt als „gefährlich“, wenn mindestens eine dieser Eigenschaften (H-Kriterien) erfüllt ist.

In der Entscheidung 2000/532/EG /*E2000*/ sind für die Kriterien H4 bis H8, H10 und H11 die Kriterien konkretisiert. Gleichzeitig gilt gemäß den /*BMU Hinweis*/en zur AVV: „Die Entscheidung 2000/532/EG legt für die Einstufung von Abfällen als gefährlich auch die nichtkonkretisierten gefahrenrelevanten Eigenschaften zugrunde. Diese Eigenschaften sind bei der Einstufung des Abfalls ohne Ausnahme zu berücksichtigen.“

Um eine Entscheidung zwischen den beiden Spiegeleinträgen vorzunehmen, sind somit alle 14 H-Kriterien gemäß den Hinweisen zu prüfen.

Die Kriterien für H1 bis H8, H10 und H11 orientieren sich an den Einstufungsgrenzen gemäß „altem“ Chemikalienrecht für Gemische (früher wurde die Kennzeichnung mit Hilfe von R-Sätzen ausgedrückt, während nach „neuem“ Recht das internationale GHS in Form der CLP-Verordnung in europäisches Recht umgesetzt wurde; die Kennzeichnung erfolgt durch H-Sätze; zu beachten sind teilweise unterschiedliche Grenzen der beiden Systeme). Unter Berücksichtigung der Ergebnisse der chemikalienrechtlichen Einstufung mit Übertragung auf das alte Chemikalienrecht sind diese Kriterien nicht erfüllt.

Somit müssen noch die nicht spezifizierten Kriterien gemäß den Hinweisen überprüft werden.

Hinsichtlich des H9-Kriteriums (infektiös) wird wie bei der chemikalienrechtlichen Einstufung vorausgesetzt, dass keine infektiösen Belastungen im Lagerstättenwasser vorhanden sind.

Für das Kriterium H12 für Stoffe und Gemische, die bei der Berührung mit Wasser, Luft oder Säure ein giftiges oder sehr giftiges Gas abscheiden, ist bisher beim Lagerstättenwasser keine Beobachtung eines solchen Gases gemacht worden bzw. kann aufgrund der Inhaltstoffe kein solches Gas entstehen, weshalb das Kriterium nicht zum Tragen kommt (insbesondere kein Schwefelwasserstoff H₂S).

Als letztes Kriterium ist H13 zu nennen, welches für Stoffe und Gemische zutreffen kann, die nach Beseitigung auf irgendeine Art die Entstehung eines anderen Stoffs bewirken können, z.B. ein Auslaugungsprodukt, das eine der oben genannten Gefahreigenschaften aufweist. Im Chemikalienrecht gibt es für Gefahren mit der Bildung von Eluaten mit gefährlichen Eigenschaften keine Beschreibungen. Die Hinweise zur Anwendung der AVV weisen hierzu aus:

„In Abschnitt 2.3.1 der Entscheidung 2003/33/EG /E2003/ werden als Ausnahmeregelung unter dem Gesichtspunkt einer tolerierbaren Auslaugbarkeit für die Zuordnung von gefährlichen Abfällen zu einer Deponie für nicht gefährliche Abfälle festgelegt. Diese Zuordnungswerte können zur Prüfung für das Vorliegen der gefahrenrelevanten Eigenschaft H13 verwendet werden. Für die Abgrenzung gefährlicher von nicht gefährlichen Abfällen gemäß H13 können die im Anhang III [der Hinweise; Bemerkung des Autors] genannten Bestimmungswerte herangezogen werden.“

Im Anhang III /E2003/ sind Eluatwerte genannt; das Überschreiten nur eines Parameters macht den Abfall zu einem gefährlichen Abfall. Hierbei wären die genannten Eluatwerte direkt mit den Gehalten im „flüssigen Abfall Lagerstättenwasser“ zu vergleichen, da das Kriterium die mögliche Verunreinigung von Grundwasser mit aus Deponien austretenden Flüssigkeiten erfassen soll. Da ein Umgang mit Lagerstättenwasser auch eine Verunreinigung von Grundwasser verursachen kann, ist die Anwendung unter diesem Gesichtspunkt sinnvoll, zumal eine Anwendung „ohne Ausnahme“ erfolgen soll.

Da die /BMU Hinweise/ zur AVV, welche u.a. die Einstufung von Abfällen nach ihrer Gefährlichkeit regeln und nicht den Verbleib der Abfälle, eine Anwendung der H-Kriterien ohne Ausnahme verlangen, ist auch das H13-Kriterium als formales Entscheidungskriterium zur Unterscheidung zwischen nicht gefährlichem Abfall und gefährlichem Abfall aus Gutachtersicht anwendbar. Obwohl flüssige Abfälle gemäß der Richtlinie 1999/31/EG, auf

die die Entscheidung 2003/33/EG Bezug nimmt, nicht auf Deponien verbracht werden dürfen, ist nach den /BMU-Hinweisen/ die Abgrenzung zwischen gefährlichen und nicht gefährlichen Abfällen gemäß den dort im Anhang III aufgeführten Bestimmungswerten aus ökologischer Sicht im Sinne einer worst-case-Betrachtung sinnvoll.

Tabelle 7: Eluatbestimmungswerte nach Anhang III der /BMU-Hinweise/³

Parameter	Bestimmungswert
Antimon	> 0,07 mg/l
Arsen	> 0,2 mg/l
Barium	> 10 mg/l
Blei	> 1 mg/l
Cadmium	> 0,1 mg/l
Chrom ges.	> 1 mg/l
Kupfer	> 5 mg/l
Molybdän	> 1 mg/l
Nickel	> 1 mg/l
Quecksilber	> 0,02 mg/l
Selen	> 0,05 mg/l
Zink	> 5 mg/l
Fluorid	> 15 mg/l

Da zwar eine „Auslaugbarkeit“ des Lagerstättenwassers nicht gegeben ist, aber anhand der Auslaugbarkeit von Feststoffen eine mögliche Verunreinigung des Grundwassers beurteilt werden soll, werden hier die vorgenannten Eluat-Bestimmungswerte direkt mit den Gehalten im „flüssigen Abfall Lagerstättenwasser“ verglichen.

Bei dem Vergleich mit Lagerstättenwasser liegen für Barium, Blei und Quecksilber höhere Konzentrationen (produktionsgewichteter Mittelwert LaWa) als die angegebenen Bestimmungswerte vor. Da bei diesem Kriterium ausgeführt ist: „Bei festgestellter Überschreitung mindestens einer dieser Konzentrationsgrenzen kann der Abfall als gefährlich angesehen werden“, ist aufgrund der deutlichen Überschreitung (bei Blei ca. 10-fach) eine Einstufung als „gefährlicher Abfall“ zu rechtfertigen.

Im Hauptgutachten wird speziell auf die Gefahrenrelevanz organischer Inhaltsstoffe eingegangen. Hinsichtlich der Grenzen zum H13-Kriterium ist für die im Lagerstättenwasser relevanten Parameter BTEX, PAK und Kohlenwasserstoffe festzustellen, dass weder mit den gewichteten Mittelwerten noch durch die Ergebnisse einzelner Bohrstellen die in den /BMU-Hinweisen/ angegebenen Grenzen erreicht oder übertroffen werden.

Als Gesamtergebnis resultiert bei der Anwendung des H13-Kriteriums auf Lagerstättenwasser als flüssiger Abfall eine Überschreitung bei 3 Parametern (Schwermetalle) und damit eine Einstufung entsprechend den Kriterien als gefährlicher Abfall.

³ Die zugrundeliegende Entscheidung 2003/33/EG, Nr. 2.3.1 basiert auf 10-fach höheren Bestimmungswerten aus festem Abfall (L/S = 10 L/kg). Grenzwerte und Testverfahren sind von den Mitgliedstaaten festzulegen. Der Eluatbestimmungswert aus den BMU-Hinweisen ergibt sich bei vollständiger Elution.

Somit sollte das Lagerstättenwasser nach /AVV/ unter Beachtung der Hinweise zur Anwendung der AVV (/BMU-Hinweis/e) hinsichtlich der beiden in Frage kommenden Abfallschlüsseln dem Spiegelstricheintrag für gefährliche Abfälle zugeordnet werden. Dies entspricht für Lagerstättenwasser dem Abfallschlüssel

01 04 07* „gefährliche Stoffe enthaltende Abfälle aus der physikalischen und chemischen Weiterverarbeitung von nichtmetallischen Bodenschätzen“.

Bei Behandlung des Lagerstättenwassers kann sich (z.B. durch eine Reduktion des Bleigehaltes) eine andere Beurteilung hinsichtlich des H13-Kriteriums ergeben, welches ggf. zu einer Zuordnung als nicht gefährlicher Abfall führt.

Bei Einhaltung der H13-Kriterien könnte das Lagerstättenwasser als nicht gefährlicher Abfall mit dem Spiegeleintrag

01 04 12 Aufbereitungsrückstände und andere Abfälle aus der Wäsche und Reinigung von Bodenschätzen mit Ausnahme derjenigen, die unter 01 04 07 und 01 04 11 fallen

eingestuft werden.

7 Tabellarische Zusammenfassung der Einstufungen des Lagerstättenwassers

Im Folgenden bedeutet in der Spalte „Einstufung“

Entfällt Die Grundkriterien für das Einstufungskriterium sind nicht erfüllt
Keine Einstufung gemäß den Einstufungskriterien ist keine Einstufung vorzunehmen.

Tabelle 8: Übersicht der für das LaWa und teilweise die Rückstände aus der Behandlung vorgenommene Einstufung nach verschiedenen Regelungsbereichen

Chemikalienrecht		
Kriterium	Einstufung	Bemerkung
Explosive Stoffe / Gemische und Erzeugnisse mit Explosivstoff	entfällt	Kriterium nicht erfüllt
Entzündbare Gase	entfällt	Kriterium nicht erfüllt
Entzündbare Aerosole	entfällt	Kriterium nicht erfüllt
Oxidierende Gase	entfällt	Kriterium nicht erfüllt
Gase unter Druck	entfällt	Kriterium nicht erfüllt
Entzündbare Flüssigkeiten	Keine Einstufung	Flammpunkte über 60 °C
Entzündbare Feststoffe	entfällt	Kriterium nicht erfüllt
Selbstzersetzliche Stoffe und Gemische	entfällt	Kriterium nicht erfüllt
Pyrophore Flüssigkeiten	entfällt	Kriterium nicht erfüllt
Pyrophore Feststoffe	entfällt	Kriterium nicht erfüllt
Selbsterhitzungsfähige Stoffe und Gemische	entfällt	Kriterium nicht erfüllt
Stoffe und Gemische, die in Berührung mit Wasser entzündbare Gase entwickeln	entfällt	Kriterium nicht erfüllt
Oxidierende Flüssigkeiten	entfällt	Kriterium nicht erfüllt
Oxidierende Feststoffe	entfällt	Kriterium nicht erfüllt
Organische Peroxide	entfällt	Kriterium nicht erfüllt

Chemikalienrecht		
Kriterium	Einstufung	Bemerkung
Korrosiv gegenüber Metallen	Keine Einstufung	Prüfung Metallkorrosivität nach UN-Handbuch, s. /B 140211/
Akute Toxizität oral	Kategorie 4	Kennzeichnung  (GHS07 Ausrufezeichen) Signalwort: Achtung H302 Gesundheitsschädlich bei Verschlucken
Akute Toxizität dermal	Keine Einstufung	
Akute Toxizität inhalativ	Keine Bestimmung	Datenlage nicht ausreichend
Ätz-/Reizwirkung auf die Haut	Keine Einstufung	
Schwere Augenschädigung / Augenreizung	Keine Einstufung	
Sensibilisierung der Atemwege oder der Haut	Keine Einstufung	
Keimzellmutagenität	Keine Einstufung	
Karzinogenität	Keine Einstufung	
Reproduktionstoxizität	Keine Einstufung	
Spezifische Zielorgan-Toxizität (einmalige Exposition)	Keine Einstufung	
Spezifische Zielorgan-Toxizität (wiederholte Exposition)	Keine Einstufung	
Aspirationsgefahr	Keine Einstufung	
Akute Gewässergefährdung	Keine Einstufung	
Langfristige Gewässergefährdung	Keine Bestimmung	Datenlage nicht ausreichend

Chemikalienrecht		
Kriterium	Einstufung	Bemerkung
Die Ozonschicht schädigend	Keine Einstufung	

Kennzeichnung Chemikalienrecht nach Einstufungsergebnissen	
	Signalwort: Achtung H302 Gesundheitsschädlich bei Verschlucken

Hinweis:

Keine Zuordnung für Abfälle aus der Aufbereitung des Lagerstättenwassers vorgenommen

Gefahrgutrecht		
Kriterium	Einstufung	Bemerkung
Klasse 1	entfällt	Kriterium nicht erfüllt
Klasse 2	entfällt	Kriterium nicht erfüllt
Klasse 3	Keine Einstufung	Flammpunkte über 60 °C
Klasse 4.1	entfällt	
Klasse 4.2	entfällt	
Klasse 4.3	entfällt	
Klasse 5.1	entfällt	
Klasse 5.2	entfällt	
Klasse 6.1	Keine Einstufung	Kategorie des Chemikalienrechts gibt es im Gefahrstoffrecht nicht
Klasse 6.2	entfällt	
Klasse 7	Keine Einstufung	Obwohl Freistellungsgrenzen der Sendung überschritten ist, werden die abgeleiteten Aktivitätswerte der Nuklide nicht überschritten.
Klasse 8	Keine Einstufung	aufgrund Testergebnis (Metallkorrosion)

Gefahrgutrecht		
Kriterium	Einstufung	Bemerkung
Klasse 9	Keine Einstufung	

Kennzeichnung Gefahrgut nach Einstufungsergebnissen
Kein Gefahrgut

Hinweis:

Keine Zuordnung für Abfälle aus der Aufbereitung des Lagerstättenwassers vorgenommen

Wasserrecht		
Kriterium	Einstufung	Bemerkung
Wassergefährdungsklasse	1	

Hinweis:

Keine Zuordnung für Abfälle aus der Aufbereitung des Lagerstättenwassers vorgenommen

Strahlenschutzverordnung		
Kriterium	Einstufung	Bemerkung
Abwasser (Indirekteinleitung):		
Summenwert unbehandeltes LaWa nach StrlSchV > 60	LaWa radiologisch relevant nach Teil 3 StrlSchV, s. Anlage VII StrlSchV	Gutachten /U25/, Informationspflicht gegenüber nachgeschaltetem Aufbereiter/Kläranlage
Rückstände aus der Aufbereitung des LaWa	Einstufung nach Einzelbewertung	
< 0,2 Bq/g	Kein Rückstand	StrlSchV Anlage XII, Teil A
$C_{U-238max} + C_{Th-232max}$ < 0,5 Bq/g	Deponierung im Einzug Grundwasserleiter > 5.000 Mg/a	Überwachungsgrenze StrlSchV Anlage XII Teil B
$C_{U-238max} + C_{Th-232max}$ < 1 Bq/g	Verwertung, Beseitigung	Überwachungsgrenze StrlSchV Anlage XII Teil B

$C_{U-238max} + C_{Th-232max}$ < 5 Bq/g	Untertagedeponie	Überwachungsgrenze StrlSchV Anlage XII Teil B

Abfallrecht		
Kriterium	Einstufung	Bemerkung
Abfallschlüsselnummer	01 04 07*	gefährliche Stoffe enthaltende Abfälle aus der physikalischen und chemischen Weiterverarbeitung von nichtmetallhaltigen Bodenschätzen
Abfallschlüsselnummer	01 04 12	Spiegeleintrag lt. BMU-Hinweis nur möglich, wenn LaWa die H13-Eluatwerte einhält

Hinweis:

Keine Zuordnung für Abfälle aus der Aufbereitung des Lagerstättenwassers vorgenommen

8 Schema zur Bewertung der Umweltgefährlichkeit von Chemikalien

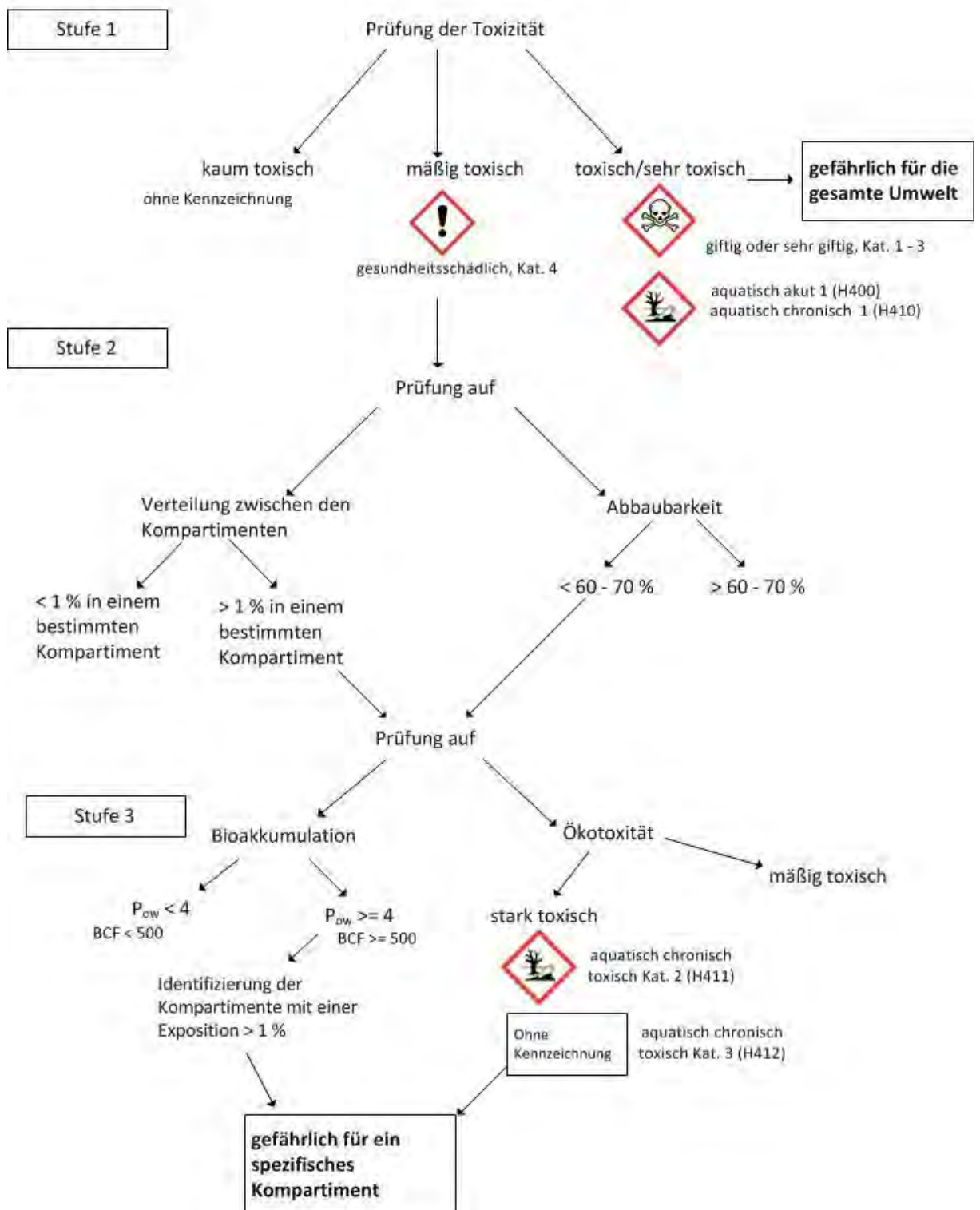
Zur Festlegung von Stoffgrenzwerten für die chemikalienrechtliche Beurteilung und Kennzeichnung wurden bereits sehr früh Schwellenwerte z.B. anhand folgender Kriterien entwickelt:

- akute Toxizität,
- Verteilung zwischen verschiedenen Umweltkompartimenten,
- Abbaubarkeit, Persistenz, Mobilität,
- ökotoxisches Potential,
- Bioakkumulation (Akkumulation einschl. geochemische Bioakkumulation)

Bei gegebenen Freisetzungsrisiken sind diese Kriterien mit Hilfe von Leitparametern wie Verteilungskoeffizient Octanol-Wasser P_{ow} bzw. BCF, Abbaubarkeit und Tox-Kategorien zu bewerten. Vgl. z.B. die Gefährlichkeitsbewertung auf Basis der RiLi 79/831/EG in /Parlar, H. und Angerhöfer, D. „Chemische Ökotoxikologie, (1995), Springer Berlin.

Unter Bezug auf aktuellere Grenz- und Richtwerte zur Kennzeichnung nach GHS lässt sich folgendes Schema auf Basis des von Parlar u. Angerhöfer dargestellten Entscheidungsbaums aufstellen; damit lässt sich ein gewisses Maß an Schematisierung bei der human- und ökotoxikologischen Bewertung eines spezifischen Zielkompartimentes erreichen, die als Grundlage für eine ökologische Differenzierung verschiedener Verfahrensvarianten dienen, soweit sich diese über die genannten Kriterien differenzieren lassen (unterschiedliche Freisetzung von Schadstoffen, deren Toxizität, Verteilung und „Nachhaltigkeit“)

Schema zur Schnelleinstufung der toxischen Wirkung



9 Verwendete Quellen

/ADR/	Zweiundzwanzigste Verordnung zur Änderung der Anlagen A und B zum ADR-Übereinkommen (22. ADR-Änderungsverordnung) vom 31. August 2012, veröffentlicht im BGBl. 2012 II Nr. 27 vom 11. September 2012, Seite 954 mit Anlage zur Verordnung Dreiundzwanzigste Verordnung zur Änderung der Anlagen A und B zum ADR-Übereinkommen (23. ADR-Änderungsverordnung) vom 8. März 2013, veröffentlicht im BGBl. 2013 II Nr. 7 vom 20. März 2013, Seite 309
/BMU Hinweise/	Hinweise zur Anwendung der Abfallverzeichnis-Verordnung vom 10. Dezember 2001, veröffentlicht als Beilage Nr. 148a zum Bundesanzeiger 2005 Nr. 148, Seite 12083
/B 140211/	Bericht über die Durchführung von Korrosionstests gemäß UNECE/ADR mit Aluminium- und Stahlcoupons in Lagerstättenwässern unterschiedlicher Salinität; Berichtsnr. 140211, TÜV Nord EnSys Hannover GmbH & Co KG vom 02.06.2014
/CLP/	Verordnung (EG) Nr. 1272/2008 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 16. Dezember 2008 über die Einstufung, Kennzeichnung und Verpackung von Stoffen und Gemischen, zur Änderung und Aufhebung der Richtlinien 67/548/EWG und 1999/45/EG und zur Änderung der Verordnung (EG) Nr. 1907/2006, veröffentlicht im EU ABl. L 353 vom 31. Dezember 2008, Seite 1, in der konsolidierten Fassung vom 19.04.2011
/E2000/	2000/532/EG: Entscheidung der Kommission vom 3. Mai 2000 zur Ersetzung der Entscheidung 94/3/EG über ein Abfallverzeichnis gemäß Artikel 1 Buchstabe a) der Richtlinie 75/442/EWG des Rates über Abfälle und der Entscheidung 94/904/EG des Rates über ein Verzeichnis gefährlicher Abfälle im Sinne von Artikel 1 Absatz 4 der Richtlinie 91/689/EWG über gefährliche Abfälle, veröffentlicht im EU ABl. L 226 vom 6. September 2000, Seite 3, in der konsolidierten Fassung vom 1. Januar 2002
/E2003/	2003/33/EG: Entscheidung des Rates vom 19. Dezember 2002 zur Festlegung von Kriterien und Verfahren für die Annahme von Abfällen auf Abfalldeponien gemäß Artikel 16 und Anhang II der Richtlinie 1999/31/EG, veröffentlicht im EU ABl. L11 vom 16. Januar 2003, Seite 27
/Euratom2013/	2013/59/EURATOM: Richtlinie zur Festlegung grundlegender Sicherheitsnormen für den Schutz vor den Gefahren einer Exposition gegenüber ionisierender Strahlung und zur Aufhebung der Richtlinien 89/618/Euratom, 90/641/Euratom, 96/29/Euratom, 97/43/Euratom und 2003/122/Euratom v. 5.12.2013, ABl. L13/1-73 v. 17.1.2014.

/GESTIS/	GESTIS-Stoffdatenbank, Gefahrstoffinformationssystem der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (www.dguv.de/ifa/gefahrstoffdatenbanken/GESTIS-Stoffdatenbank/index.jsp)
/RiLi2008/	Richtlinie 2008/98/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 19. November 2008 über Abfälle und zur Aufhebung bestimmter Richtlinien, veröffentlicht im EU ABl. L 312 vom 22. November 2008, Seite 3, in der konsolidierten Fassung vom 12. Dezember 2008
/StrlSchV/	Verordnung über den Schutz vor Schäden durch ionisierende Strahlen (Strahlenschutzverordnung – StrlSchV) vom 20.07.2001, veröffentlicht im BGBl. 2001 I Nr. 38 vom 26. Juli 2001, Seite 1714, zuletzt geändert am 24. Februar 2012
/TrinkwV2001/	Verordnung über die Qualität von Wasser für den menschlichen Gebrauch (Trinkwasserverordnung – TrinkwV 2001) vom 21.05.2001, Neufassung vom 28.11.2011 veröffentlicht BGBl. 2011 I Nr. 61 vom 6. Dezember 2011, Seite 2370, zuletzt geändert am 5. Dezember 2012
/U25/	Rainer Gellermann, NCC GmbH, „Gutachten zur Prüfung und Bewertung von Produktionswässern in Hinblick auf strahlenschutzfachliche Fragen im Zusammenhang mit der Entsorgung“, 12. Dezember 2012
/UBA Leitfaden/	Einstufung von Stoffen und Gemischen in Wassergefährdungsklassen gemäß der Verwaltungsvorschrift wassergefährdende Stoffe (VwVwS) vom 17.05.1999 und der Allgemeinen Verwaltungsvorschrift zur Änderung der VwVwS vom 27.07.2005 – Leitfaden für Selbsteinstufer, Umweltbundesamt, Juni 2008 [www.umweltbundesamt.de/wgs/archiv/einstuf.pdf] Aufgrund neuer Seitenstruktur derzeit nicht abrufbar.
/UN Handbuch/	UN Manual of Tests and Criteria, Fifth revised edition, herausgegeben von United Nations Economic Commission for Europe, erstellt vom Committee of Experts on the Transport of Dangerous Goods and on the Globally Harmonized System of Classification and Labelling of Chemicals der UN
/VwVwS/	Verwaltungsvorschrift wassergefährdende Stoffe (VwVwS) vom 17. Mai 1999, veröffentlicht als Beilage Nr. 98a zum Bundesanzeiger 1999 Nr. 98
/VwVwS2/	Allgemeine Verwaltungsvorschrift zur Änderung der Verwaltungsvorschrift wassergefährdende Stoffe vom 17. Juli 2005, veröffentlicht als Beilage Nr. 142a zum Bundesanzeiger 2005 Nr. 142, Seite 11673



**P I E W A K &
P A R T N E R G m b H**
INGENIEURBÜRO FÜR
HYDROGEOLOGIE
UND UMWELTSCHUTZ

Piewak & Partner GmbH • Jean-Paul-Straße 30 • 95444 Bayreuth

Jean-Paul-Straße 30
95444 Bayreuth
Telefon (0921) 50 70 36 - 0
Telefax (0921) 50 70 36 - 10
E-Mail: info@piewak.de
<http://www.piewak.de>

Geschäftsführer
Dipl.-Geologe Manfred Piewak
Dipl.-Geologe Ralf Wiegand
HRB Bayreuth 1792

Sachverständige und
Untersuchungsstelle
gem. § 18 BBodSchG

„Geomechanische Bewertung einer Injektion von Lagerstättenwasser in das Rotliegende (Havelsandstein) der Bohrung Völkersen-N-Z3“

- Langfassung -

Auftraggeber:
RWE Dea AG, Hamburg

Erkundung • Beratung • Planung • Gutachten

Grundwassererschließung • Trinkwassersanierung • Bohrungen • Tiefbrunnen • Grundwassermessstellen • Grundwassermodellierung
Wasserschutzgebiete • Altlasten • Deponiestandorte • Schadenanalysen • Schadensfallmanagement • Baugrund- und Bodenuntersuchung
Bodenmechanik • Gründungsberatung • Lagerstättenerschließung • Rohstoffsicherung • Geothermie • Strahlenschutz



Projekt: Geomechanische Bewertung
einer Injektion von Lagerstättenwasser in das Rotliegende (Havelsand-
stein) der Bohrung Völkersen-N-Z3

Auftraggeber: RWE Dea AG,
Hamburg

Projektnummer: 12242

Bearbeiter: Dr. Ing. Thomas Röckel, Diplom-Geologe

Ort/Datum: Bayreuth, 03.06.2014



Inhaltsverzeichnis

1	Zusammenfassung	1
2	Veranlassung und Aufgabenstellung	2
3	Allgemeines zur Bestimmung des Spannungszustandes	3
4	Bestimmung der Spannungsrichtungen	3
4.1	Hinweise auf den Spannungszustand aus Bruchstrukturen in der Bohrlochwand und in Bohrkernen	4
4.1.1	Breakouts	5
4.1.2	Bohrtechnisch induzierte Risse.....	6
4.1.3	Centerline Fractures.....	7
4.1.4	Core Disking.....	8
5	Ergebnisse der Spannungsauswertungen	9
5.1	Spannungsrichtungen im Deckgebirge	9
5.2	Spannungsrichtungen im Salz.....	11
5.3	Spannungsrichtungen im Reservoirbereich	12
5.4	Spannungsrichtungen aus Herdflächenlösungen	18
6	Spannungsbeträge	21
6.1	Vertikalspannung	21
6.2	Bestimmung der Spannungsbeträge der minimalen Horizontalspannung	26
6.2.1	Deckgebirge	26
6.2.2	Abschätzung des Betrages der minimalen Horizontalspannung im Salinar	27
6.2.3	Ermittlung des Betrages der minimalen Horizontalspannung im Reservoir	27
6.3	Änderung der minimalen Horizontalspannung in Erdgasfeldern durch die Depletierung.....	31
6.3.1	Änderung der minimalen Horizontalspannung im Heidbergsandstein des Feldes Völkersen durch die Depletierung	33
6.3.2	Änderung der minimalen Horizontalspannung im Havelsandstein des Feldes Völkersen durch die Depletierung.....	34
7	Folgerungen für eine Injektion in den Havelsandstein	40
8	Auswirkungen der Injektion von Lagerstättenwasser auf Störungszonen	42
9	Verzeichnisse	47
9.1	Abkürzungsverzeichnis.....	47
9.2	Tabellenverzeichnis	48
9.3	Abbildungsverzeichnis	49
10	Literatur	50



1 Zusammenfassung

Das Lagerstättenwasser der RWE-Dea, das bei der Produktion in Niedersachsen anfällt, soll bei der weiteren Förderung von Erdgas möglichst umweltverträglich entsorgt werden. Es ist insbesondere zu klären, ob eine Injektion des Lagerstättenwassers in das Rotliegende möglich ist.

Die Untersuchung der Bruchstrukturen in Bohrungen und an Bohrkernen ergibt, dass die maximale Horizontalspannung im Reservoir nahezu N-S gerichtet ist. Im Deckgebirge sind die Indikationen schwächer. Hier ist die Orientierung der maximalen Horizontalspannung eher E-W gerichtet und steht damit nahezu orthogonal zur maximalen Spannungsrichtung im Untergrund. Die Spannungsgradienten sind im Deckgebirge uneinheitlich und vermutlich von der Lithologie abhängig. Im Reservoir ist die minimale Horizontalspannung deutlich kleiner als die Vertikalspannung. Dies steht in Übereinstimmung mit den Erdbeben, die in der Nähe ausgewertet wurden. Durch die Druckabsenkung im Reservoir hat sich die minimale Horizontalspannung deutlich erniedrigt und die Scherspannungen sind signifikant gestiegen. Die Reibungswinkel, die sich aus den Spannungsmessungen ergeben, liegen für das Reservoir bei 30° bis 36°, während die Gesteinsfestigkeiten aus den Laborversuchen an intakten Bohrkernen eine sehr viel größere Festigkeit ergeben.

Der Befund, dass die Orientierung der minimalen Horizontalspannung im Deckgebirge und im Reservoir deutlich voneinander abweichen, kann darauf zurückgeführt werden, dass das Deckgebirge und das Reservoir durch die plastischen Salzlagen mechanisch voneinander entkoppelt sind. Der Befund, dass sich die aus den Spannungsmessungen im Reservoir ergebenden Reibungswinkel deutlich niedriger sind, als die gemessenen Reibungswinkel der Gesteine im Labor, deutet darauf hin, dass die Seismizität auf Störungszonen erfolgt. Durch den weiteren Druckabbau im Reservoir erhöhen sich die Scherspannungen. Mittels einer Injektion in das Reservoir kann einem Druckabbau entgegengewirkt werden. Hierdurch werden die Scherspannungen niedriger als ohne Injektion. Auf Grund der großen Porosität und Durchlässigkeit des Havel sandsteins kann es bei einer Injektion in den Havel nur zu einem sehr begrenzten und geringen Druckanstieg um die Injektionsbohrung kommen. Da im Bereich der Injektionsbohrung Völkersen Nord Z3 (VK-N Z3) keine Störungen vorhanden sind, ist dies ein weiterer günstiger Befund.

Die Bohrung VK-N Z3 ist als Injektionsbohrung für das Lagerstättenwasser geeignet.



2 Veranlassung und Aufgabenstellung

Das Lagerstättenwasser der RWE-Dea, das bei der Produktion in Niedersachsen anfällt, soll bei der weiteren Förderung von Erdgas möglichst umweltverträglich entsorgt werden.

Das zusammen mit dem Erdgas geförderte Lagerstättenwasser ist ein stark salines und mit verschiedenen Kohlenwasserstoffen sowie BTEX verunreinigtes Wasser.

Das Lagerstättenwasser wird an den Förderlokalen vom Gasstrom getrennt und in Lagertanks gestapelt. Derzeit fallen etwa 130.000 m³ Lagerstättenwasser im Jahr an. Diese Menge wird sich mit fallender Förderung in den nächsten Jahren verringern (RWE 2013).

Es soll geklärt werden, ob eine Injektion des Lagerstättenwassers in das Rotliegende möglich ist.

Bei Gasfeldern wird im Allgemeinen davon ausgegangen, dass die Lagerstätte über einen geologischen Zeitraum ihre Dichtigkeit nachgewiesen hat. Es wird angenommen, dass es bei einer Erhöhung des abgesenkten Porendrucks bis unterhalb des initialen Porendrucks zu einer annähernden Wiederherstellung der ursprünglichen Verhältnisse kommt.

Eine wichtige Frage bei der Beurteilung der Verhältnisse ist, ob es bei einer Injektion von Lagerstättenwasser nur zu einem Anstieg des Porendrucks bis unterhalb des initialen Porendrucks kommt, oder ob die Erhöhung des abgesenkten Lagerstättendrucks auch unterhalb des initialen Druckniveaus zu kritischen Zuständen führen kann.

Bei einer Injektion von Lagerstättenwasser sollte geklärt werden, ob das Deckgebirge hiervon beeinflusst werden kann. In diesem Zusammenhang ist die Klärung einer Spannungskopplung des Deckgebirges über dem Salz mit dem Reservoir von Bedeutung. Eine Charakterisierung des Deckgebirges erfolgte für den Bereich Wittorf Z1 in einer früheren Studie. Diese kann hier ergänzt und mit den Verhältnissen im Salz und im Reservoir verglichen werden.

Derzeit wird bei Injektionen die Frage der Seismizität kritisch hinterfragt. Hierzu sollen die Porendruck- und Spannungsänderungen untersucht werden. Da Erdbeben häufig an bestehenden Störungszonen auftreten, sind auch die geometrischen Verhältnisse der Störungszonen im Vergleich mit den Spannungsrichtungen von Bedeutung.



3 Allgemeines zur Bestimmung des Spannungszustandes

Zur Klärung der Frage, ob die Injektion von Lagerstättenwasser in das Rotliegende zu kritischen Veränderungen des Spannungszustandes im Bereich des Rückförderhorizontes führt, ist es notwendig, möglichst genaue Daten zu den Spannungsrichtungen, den Spannungsbeträgen, dem Porendruck und dem Reibungsverhalten der Gesteine zu erhalten.

Phänomene von Bohrlochinstabilitäten und von Bohrkerninstabilitäten sind ausgezeichnete Indikatoren, die eine Aussage über vorherrschende Spannungszustände in der Erdkruste einer bestimmten Region ermöglichen. Selbst wenn die Bohrung nicht mehr zugänglich ist, sind auch nach Beendigung der Bohrarbeiten, entsprechende Untersuchungen durch Auswertung der Bohrkern, der Bohrlochlogs und der bohrtechnischen Daten möglich. Vergleiche auf der Datenbasis der KTB (Kontinentale Tiefbohrung der Bundesrepublik Deutschland) haben die bruchmechanischen Phänomene im Bohrloch und am Bohrkern zu einem Instrument für eine zumindest halb-quantitative Spannungsabschätzung gemacht (RÖCKEL 1996, LEMPP & RÖCKEL 1999).

RÖCKEL & LEMPP (2003) haben die Phänomene von Bohrloch- und Bohrkerninstabilitäten aus einer Reihe tiefer Bohrungen des Norddeutschen Beckens auf ihre Indikatorfunktion für den Spannungszustand hin ausgewertet. Die Ergebnisse zu den Spannungsrichtungen beruhen auf rezenten, aktuellen Brucherscheinungen in den Bohrungen oder an den Bohrkernen. Diese Brucherscheinungen werden, soweit möglich, unter gleichzeitiger Einbeziehung von bohrtechnischen Daten interpretiert. Spannungsrichtungen und Spannungsbeträge reflektieren insoweit einen aktuotektonischen Zustand in den Regionen.

4 Bestimmung der Spannungsrichtungen

Die Spannungsrichtungen in Bereichen, in denen Erdbeben auftreten, können mit Herdflächenlösungen bestimmt werden. Im Bereich des Norddeutschen Beckens treten Erdbeben nur sehr selten auf, weshalb hier auch nur sehr wenige Herdflächenlösungen vorhanden sind.

Für das Norddeutsche Becken liegen eine Reihe von Bestimmungen von Spannungsrichtungen vor. Häufig werden diese aus Brucherscheinungen in Bohrungen und seltener an Bohrkernen bestimmt. Dazu zählt unter anderem eine Reihe von Methoden, die im Folgenden kurz erklärt werden. In Kombination mit bohrtechnischen Daten bilden diese Spannungsindikatoren die Grundlage für eine Abschätzung des Spannungszustandes in Bohrungen des Norddeutschen Beckens.

4.1 Hinweise auf den Spannungszustand aus Bruchstrukturen in der Bohrlochwand und in Bohrkernen

Bruchstrukturen in der Bohrlochwand geben wichtige Hinweise auf die Orientierung der Spannungsrichtungen. Bohrlochrandausbrüche sind in Vertikalbohrungen in Richtung der kleinsten Horizontalspannung (S_h) gerichtet, wenn die Gesteine sich hinreichend isotrop verhalten.

Bohrtechnisch induzierte Zugrisse in der Bohrlochwand öffnen sich normal zur kleinsten Hauptnormalspannung und streichen in Richtung der maximalen Horizontalspannung (S_H). Bohrtechnisch induzierte Risse in der Bohrlochwand können mit einem Borehole-TelevIEWer (BHTV), einem Formation-MicroScanner (FMS) oder einem Formation-MicroImager (FMI) festgestellt werden.

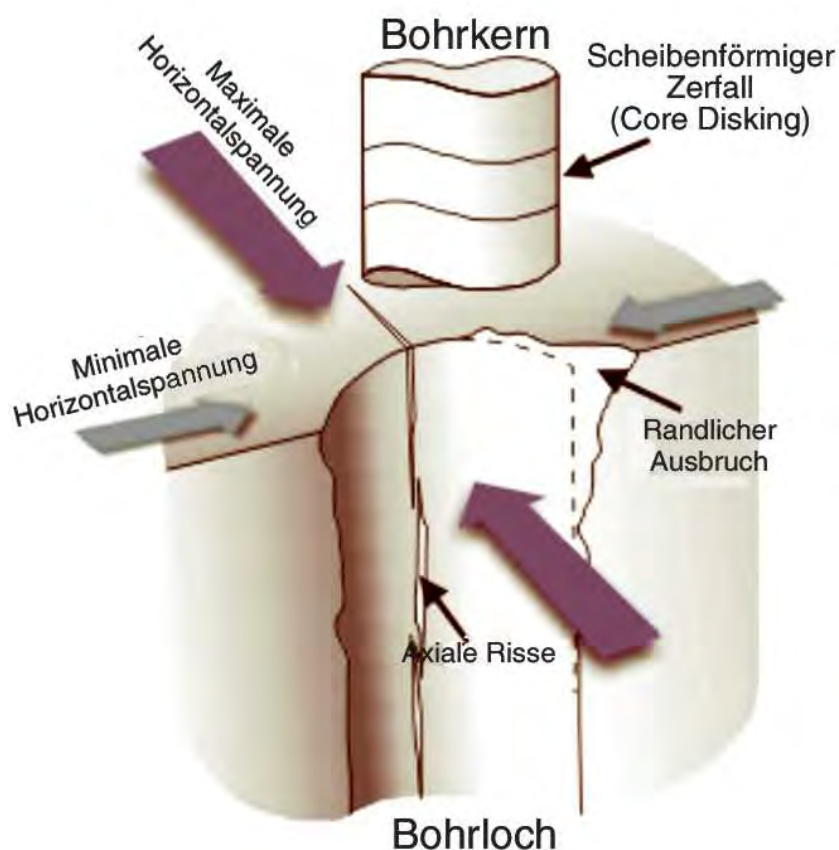


Abbildung 1: Spannungsindikatoren in Bohrkernen und im Bohrloch (aus RÖCKEL & LEMPP 2003)

4.1.1 Breakouts

Die in Tiefbohrungen auftretenden Bohrloch- und Bohrkerninstabilitäten sind bislang nur ansatzweise als Indikatoren für den Spannungszustand untersucht. Eine Ausnahme bilden hiervon die Bohrlochrandausbrüche oder Breakouts. COX (1970) und BABCOCK (1978) stellten fest, dass die Ausbrüche eine Vorzugsorientierung besitzen. Seit einer Reihe von Jahren sind die Ausbrüche als Indikatoren für die Richtung der minimalen Horizontalspannungen bekannt (BELL & GOUGH 1979, BLÜMLING 1986). In tieferen Bohrungen bricht die Bohrlochwand häufig in zwei einander gegenüberliegenden Bereichen aus. Bei isotropem Gesteinsverhalten treten die Ausbrüche in Richtung der minimalen Horizontalspannung auf (Abbildung 1). Die Erweiterung des Kalibers kann entweder mit einem 4-Arm- oder 6-Arm-Kaliber-Messgerät oder mit einem akustischen Borehole-Televiewer (BHTV) erfasst werden. Die Methode der Breakouts wird in zahlreichen Öl- und Gasbohrungen häufig angewandt und liefert gute Ergebnisse für die Orientierung der minimalen Horizontalspannung (S_h).

In der Bohrung VKRN Z2-3 sind bei BÜCKER & GMI (2002) Breakouts aus einem FMS-Log dargestellt (Abbildung 2).

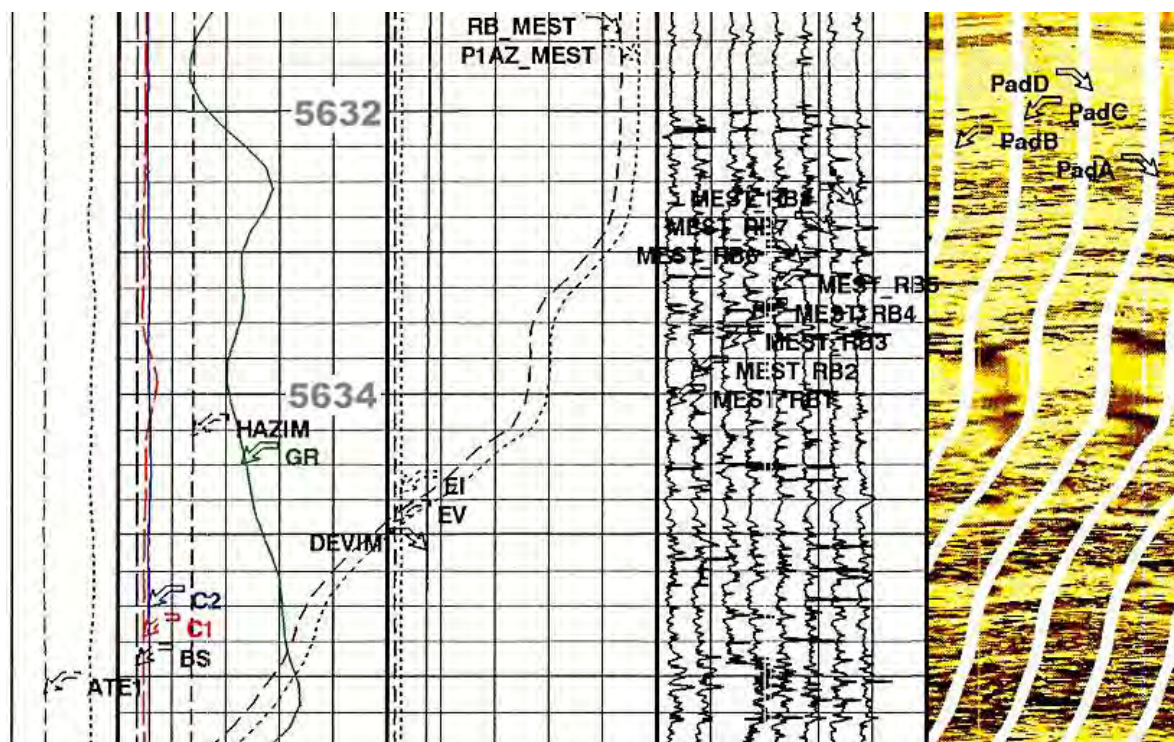


Abbildung 2: Beispiel für Bohrlochrandausbrüche im FMS-Image der Bohrung VKRN Z2.3 in der Messteufe von 5634 m MD in Fanglomeraten. Das Image Log zeigt Ausbrüche in der Richtung N96°E und N276°E (aus BÜCKER & GMI 2002).

4.1.2 Bohrtechnisch induzierte Risse

Vor der Durchführung der KTB-Bohrungen waren die bohrtechnisch induzierten Risse als Spannungsindikatoren praktisch ohne Bedeutung, wenn nicht gänzlich unbekannt. In den KTB-Bohrungen treten zahlreiche, bohrtechnisch induzierte Risse auf, welche als ausgezeichnete Spannungsindikatoren erkannt wurden (BORM et al. 1989, NATAU et al. 1990, ROECKEL et al. 1992, BRUDY & ZOBACK 1993). Bei den bohrtechnisch induzierten Rissen handelt es sich um Zugrisse, welche die Bohrlochwand in zwei etwa gleich große Hälften teilen (Abbildung 1). Deren Entstehung in Vertikalbohrungen wird begünstigt durch stark anisotrope Horizontalspannungen, durch hohe Spülungsdrücke, starke Auskühlung der Bohrlochwand beim Bohren, hohe Porendrücke sowie durch starke Druckstöße beim Einbau des Bohrgestänges. Die bohrtechnisch induzierten Risse streichen in Richtung der maximalen Horizontalspannung (S_H). Sie treten nicht nur in den KTB-Bohrungen auf, sondern sind auch in tiefen Kristallinbohrungen wie beispielsweise Urach und Soultz sowie in anderen Tiefbohrungen im sedimentären Deckgebirge weit verbreitet.

Aus der Bohrung VK Z2-3 ist ein Beispiel für bohrtechnisch induzierte Risse in der Bohrlochwand bei BÜCKER & GMI (2002) dargestellt (Abbildung 3). Neben vertikalen Rissen gibt es, insbesondere in geneigten Bohrungen auch nichtvertikale, en echelon förmige Risse.

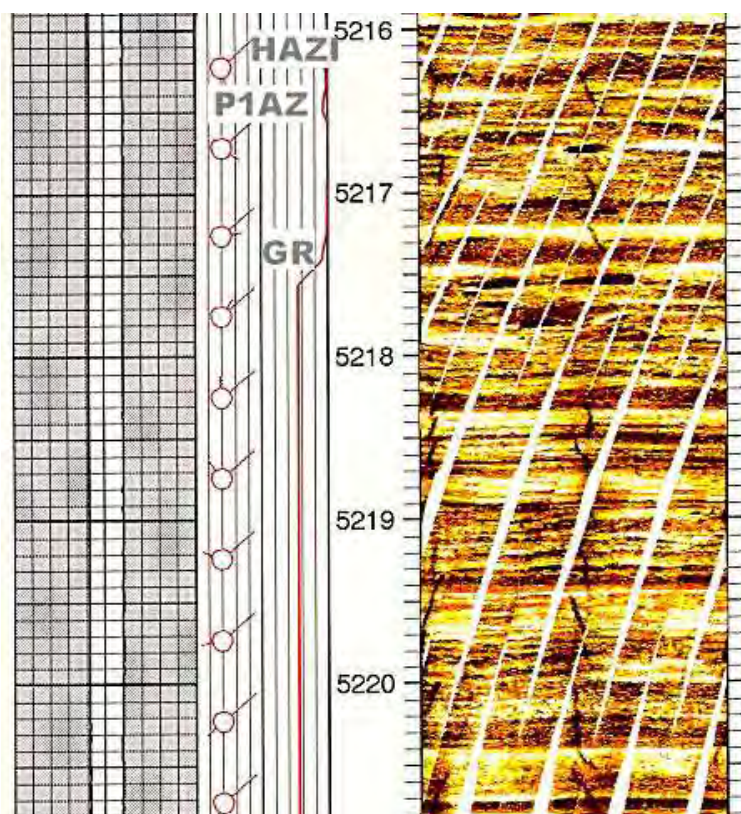


Abbildung 3: Beispiel für nichtvertikale, en echelon förmige Risse im FMS-Image der Bohrung VKRN Z1 in einer Messteufe von 5201 bis 5221 m (aus Bücken & GMI 2002)

4.1.3 Centerline Fractures

Bei den "Centerline Fractures" handelt es sich um bohrtechnisch induzierte Bruchstrukturen in den Bohrkernen. Der "Centerline Fracture" ist eine nahezu vertikale Struktur und teilt den Bohrkern in zwei mehr oder minder gleich große Hälften. Der Riss streicht in Richtung der maximalen Horizontalspannung (S_H). Ein "Centerline Fracture" beginnt als flach in den Bohrkern einfallender "Petal Fracture", der sich zum Kerninneren immer stärker versteilt (Abbildung 4). Diese Strukturen wurden in den MWX (Multiwell-Experiment) Bohrungen von LORENTZ et al. (1990) beschrieben und treten auch in den Bohrungen Urach verbreitet auf, die hier von NETH & DIETRICH (1983) beschrieben sind. In der KTB-VB (KTB-Vorbohrung) treten "Centerline Fractures" in den Bohrkernen nur auf, wenn gleichzeitig auch bohrtechnisch induzierte Risse in der Bohrlochwand vorhanden sind. Dieser Zusammenhang kann bei anderen Bohrungen ebenfalls vorhanden sein. Er ist aber nicht zwingend. Die "Centerline Fractures", die in den Bohrungen Urach und Soultz auftreten, geben ebenfalls einen Hinweis auf eine starke Horizontalspannungsanisotropie.

schematische Darstellung eines Petal Fractures nach EVANS (1980)

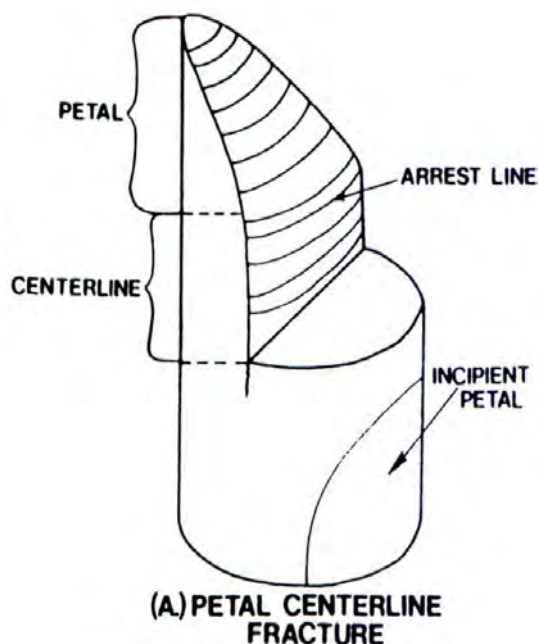


Abbildung 4: links: Schemazeichnung eines Petal-Centerline-Fractures der in einen Centerline-Fracture übergeht (nach EVANS 1980)
rechts: Bohrkern mit einem Centerline Fracture (Bohrung: Ahausen Z1, Vulkanit, Teufe: 4794,73 m, Länge: 31 cm, Kiste: 49, aus WOLTER 1996)

Aus der Orientierung der Umbiegepunkte der Petal Fractures ergibt sich die Richtung von S_h . Centerline Fractures sind in den Bohrungen im Norddeutschen Becken weit verbreitet und treten zum Beispiel in den Bohrungen Loissin, Pudagla, Salzwedel, Roxförde, Rügen und Eldena 1/74 auf.

Auch aus der Bohrung Ahausen Z1 beschreibt WOLTER (1996) in den Vulkaniten des Rotliegenden aus einer Teufe von 4794,73 m einen Centerline Fracture. Dieser wurde jedoch nicht richtungsmäßig ausgewertet.

4.1.4 Core Disking

Core Disking ist in einer Reihe von Kristallinbohrungen beschrieben und gilt im Bergbau als Indikator für hohe Gebirgsspannungen. Beim Core Disking fällt auf, dass die Core Disking Scheiben zum Teil außerordentlich regelmäßig ausgebildet sind. Die Höhe dieser Scheiben beträgt häufig ein Drittel bis ein Viertel des Scheibendurchmessers (Abbildung 1). Charakteristisch für Core Disking Scheiben ist, dass sie eine konkave Oberseite und eine konvexe Unterseite zeigen. Die Oberseite besitzt zwei morphologische Hochpunkte, die in Richtung der minimalen Horizontalspannung (S_h) orientiert, sind und eine Tiefachse, die in Richtung der maximalen Horizontalspannung (S_H) verläuft. Core Disking ist auch in spröden Sedimentgesteinsfolgen ein häufig zu beobachtendes Phänomen. Weiche und wenig spröde Sedimente zeigen kein Core Disking.

Der Zusammenhang zwischen Spannungsrichtungen und der Geometrie dieser Bruchstrukturen ist in Abbildung 1 zu sehen. In Rotliegendesandsteinen wurde gelegentlich Core Disking beobachtet (Bohrung Salzwedel SW 2). Aus dem Bereich Völkersen sind keine Informationen über Core Disking bekannt.



5 Ergebnisse der Spannungsauswertungen

5.1 Spannungsrichtungen im Deckgebirge

Bei den Auswertungen der Bohrungen Wittorf Z1 und Preyersmühle Süd Z1 gibt es nur Hinweise für eine sehr geringe Anisotropie der Horizontalspannungen. Eine sichere Orientierung der Spannungsrichtungen konnte aus diesen Daten nicht abgeleitet werden.

Spannungsrichtungen aus dem Deckgebirge oberhalb des Salzes wurden von GMI (2002) ausgewertet. Hierbei kommen sie zu dem Ergebnis, dass in zwei vertikalen Bohrungen die maximale Horizontalspannung E-W orientiert ist. In einer abgelenkten Bohrung, oberhalb des Salzes ist die beobachtete Breakout-Richtung ebenfalls konsistent mit einer E-W-Orientierung der maximalen Horizontalspannung (GMI 2002, S. 1).

Für die Bohrung VKRN Z1 wird die Richtung der maximalen Horizontalspannung oberhalb des Salzes mit $N89^\circ \pm 5^\circ$ angegeben. In der Bohrung VKRN Z5 ist im Teufenbereich von 3000 bis 3529 m eine Kalibererweiterung in N-S vorhanden. Hieraus kann ebenfalls eine E-W-Orientierung von S_H abgeleitet werden. Die Bohrung hat hier eine Neigung von 3° bis 6° und es wurden Tonsteine (shale sequence with an anhydrite layer) erbohrt.

In der Bohrung VKRN Z2 wurden im Teufenbereich von 1950 m bis 2450 m (MD) Breakouts mit einer Orientierung von $N176^\circ + 3^\circ$ festgestellt. Das Bohrloch hat hier eine Neigung bis zu 40° . Nach den von GMI (2002) durchgeführten Analysen ist die in der Bohrung VKRN Z2 ermittelte Spannungsrichtung in Übereinstimmung mit der in der Bohrung VKRN Z1 ermittelten Richtung. Für den Bereich Völkersen ergibt sich für S_H eine Richtung von E-W.



Vergleich mit Literaturdaten im Deckgebirge

Im Suprasalinar (Deckgebirge) sind die Richtungen und Beträge der Spannungen oft sehr uneinheitlich entwickelt. Auf engem Raum kommt es hier zu starken Änderungen in den Spannungsrichtungen (RÖCKEL & LEMPP 2003).

Die Spannungsdaten aus dem Suprasalinar sind häufig aus seichten Teufen - allerdings wurde der Buntsandstein auch in einigen 1000 m Tiefe aufgeschlossen. Während die meisten Spannungsdaten aus dem Subsalinar aus tiefen Bohrungen stammen, sind nur relativ wenige Daten zu Spannungsrichtungen aus dem Suprasalinar aus oberflächennahen Bohrungen, Bergwerken und Tunneln verfügbar.

Tabelle 1: Richtung der maximalen Horizontalspannung im Suprasalinar

Ort	Richtung S_H	Literaturstelle
Kaltenohmfeld	N040°	BANKWITZ et al. 1993
Kehmstedt	N130°	BANKWITZ et al. 1993
Wallhausen	N085°	BANKWITZ et al. 1993
Niederröblingen	N055°	BANKWITZ et al. 1993
Oberheldrungen	N035°	BANKWITZ et al. 1993
Reinsdorf	N105°	BANKWITZ et al. 1993
Escherberg	N166° $\pm$ 43°	RUMMEL & BAUMGÄRTNER (1982)
Eichenberg	N108° $\pm$ 5°	RUMMEL & BAUMGÄRTNER (1982)
Eldagsen	N135° $\pm$ 12°	BAUMANN (1982)
Adlersberg	N101° $\pm$ 18°	RUMMEL & BAUMGÄRTNER (1982)
Peckensen	N109°	ROTH et. al. 1998
Mellin	N090°	ROTH et. al. 1998
MAH	N090°	ROTH et. al. 1998
Mittelplate	N95	WOLTER & BERNERS (2000)

Einige Daten sind aus einer Zusammenfassung älterer Daten bei BECKER & PALADINE (1990) entnommen. Hier werden Daten von RUMMEL & BAUMGÄRTNER (1982), BAUMANN (1982) und KNOLL (1979) aufgeführt. Neuere Daten finden sich bei ROTH et al. (1998). Einige Daten südlich bzw. südwestlich des Harzes finden sich bei BANKWITZ et al. (1993). Nicht alle diese Daten sind in der WORLD STRESS MAP verzeichnet. Eine Zusammenfassung zu den Spannungsrichtungen ist der Tabelle 1 zu entnehmen.

Insgesamt ergibt sich aus diesen Daten, dass die Spannungsrichtungen im Deckgebirge nicht einheitlich sind. Am ehesten lassen sich die Streichrichtungen für S_H als E-W gerichtet bzw. als flachherzynisch (WNW-ESE) mit Abweichungen nach Norden und Süden beschreiben.

In Abbildung 5 sind die Ergebnisse der Spannungsrichtungen im Suprasalinar dargestellt. Der Mittelwert der betrachteten Lokationen ergibt eine Streichrichtung für S_H von etwa 100° (ESE-WNW). „Flachherzynische Richtungen“ und E-W Richtungen überwiegen.

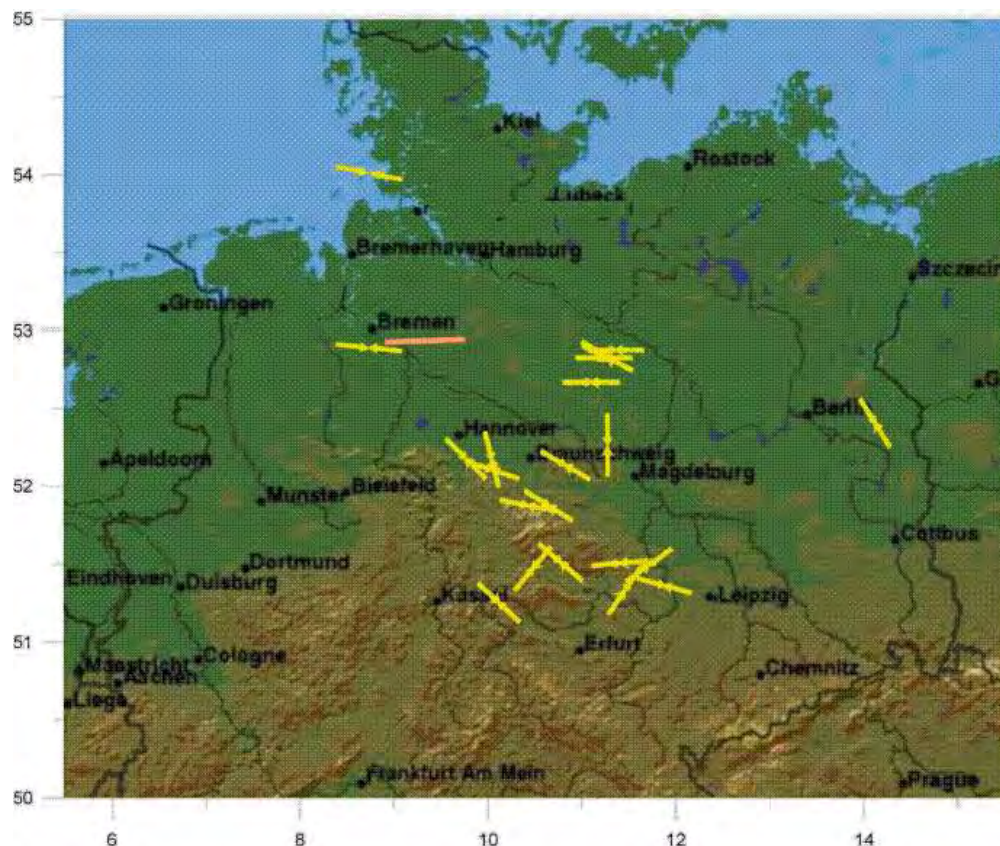


Abbildung 5: Spannungsrichtungen im Deckgebirge im Norddeutschen Becken (nach RÖCKEL & LEMPP 2003). Zusätzlich wurden jüngere Daten in diese Abbildung mit einbezogen. Die Daten aus dem Bereich Völkersen sind in Orange mit eingezeichnet.

Aufgrund der Datenlage ergibt sich, dass zumindest bereichsweise eine gewisse Anisotropie in den Horizontalspannungen vorhanden ist.

Die Spannungsrichtungen im Deckgebirge variieren relativ stark und werden vermutlich markant durch Salzstrukturen beeinflusst.

5.2 Spannungsrichtungen im Salz

Für das Salz werden im Allgemeinen lithostatische Spannungszustände angenommen. Bei größeren Salzmächtigkeiten und bei größeren Tiefen wird davon ausgegangen, dass das Salz wegen seiner plastischen Eigenschaften keine Differenzspannungen aufnehmen kann. In diesem Fall gibt es keine bevorzugte Spannungsrichtung.

5.3 Spannungsrichtungen im Reservoirbereich

Die Spannungsrichtungen im Rotliegenden sind für das Norddeutsche Becken gut bekannt. Für den Bereich Völkersen liegen zusätzlich zu den veröffentlichten Werten aus der Literatur weitere Messungen vor. Diese sind bei BÜCKER & GMI (2002) und bei WOLTER (1996) zusammengestellt.

Von den im Abschnitt 5.1 dargestellten Bohrkern- und Bohrlochinstabilitäten wurden im Bereich Völkersen Bohrlochrandausbrüche und bohrtechnisch induzierte Risse ausgewertet (BÜCKER & GMI 2002, LINGAU 2007). Bei Wolter (1996) ist auch ein Bohrkern mit Centerline-Fractures abgebildet. Diese wurden jedoch richtungsmäßig nicht ausgewertet.

Tabelle 2a: Spannungsrichtungen in der Bohrung Ahausen Z 1 (nach WOLTER 1996)

Bohrung Ahausen Z1 Probe	Teufe [TVD m]	SH [°]
All		
A12		
A47		
A35		
A36		
A36a		

Tabelle 2b: Spannungsrichtungen in der Bohrung Hemsbünde Z5 (nach WOLTER 1996)

Bohrung Hemsbünde Z5 Probe	Teufe [TVD m]	SH [°]
H23		
H11		
H12		
H47		
H48		
H35		

Tabelle 2c: Spannungsrichtungen in der Bohrung Stapel Z1 (nach WOLTER 1996)

Bohrung Stapel Z1 Probe	Teufe [TVD m]	SH [°]
S11		
S12		
S23		
S24		
S35		
S36		

Aus 15 Bohrkerndaten aus den Bohrungen Ahausen Z1, Hemsbünde Z5 und Stapel Z1 ergibt sich die Richtung der maximalen Horizontalspannung (Tabelle 2a bis 2c) zu $N175^\circ \pm 14^\circ$, welche in Abbildung 6 als Rosendiagramm dargestellt ist.

Ahausen liegt etwa 8 km NE von Völkersen. Hemsbünde befindet sich etwa 18 km ENE von Völkersen und Stapel ca. 20 km nördlich von Völkersen. Diese Bohrkerndaten decken das weitere Umfeld des eigentlichen Untersuchungsgebietes um Völkersen ab.



Abbildung 6: Richtung der maximalen Spannungsrichtungen (S_H) abgeleitet aus Bohrkernmessungen der Bohrungen Ahausen Z1, Hemsbünde Z 5 und Stapel Z1 (WOLTER 1996).

FMS bzw. FMI Logs wurden von GMI (2002) für die Bohrungen VKRN Z1, VKRN Z2 und VKRN Z3 ausgewertet. In diesen Bohrungen sind bohrtechnisch induzierte Risse in den Bohrungen nachzuweisen (siehe Abbildung 2). Insbesondere in der Bohrung VKRN Z1 sind die Spannungsrichtungen von Bedeutung, da hier die Neigung der Bohrung generell unter 3° lag. Somit ist eine Beeinflussung der Rissorientierung vom Bohrfad auszuschließen. Die Richtung der maximalen Horizontalspannung liegt in dieser Bohrung überwiegend bei N-S (Tabelle 3). In der Bohrung VKRN Z2 wurden keine bohrtechnisch induzierten Risse festgestellt. In der Bohrung VKRN Z3 wurden in einer Teufe von 4871 m (MD) schwache Indikatoren für bohrtechnisch induzierte Risse festgestellt. Im Teufenbereich von 4902 bis 4905 m sind diese Strukturen deutlich zu erkennen. Die Neigung in diesen Bereichen lag zwischen 30° und 29° . Die Richtung der maximalen Horizontalspannung wird von GMI (2002) für diese Bereiche mit jeweils $N160^\circ$ angegeben.

Tabelle 3a: Spannungsrichtungen in den Bohrungen VKRN Z1, VKRN Z2 und VKRN Z3
(nach GMI 2002)

Bohrung	Messteufe [m]	S_H [°]	Bemerkungen	Neigung [°]	Bohrungsazimuth [°]
VKRN Z1	4872-4880	180	good	< 3	
VKRN Z1	5137-5142	190	fair, en echelon	< 3	
VKRN Z1	5159	180	fair, en echelon	< 3	
VKRN Z1	5163-5164	180	fair	< 3	
VKRN Z1	5171	180	fair	< 3	
VKRN Z1	5179	190	fair	< 3	
VKRN Z1	5201-5220	180	fair, en echelon	< 3	
VKRN Z2	-	-	keine Risse	30-40	5-10
VKRN Z3	4871	160	weak	30	104
VKRN Z3	4902-4905	160	fair	29	106

Im Mittel ergibt sich die Richtung von S_H für die in Tabelle 3a dargestellten Daten zu N177,8°. In den 10 ausgewerteten Bohrungen (Breakouts) variieren die Spannungsrichtungen bis zu 30°. Zusätzlich wurden von BÜCKER & STRÖBEL (2003) FMS und Bohrkernmessungen ausgewertet. Für alle Messwerte kommen sie zu einem Mittelwert von N351°±12°. Die einzelnen Bohrungen können jedoch nicht genau identifiziert werden. Die ungefähre Lage, die Spannungsrichtungen und die Abweichungen sind der Abbildung 7a zu entnehmen.

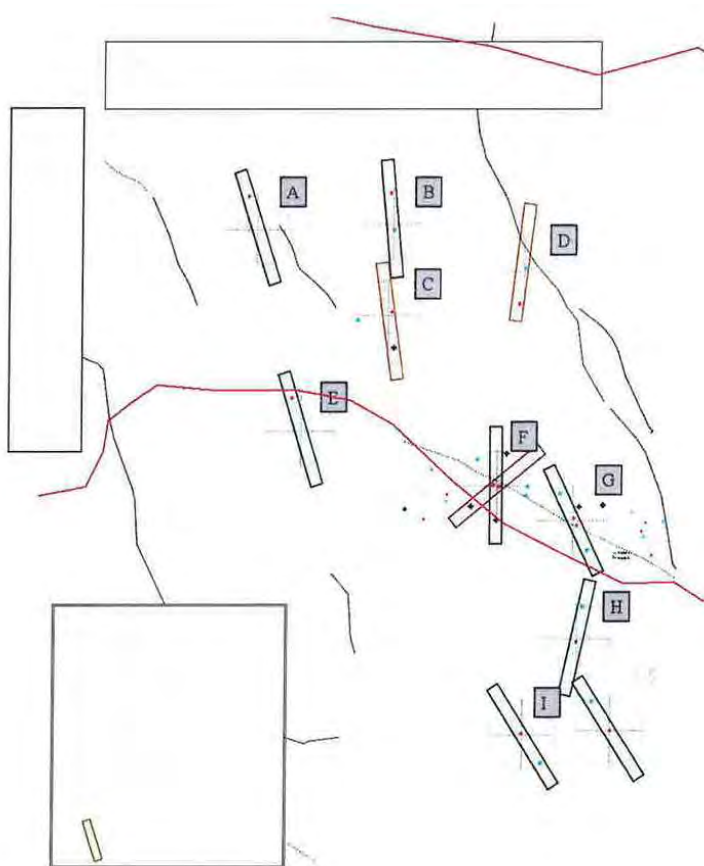


Abbildung 7a: Orientierung der maximalen Horizontalspannung der von BÜCKER & STRÖBEL (2003) ausgewerteten Bohrungen im Bereich des Feldes Völkersen.



LINGNAU (2007) hat die Strukturdaten aus dem Feld Völkersen zusammenfassend dargestellt. Hierbei wurden auch die verfügbaren FMI und FMI Daten aus 15 Bohrungen hinsichtlich der Spannungsrichtungen ausgewertet.

Tabelle 3b: Spannungsrichtungen für Bohrungen im Bereich des Feldes Völkersen
(nach LINGNAU 2007)

Bohrung	Orientierung der bohrtechnisch induzierte Risse [°]	Orientierung der Bohrlochrandausbrüche [°]	Durchschnittliche Richtung von S_H [°]
VKRN Z.1	332	73	157,5
VKRN Z2.3	348	85	171,5
VKRN Z3	338	-	158,0
VKRN Z4.2	29	-	209,0
VKRN Z5	29	-	209,0
VKRN Z6.2	333	76	159,5
VKRN Z8	349	-	169,0
VK-N Z1	-	89	179,0
VK-N Z2	6	79	182,5
VK-N Z3	352	98	180,0
VK-N Z4	-	106	196,0
VK-N Z5	322	88	160,0
LDHP Z1	342	92	172,0
LDHP Z1a	325	70	152,5
VD-O Z1	337	48	147,5

Somit ergibt sich für den Bereich Völkersen bei den Spannungsrichtungen ein relativ einheitliches Bild unabhängig davon, ob es aus Bohrkernmessungen oder aus Bohrlochmessungen ermittelt wurde. Die Richtung der maximalen Horizontalspannung liegt im Reservoir bei etwa N170° bis N180° mit leichten Abweichungen nach Osten und Westen.

Bei RÖCKEL & LEMPP (2003) und CORNET & RÖCKEL (2012) sind die Spannungsrichtungen im weiteren Rahmen für das subsalinar des Norddeutschen Beckens zusammengestellt.

Bei den Spannungsrichtungen im Subsalinar ergibt sich ein eindeutiges Bild. Im Westen (niederländischen Grenze) ist die Richtung der maximalen Richtung NNW-SSE bis NW-SE orientiert. Im zentralen Teil des Norddeutschen Beckens herrscht die N-S-Richtung vor. Nach Osten bis zur polnischen Grenze dreht die Richtung der maximalen Horizontalspannung stärker nach NNE-SSW bis N-S ein (Abbildung 8).

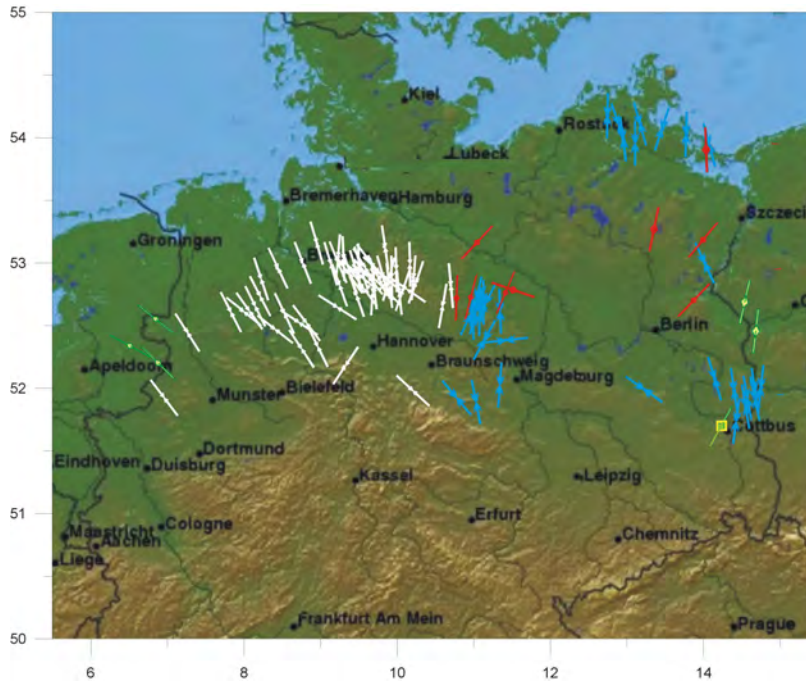


Abbildung 8: Richtung der maximalen Spannungsrichtungen (S_H) abgeleitet aus Bohrkernmessungen. Daten von GROTE (1998) sind als weiße Pfeile dargestellt. Die Daten von ROTH & FLECKENSTEIN (2001) sind in Rot dargestellt, die Daten von RÖCKEL & LEMPP (2003) in Blau. Spannungsindikatoren aus der WSM an der niederländischen und polnischen Grenze sind in Grün dargestellt.

5.4 Spannungsrichtungen aus Herdflächenlösungen

Im Norddeutschen Becken fanden neben dem Beben von Soltau (1977) in den letzten Jahrzehnten nur wenige seismische Ereignisse statt, für die Herdflächenlösungen bekannt sind. Es handelt sich um die Beben von Wittenburg (19.5.2000), Rostock (21.7.2001) und Rotenburg (20.10.2004).

Rotenburg

Das stärkste Beben in Norddeutschland seit Beginn der instrumentellen Aufzeichnung vor über 100 Jahren erschütterte am 20. Oktober 2004 um 6:59 UT die Region um Rotenburg und Soltau. Das Beben hatte eine Stärke von $ML=4,5$ und war im Umkreis von 70 km spürbar. Das letzte vergleichbare wenn auch etwas schwächere Beben ($ML=4.0$) fand am 2. Juni 1977 bei Soltau statt. Eine genaue Bestimmung der Herdtiefe ist für das Beben von 2004 auf Grund der fehlenden Stationen im Epizentralgebiet schwierig. Die makroseismischen Beobachtungen deuten auf eine Herdtiefe von ca. 12 km hin, wohingegen die Modellierung der gemessenen Seismogramme mit synthetischen Wellenformen sowie die Inversion des Herdmechanismus für eine Herdtiefe zwischen 6 und 10 km sprechen.

Die Herdtiefe ist für dieses Ereignis von besonderer Bedeutung, da sich das Epizentrum im Bereich von im Betrieb befindlichen Gasförderfeldern befindet und damit ein Zusammenhang des Bebens mit der industriellen Förderung nicht ausgeschlossen werden kann. Inversionsrechnungen zur Herdmechanik zeigen einen Abschiebungsmechanismus an einer NNW-SSE orientierten Herdfläche und eine nordwärts gerichtete, unilaterale Bruchausbreitung an (DAHME et al., 2007).

Tabelle 4: Herdmechanismus des Bebens bei Rotenburg. Vergleich der Lösungen des SZGRF mit der Lösung der ETH Zürich.

	Streichen (°)		Einfallen (°)		Rake (°)	
	SZGRF	ETHZ	SZGRF	ETHZ	SZGRF	ETHZ
Herdfläche 1	204	340	38	65	-36	-123
Herdfläche 2	324	217	69	41	-123	-41
	P-Achse Streichen/Einfall (°)		B-Achse Streichen/Einfall (°)		T-Achse Streichen/Einfall (°)	
	202/53	205/57	336/26	356/30	73/12	94/13

Die T-Achse mit einer Streichrichtung von 74° (Tabelle 4, Abbildung 9) zeigt eine Dehnung in E-W-Richtung an. Die Richtung der maximalen Horizontalspannung ist orthogonal zur Dehnung orientiert und somit etwa $N164^\circ$ gerichtet.

Die Herdflächenlösung zeigt, dass die

Richtung der maximalen Horizontalspannung N-S bis NNW-SSE orientiert ist.

Die Richtung der maximalen Horizontalspannung abgeleitet aus den Herdflächenlösungen stimmt somit sehr gut mit der Orientierung der horizontalen Hauptspannung überein, die sich aus der Auswertung der Bohrlochdaten ergibt.

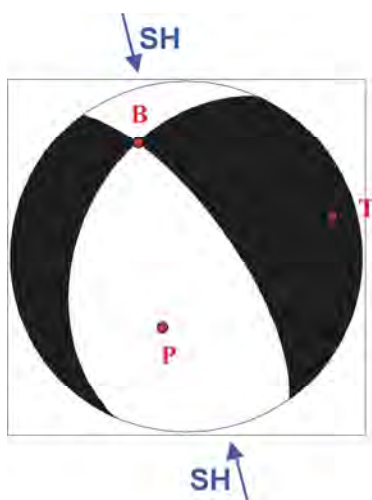


Abbildung 9: Vergleich der Herdflächenlösung mit der Richtung der maximalen Horizontalspannung der umgebenden Tiefbohrungen (blaue Pfeile)

Im Bereich Völkersen sind im Bericht des LBEG/BGR (BISCHOFF et al. 2013) einige Beben verzeichnet (Tabelle 5). Zusätzlich findet sich eine Darstellung mit den Herdflächenlösungen der Beben aus dem Bereich Völkersen (Abbildung 10).

Tabelle 5: Herdparameter der Erdbeben in den Jahren 2008, 2010, 2011 und 2012 am Erdgasfeld Völkersen

Datum / Zeit	Breite [°Nord]	Länge [°Ost]	Herdtiefe [km]	Magnitude ML	Intensität I ₀	Bezeichnung I ₀
20080403 00:06:18.89	52,989	9,165	5 - 10	2,8	V	Langwedel
20100424 14:10:50.46	52,983	9,255	-	1,9	-	-
20110502 02:57:21.14	52,93	9,287	4 ± 5	2,5	IV-V	Verden
20121122 21:38:11.06	52,97	9,212	4,9 ± 1,6	2,9	V	Völkersen

Bei den Herdflächenlösungen der Beben von Langwedel und Völkersen fällt auf, dass es sich um nahezu reine Abschiebungsbeben handelt. Die Verschiebungsflächen sind WNW-ESE gerichtet und weichen somit von der maximalen Horizontalspannungsrichtung ab. BISCHOFF et al. (2013) weisen jedoch darauf hin, dass der ermittelte Herdmechanismus zum gegenwärtigen Zeitpunkt nur als vorläufiges Ergebnis anzusehen ist.

„Allerdings sind Abweichungen in der Streichrichtung und im Fallen der Nodalflächen nicht auszuschließen. Beispielsweise erhielten CESCA et al. (persönliche Mitteilung an BISCHOFF et al.) in einer Studie zum Herdmechanismus des Völkersen-Bebens auf der Grundlage einer vollen Wellenforminversion im Spektralbereich ebenfalls eine nahezu reine Abschiebung mit allerdings eher N-S streichenden Nodalflächen (BISCHOFF et al. 2013)“.

Dies wäre mit der Orientierung der Spannungsrichtungen leichter in Einklang zu bringen. Da die Beben aber bevorzugt an Störungszonen stattfinden sollten, ist vom geologischen Befund auch die WNW-OSO-Orientierung plausibel.

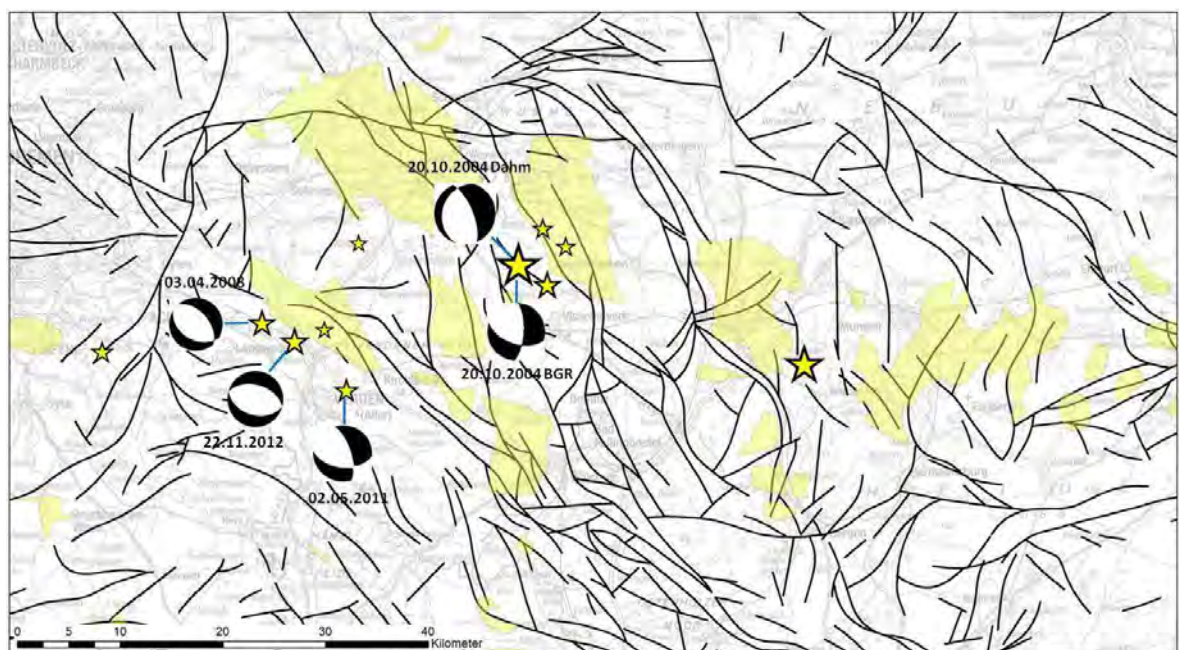


Abbildung 10: Zusammenstellung der bisher bestimmten Herdmechanismen und Störungszonen im Umfeld der Erdgasfelder (aus BISCHOFF et al. 2013). Die Störungen (schwarze Linien) beziehen sich auf die Basis des Zechsteins nach Angabe aus dem Geotektonischen Atlas von Nordwest-Deutschland (BALDSCHUHN et al, 2001). Gelb sind Erdgasfördergebiete dargestellt.

6 Spannungsbeträge

Prinzipiell ist es wünschenswert alle Beträge der Hauptspannungen zu bestimmen. Hierfür stehen verschiedene Messmethoden zur Verfügung. In Tiefbohrungen sind diese Methoden in der Regel kaum noch einsetzbar. In größeren Tiefen können nur die Beträge der Vertikalspannung und der minimalen Horizontalspannung relativ zuverlässig bestimmt werden. In der Felsmechanik ist als Druckeinheit die Einheit MPa oder MN/m^2 gebräuchlich. Ein MPa bzw. ein MN/m^2 entsprechen 10 bar. Im Text wurde in der Regel die in der Öl- und Gasindustrie gebräuchliche Einheit bar verwendet oder der Einheit MPa gegenübergestellt. Bei den Abbildungen wurde meist die wissenschaftlich verbreitete Bezeichnung MPa verwendet.

6.1 Vertikalspannung

Die Vertikalspannung der Verpressbohrung Wittorf Z1 wurde in einem vorhergehenden Bericht für den Bereich des Kalkarenits ausgewertet (RÖCKEL & PIEWAK 2010). Die Vertikalspannung wurde aus dem Gewicht des überlagernden Gebirges berechnet. Die mittlere Dichte der Gesteine im Bereich der Bohrung Wittorf Z1 kann aus Bohrlochmessungen und den Cuttings des erbohrten Gesteins bestimmt werden. Die mittlere Dichte im Tertiär liegt zwischen $2,13 \text{ g/cm}^3$ und $2,15 \text{ g/cm}^3$, in der Oberkreide bei $2,30 \text{ g/cm}^3$. Die Tertiärbasis in der Bohrung Wittorf Z1 steht bei 935 m u. GOK an. Als Bezugsteufe für den Verpresshorizont wird der Kalkarenit in 1070 m Tiefe angesehen.

Unter der Annahme, dass sich die Vertikalspannung aus der mittleren Dichte des überlagernden Gesteins ergibt, wurde für eine Teufe von 1070 m (Injektionstiefe) eine Vertikalspannung von 22,68 MPa (226,8 bar) errechnet. Dies entspricht einem Vertikalspannungsgradienten von 21,19 MPa/km.

WOLTER (1996) hat eine Reihe von Bohrkernen aus dem Bereich Nord-Hannover ausgewertet. Er hat hierbei die Dichtedaten der Bohrungen Ahausen Z1, Hemsbünde Z5 und Stapel Z1 zur Berechnung der Vertikalspannungen verwendet.

Die Vertikalspannung wurde aus den Dichtedaten errechnet und der Auflast gleichgesetzt.

Ahausen Z1

Die integrierte Dichte des Hangenden beträgt g/cm^3 . Für die verschiedenen Proben sind die Daten in Tabelle 6a zusammengestellt.

Tabelle 6a: Vertikalspannung in der Bohrung Ahausen Z1 (nach WOLTER 1996)

Bohrung Ahausen Z1 Probe	Teufe [TVD m]	SV [bar]	SV [MPa]
All			
A12			
A47			
A35			
A36			
A36a			

Der Dichtewert von g/cm^3 ergab sich als Integralwert aus den Dichten der Gesteine, die im geologischen Profil beschrieben sind. Aus dem Wert g/cm^3 resultiert für die Vertikalspannung ein Gradient von bar/m bzw. MPa/km .

Hemsbünde Z5

Die integrierte Dichte des Hangenden beträgt g/cm^3 . Hieraus errechnet sich ein Vertikalspannungsgradient von bar/m bzw. MPa/km . Für die verschiedenen Proben sind die Daten in Tabelle 6b zusammengestellt.

Tabelle 6b: Vertikalspannung in der Bohrung Hemsbünde Z5 (nach WOLTER 1996)

Bohrung Hemsbünde Z5 Probe	Teufe [TVD m]	SV [bar]	SV [MPa]
H23			
H11			
H12			
H47			
H48			
H35			

Stapel Z1

Die integrierte Dichte des Hangenden beträgt g/cm^3 . Hieraus errechnet sich ein Vertikalspannungsgradient von bar/m bzw. MPa/km . Für die verschiedenen Proben sind die Daten in Tabelle 7c zusammengestellt.

Tabelle 6c: Vertikalspannung in der Bohrung Stapel Z1 (nach WOLTER 1996)

Bohrung Stapel Z1 Probe	Teufe [TVD m]	SV [bar]	SV [MPa]
S11			
S12			
S23			
S24			
S35			
S36			

Nach der Studie von BÜCKER & GMI (2002) liegt die Vertikalspannung in der Endtiefe der Bohrungen zwischen [] und [] m bei [] und [] bar ([] und [] MPa).

Tabelle 6d: Integrierte Dichtewerte und Vertikalspannung für die Endtiefe der Bohrungen im Bereich Völkersen

Bohrung	TVD [m]	Mittlere Dichte [g/cm ³]	SV [bar]	Sv-Gradient [bar/m]	Sv-Gradient [MPa/km]
VK-N Z1	[]	2,260	1125,8	0,2217	22,17
VK-N Z2	[]	2,157	1088,4	0,2116	21,16
VK-N Z3	[]	2,216	1124,6	0,2174	21,74
VK-N Z4	[]	2,212	1093,6	0,2170	21,70
VKRN-Z1	[]	2,372	1208,2	0,2327	23,27
VKRN-Z2	[]	2,324	1151,9	0,2280	22,80
VKRN-Z5	[]	2,210	1083,0	0,2168	21,68

Die durchschnittlichen Dichten für die gesamten Bohrungen liegen im Mittel zwischen 2,157 und 2,372 g/cm³. Die entsprechenden Vertikalspannungsgradienten liegen für diese Dichtewerte zwischen 0,2116 und 0,2327 bar/m bzw. 21,16 und 23,27 MPa/km (Abbildung 11). Diese relativ niedrigen Dichten sind auf Grund der hohen Tertiär- und Salzmächtigkeiten erklärbar.

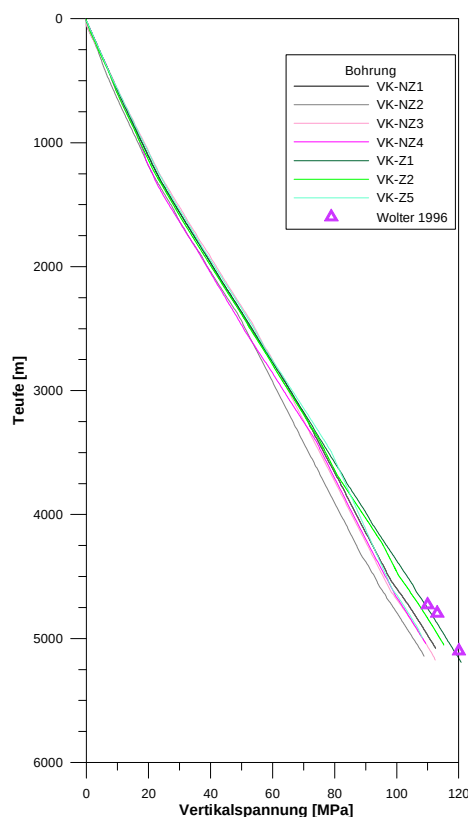


Abbildung 11: Vertikalspannung in Abhängigkeit von der Tiefe, ermittelt aus Lithodensity-Daten (GMI 2002). Als violette Dreiecke sind die Vertikalspannungen für die Bohrungen Ahausen Z1, Hemsbünde Z5 und Stapel Z1 nach WOLTER 1996 dargestellt.



Für eine Reihe von weiteren Bohrungen wurden aktuell Daten (Dichtedaten) durch die RWE Dea AG zur Verfügung gestellt. Aus diesen wurden die Vertikalspannungen und Vertikalspannungsgradienten für eine Reihe von Bohrungen errechnet. Diese sind in Tabelle 6e zusammengestellt.

Bei der Bohrung VKRN Z3 fehlen die Dichtedaten bis zu einer Teufe von 1306 m. Die Werte im Tertiär bis zur Oberkreide wurden mit Werten von benachbarten Bohrungen ergänzt. Im Teufenbereich von 4235 bis 4538 m fehlen die Dichtewerte aus dem Unteren Buntsandstein (Bernburg- und Calförde-Folge). Aus den vorhandenen Dichtewerten der Bernburg- und Calförde Folge wurden Mittelwerte errechnet. Die fehlenden Werte wurden mit diesen Werten ergänzt. Die Vertikalspannung berechnet sich für die Bezugsteufe (TVD) von 4800 m zu 1099,5 bar (109,95 MPa) und der mittlere Vertikalspannungsgradient zu 0,2291 bar/m (22,91 MPa/km).

Für die Bohrung VKRN Z4 liegen fast über die gesamte Bohrteufe (58,37 bis 5190,13 m) Dichtedaten vor. Die Endteufe der Bohrung liegt bei 5200 m (MD), welche einer Teufe von 4960,4 m TVD entspricht. Die mittlere Dichte für alle Messwerte liegt bei $2,4137 \text{ g/cm}^3$. Für die maximale Teufe von 4960,40 m berechnet sich die Vertikalspannung zu 1174,5 bar bzw. 117,45 MPa und der Gradient der Vertikalspannung zu 0,2368 bar/m bzw. 23,68 MPa/km. Für eine Bezugssteufe von 4800 m berechnet sich die Vertikalspannung zu 1136,6 bar bzw. 113,66 MPa.

Die Bohrung VKRN Z6 erreichte die Endteufe bei 5648,5 m (5460,5 m TVD). Im Teufenbereich von 1105,05 bis 1380,59 m fehlen die entsprechenden Dichtedaten. Da in der Bohrung VKRN Z4 in der entsprechenden Messteufe Dichtedaten für die Schichtenfolge aus dem Untereozän bis zur Oberkreide in nahezu der gleichen Teufenlage vorliegen, wurden diese für die Bohrung VKRN Z6 übernommen. Die mittlere Dichte für alle Messwerte liegt bei $2,3793 \text{ g/cm}^3$. Für eine Teufe von 5460,50 m berechnen sich die Vertikalspannung zu 1274,5 bar (127,45 MPa) und der Gradient der Vertikalspannung zu 0,2334 bar/m (23,34 MPa/km). Für eine Bezugsteufe von 4800 m liegt die Vertikalspannung bei 1120,4 bar bzw. 112,04 MPa.



Die Bohrung VKRN Z9 hat eine Endteufe von 5065,50 m. Bei einem Teufenverlust von 155,04 m beträgt die vertikale Tiefe 4910,46 m. Dichtewerte liegen bis zu einer Messtiefe von 5056,17 m vor. Im Teufenbereich von 4977 bis 5056,17 m fehlen Dichtedaten aus der Werra-Serie des Zechsteins und Dichte-Werte aus der Elbe-Subgruppe des Rotliegenden. Hierzu wurden die Dichtewerte aus der Bohrung VKRN Z4 übernommen. Bis zu einer Messtiefe von 4769 m beträgt die durchschnittliche Gesteinsdichte $2,4249 \text{ g/cm}^3$. Mit den ergänzten Werten errechnet sich die Vertikalspannung in der Bezugstiefe von 4800 m zu 1148,2 bar bzw. 114,82 MPa.

Tabelle 6e: Integrierte Dichtewerte und Vertikalspannung für die Endtiefe der Bohrungen (Teufe in TVD)

Bohrung	TVD [m]	mittlere Dichte [g/cm ³]	Sv [bar]	Sv [MPa]	Sv-Gradient [bar/m]	Sv-Gradient [MPa/km]
VKRN Z3	4800	2,3354	1099,5	109,95	0,2291	22,91
VKRN Z4	4800	2,4137	1136,6	113,66	0,2368	23,68
VKRN Z6	4800	2,3793	1120,4	112,04	0,2334	23,34
VKRN Z9	4800	2,4383	1148,2	114,82	0,2392	23,92

6.2 Bestimmung der Spannungsbeträge der minimalen Horizontalspannung

Überschreitet in einer Bohrung der Flüssigkeitsdruck die minimale Tangentialspannung an der Bohrlochwand und den Betrag der kleinsten Gebirgsspannung (sowie die Zugfestigkeit des Gesteins), dann kommt es zu einem hydraulischen Bruch der Formation und somit zu Flüssigkeitsverlusten (z. B. der Bohrspülung). Die Analyse von Spülungs- und Zementverlusten in Bohrungen kann deshalb zur Abschätzung des Betrags der kleinsten Hauptspannung verwendet werden, unabhängig davon, ob der Flüssigkeitsverlust gewollt (Leak-off-Test, Formation-Integrity-Test oder Frac-Versuch) oder ungewollt (Spülungs- und Zementationsverlust) stattfand.

6.2.1 Deckgebirge

Da im Bereich des Feldes Völkersen eine Reihe von Leak-off-Tests ausgeführt worden sind, wird hier auf die Auswertung von Zementationsdaten und Spülungsverlustdaten verzichtet. In Tabelle 7 ist eine Reihe von Ergebnissen von Spannungsmessungen im Deckgebirge zusammengestellt (BÜCKER & GMI 2002). Hierbei ist ersichtlich, dass z.T. relativ niedrige Gradienten der minimalen Horizontalspannung ($< 0,175$ bar/m) und zum Teil Gradienten über $0,200$ bar/m auftreten.

Tabelle 7: Zusammenfassung der Ergebnisse von Leak-off-Tests aus dem Deckgebirge im Bereich Völkersen (BÜCKER & GMI 2002). *Fracdruck berechnet aus Gradient und Teufe

Bohrung	Formation	Teufe MD/TVD [m]	Fracdruck [bar]*	Gradient [bar/m]
VKRN Z6	Oberkreide	1380	> 230	> 0.167
VKRN Z6	Top Muschelkalk	3590 / 3521	> 725	> 0.206
VKRN Z6	Mittlerer Buntsandstein	4345 / 4255	706	0.166
VKRN Z5	Oberkreide	1376	> 216	> 0.157
VKRN Z5	Top Muschelkalk	3565 / 3565	> 734	> 0.206
VKRN Z5	Top Unterer Buntsandstein	4281 / 4272	734	0.172
VKRN Z5	Werra Anhydrit	4682 / 4664	> 783	> 0.168

Zusätzlich wurden weitere Daten von Leak-off-Tests aus dem Deckgebirge im Rahmen dieser Arbeit durch die RWE Dea AG zur Verfügung gestellt. Diese sind in der Tabelle 8 aufgelistet.

In Abbildung 12 ist die Abhängigkeit der minimalen Horizontalspannung von der Teufe dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die minimale Horizontalspannung unter dem Betrag der Vertikalspannung liegt. Auf Grund der unterschiedlichen Lithologie streuen die Beträge der minimalen Horizontalspannung relativ stark.

Tabelle 8: Zusammenfassung der Ergebnisse von Leak-off-Tests aus dem Deckgebirge im Bereich Völkersen

Bohrung	Formation	MD [m]	TVD [m]	Sh [bar]	Sh Gradient [bar/m]
VKRN Z8	Unterer Buntsandsein	4886	4401	837,57	0.190
VKRN Z5	Unter Keuper	3509	3505	708,31	0.202
VKRN Z5	Mittlerer Buntsandsein	4219	4215	715,34	0.170
VKRN Z5	Mittlerer Buntsandsein	4281	4272	713,00	0.167
VKRN Z5	Mittlerer Buntsandsein	4318	4314	740,61	0.172
VKRN Z6	Mittlerer Buntsandsein	4342	4255	684,00	0.161
VK-N Z4	Mittlerer Muschelkalk	2573	2572	403,70	0.157
VKRN Z6	Maastricht	1389	1389	213,93	0.154
VKRN Z6	Oberer Muschelkalk	3527	3500	707,30	0.202
VKRN Z8	Oberer Muschelkalk	3575	3456	664,51	0.192
VKRN Z5	Zechstein	4629	4616	760,75	0.165
VKRN Z3	Zechstein	4686	4599	803,07	0.175
VK-N Z4	Zechstein	4736	4659	831,83	0.179

6.2.2 Abschätzung des Betrages der minimalen Horizontalspannung im Salinar

Hierfür liegen noch keine aktuellen Daten vor. Für das Norddeutsche Becken kann jedoch davon ausgegangen werden, dass bei größeren Salzmächtigkeiten generell ein annähernd lithostatischer Spannungszustand erreicht wird (RÖCKEL & LEMPP 2003, CORNET & RÖCKEL 2012). In diesem Fall entspricht die Vertikalspannung sowohl dem Betrag der minimalen als auch der maximalen Horizontalspannung).

6.2.3 Ermittlung des Betrages der minimalen Horizontalspannung im Reservoir

Im Bereich der Reservoirs wurden im Bereich Nordhannover eine ganze Reihe von Spannungsmessungen (Minifrac und Leak-off-Tests) ausgeführt. Diese Tests wurden 2013 von der Firma Fenix Consulting Delft neu interpretiert und durch die RWE Dea AG zur Verfügung gestellt.

Diese Daten sind in Tabelle 9 aufgelistet. Insgesamt stehen 58 Messungen zur Verfügung, in denen die minimale Horizontalspannung und der Porendruck gemessen wurden. Somit steht eine ausgezeichnete Datenbasis zur Verfügung, um die minimale Horizontalspannung und deren Abhängigkeit vom Porendruck zu ermitteln. Für den Havelsandstein sind 11 Werte vorhanden, in denen der Porendruck und die minimale Horizontalspannung gemessen wurden. Beim initialen Porendruck von etwa 654 bar (in Referenzteufe 4800 m) liegt jedoch keine Messung der minimalen Horizontalspannung vor.



Tabelle 9: Zusammenfassung der Ergebnisse von Hydraulic-Fracturing Messungen aus dem Rotliegend von Nordhannover. Die Daten sind im Jahr 2013 von FENIX CONSULTING DELFT reevaluiert worden.

Formation	Feld	Bohrung	Porendruck [bar]	S _h [bar]	Porendruck Gradient [bar/m]	S _h Gradient [bar/m]	Perforationsteufe TVD [m]
	Bleckmar	Bleckmar Z1					
	Bleckmar	Bleckmar Z1					
	Bötersen	Bötersen Z1					
	Bötersen	Bötersen Z2					
	Bötersen	Bötersen Z2					
	Bötersen	Bötersen Z3					
	Bötersen	Bötersen Z5					
	Bötersen	Bötersen Z6					
	Bötersen	Bötersen Z7a					
	Bötersen	Bötersen Z8a					
	Bötersen	Bötersen Z10					
	Borchel	Borchel Z1					
	Mulmshorn	Mulmshorn Z1					
	Mulmshorn	Mulmshorn Z2					
	Mulmshorn	Mulmshorn Z3a					
	Mulmshorn	Mulmshorn Z4					
	Mulmshorn	Mulmshorn Z5					
	Hemsbünde	Hemsbünde Z1					
	Hemsbünde	Hemsbünde Z2					
	Hemsbünde	Hemsbünde Z3					
	Hemsbünde	Hemsbünde Z4					
	Hemsbünde	Hemsbünde Z5					
	Hemsbünde	Hemsbünde Z6					
	Höhnsmoor	Höhnsmoor Z1					
	Höhnsmoor	Höhnsmoor Z1					
	Langenhörn	Langenhoern Z1					
	Söhlingen	Söhlingen Z10 1.Frac					
	Söhlingen	Söhlingen Z10 2.Frac					
	Söhlingen	Söhlingen Z10 4.Frac					
	Söhlingen	Söhlingen Z13 1.Frac					
	Söhlingen	Söhlingen Z13 5.Frac					
	Söhlingen	Söhlingen Z14 1.Frac					
	Söhlingen	Söhlingen Z14 2.Frac					
	Söhlingen	Söhlingen Z14 3.Frac					
	Söhlingen	Söhlingen Z14 5.Frac					



Formation	Feld	Bohrung	Porendruck [bar]	S _h [bar]	Porendruck Gradient [bar/m]	S _h Gradient [bar/m]	Perforationsteufe TVD [m]
	Söhlingen	Söhlingen Z14 7.Frac					
	Söhlingen	Söhlingen Z15 - #F1					
	Söhlingen	Söhlingen Z15 - #F2					
	Söhlingen	Söhlingen Z15 - #F3					
	Söhlingen	Söhlingen Z15 - #F4					
	Söhlingen	Söhlingen Z15 - #F5					
	Söhlingen	Söhlingen Z16 2.Frac					
	Söhlingen	Söhlingen Z16 3.Frac					
	Söhlingen	Söhlingen Z16 4.Frac					
Niendorf	Völkersen	Völkersen NZ2 (Re-Frac)					
Heidelberg	Völkersen	Völkersen NZ3					
Havel	Völkersen	Völkersen NZ4 (Hv)					
Niendorf	Völkersen	Völkersen NZ4 (Nd)					
Havel	Völkersen	Völkersen NZ5					
Havel	Völkersen	Völkersen NZ5a (Hv)					
Niendorf	Völkersen	Völkersen NZ5a (Nd)					
Havel	Völkersen	Völkersen Z1					
Havel	Völkersen	Völkersen Z3					
Havel	Völkersen	Völkersen Z4					
Havel	Völkersen	Völkersen Z6 (Hv)					
Havel	Völkersen	Völkersen Z7					
Havel	Völkersen	Völkersen Z10					
	Wardböhlen	Wardböhlen Z1					

In Abbildung 12 sind die wesentlichen Ergebnisse aus den Spannungsmessungen im Deckgebirge wie auch im Reservoir von Nordhannover dargestellt. Es ist auffällig, dass im Bereich des Reservoirs die minimale Horizontalspannung über sehr weite Bereiche streut. Im Gegensatz zum Deckgebirge ist dies in erster Linie nicht auf die lithologische Ausbildung des Reservoirs zurückzuführen, sondern auf die Depletierung durch die Gasförderung.

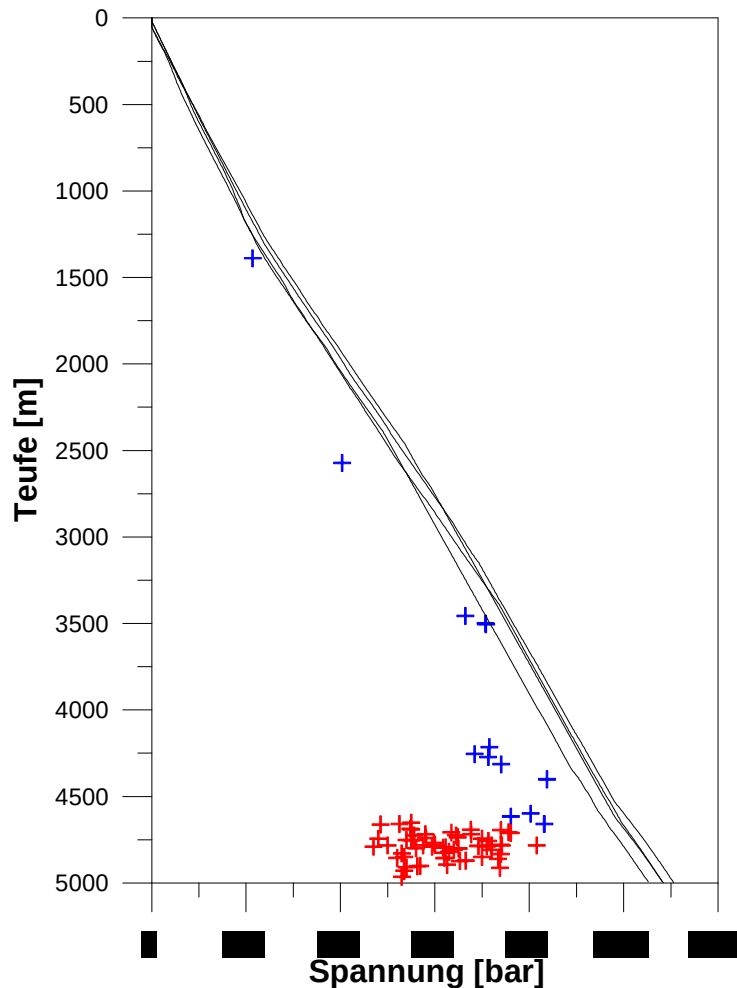


Abbildung 12: Darstellung der minimalen Horizontalspannung in Abhängigkeit von der Teufe. Blau ist die minimale Horizontalspannung im Deckgebirge dargestellt, rot die minimale Horizontalspannung im Reservoir. Die Vertikalspannung der Bohrungen VK-N Z1 bis VK-N Z4 sind als schwarze Linien zu erkennen.

6.3 Änderung der minimalen Horizontalspannung in Erdgasfeldern durch die Depletierung

Die Förderung von Erdöl und Erdgas aus Reservoirs bewirkt Veränderungen im Porendruck innerhalb des Reservoirs und führt zu Kompaktion sowie Spannungsänderungen im Reservoir und dessen unmittelbarer Umgebung. Solche Veränderungen können zu einer Verstärkung der Differenzspannungen führen (TEUFEL 1996). Durch die Kompaktion reagieren nach den konzeptionellen Modellen nach (SEGALL 1992) und (SEGALL AND FITZGERALD 1998) die Deckschichten oberhalb des Reservoirs hauptsächlich durch Abschiebungen (Abbildung 13). Lateral entstehen Scherspannungen durch Entkopplung des Reservoirs von den Deckschichten. Zudem kann es durch Stress Arching (Spannungsumlagerungen) zu einem Spannungstransfer an den Seitenregionen kommen.

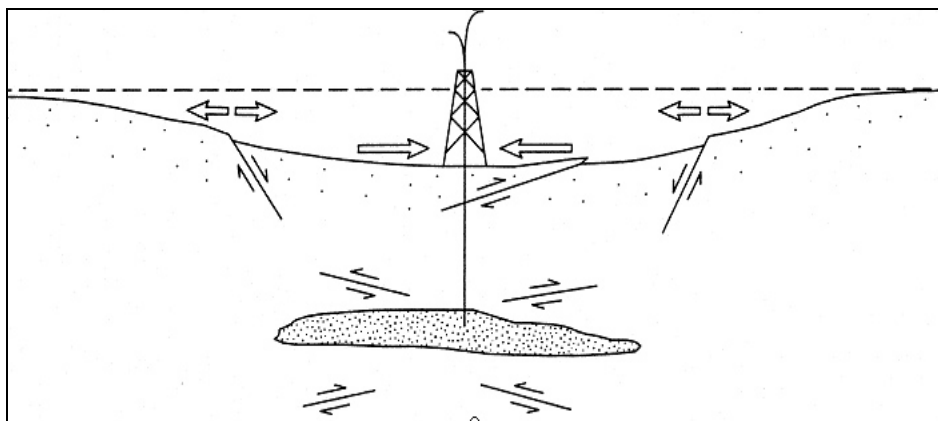


Abbildung 13: Porendruckverringering innerhalb eines Reservoirs führt zur Kompaktion, zu Spannungsänderungen und auch zur lokalisierten Änderung des tektonischen Regimes sowie zur Reaktivierung von Störungszonen im Bereich des Reservoirs (Abb. aus SEGALL and FITZGERALD 1998).

Induzierte Seismizität im Zusammenhang mit Förderung wurde in zahlreichen Öl- und Gasfeldern beobachtet (MEREU ET al. 1986; GRASSO AND WITTLINGER 1990; SZE et al. 2005), (DOSER, BAKER et al. 1992), (RUTLEDGE, PHILLIPS et al. 1998). In Europa wurde Seismizität im Zusammenhang mit Gasförderung im Lacq Feld (GRASSO and WITTLINGER 1990) und insbesondere in den Niederlanden (VAN EIJS, MULDER et al. 2006) registriert. Die Porendruckreduktion bei Förderung verringert die horizontalen Spannungen im Reservoir. Dieses Verhalten soll durch poroelastische Ansätze beschrieben werden. Hier sind die Spannungsänderungen im Reservoir über die Querdehnung der Gesteine mit den Änderungen des Porendrucks verknüpft. Zusätzlich ist bei diesen Ansätzen der Biot-Koeffizient (α) von Bedeutung. Dieser ist ein Maß für den Anteil der Spannungen, welche vom Gestein bzw. der Matrix getragen werden.

Das poroelastische Verhalten wird nach ENGELDER und FISCHER (1994) für den 2D Fall wie folgt erklärt:

Die effektive Spannung ergibt sich aus:

$$S_{eff} = S - \alpha P \quad (\text{Gleichung 1})$$

(α ist der Biot-Koeffizient) mit den stress strain-Beziehungen:

$$0 = S_h - \alpha P - \nu(S_h + S_v - 2\alpha P)$$

$$S_h = \frac{\nu}{1-\nu} S_v + \alpha \frac{1-2\nu}{1-\nu} P \quad (\text{Gleichung 2})$$

Da keine Änderung der absoluten Vertikalspannung angenommen wird, ergibt sich für die Änderung der totalen horizontalen Spannung als Funktion der Änderung des Porendrucks folgender Zusammenhang:

$$\frac{\Delta S_h}{\Delta P} = \alpha \frac{1-2\nu}{1-\nu} \quad (\text{Gleichung 3})$$

Da die Werte des Biot-Koeffizienten nahe 1 liegen und für ν die Werte üblicherweise den Bereich von 0.15 bis 0.3 einnehmen, erhält man Verhältnisse von horizontaler Spannungsänderung zu Porendruckänderung, die zwischen 57 und 82 % liegen. Diese Werte werden bei Feldmessungen auch beobachtet (TEUFEL, RHETT ET AL. 1991), (TEUFEL 1996); (ADDIS 1997).

Tabelle 10: Kopplungskoeffizienten aus wiederholten Spannungsmessungen in KW-Feldern (ADDIS, 1997)

Feld	$\Delta S_h / \Delta P$
Ekofisk	0.8
Magnus	0.68
Venture	0.56
Vicksburg Formation	0.53
Waskom	0.46-0.57
West Sole	1.18
Wytch Farm	0.55

TEUFEL (1996) hat die Änderung der Horizontalspannung in Abhängigkeit der Porendruckänderung für Ölfelder in der Nordsee und in Nordamerika beschrieben. Die Auswertung zeigt, dass sich mit abnehmendem Porendruck die Scherspannungen im Reservoir erhöhen. Somit kann über die Änderung des Porendrucks auf die Änderung der Scherspannungen im Reservoir geschlossen werden. Diesem Gedanken soll weiter unten gefolgt werden.

Für die Klärung der Frage, wie sich die Scherspannungen im Reservoir verändern, ist die Kenntnis der Spannungen und der Spannungsänderungen im Reservoir von großer Bedeutung.



6.3.1 Änderung der minimalen Horizontalspannung im Heidbergsandstein des Feldes Völkern durch die Depletierung

Für die Bohrung VK-NZ3 liegt eine Bestimmung des Porendrucks und der minimalen Horizontalspannung für die Initialen Verhältnisse im Heidberg Horizont vor. Hierbei betrug die minimale Horizontalspannung 810 bar bzw. 81,0 MPa und der initiale Porendruck 654 bar bzw. 65,4 MPa. Im Jahr 2006 war der Porendruck auf 210 bar bzw. 21,0 MPa gefallen und die minimale Horizontalspannung wurde mit 618 bar bzw. 61,80 MPa bestimmt. Nach den Litho-density-Daten in der Bohrung VK-N Z3 betrug die Vertikalspannung im Reservoir in 4800 m Tiefe 103,3 MPa.

Bei einer Druckabsenkung um 444 bar bzw. 44,4 MPa verringerte sich die minimale Horizontalspannung um 192 bar bzw. 19,2 MPa. Das Verhältnis von $\Delta S_h / \Delta P$ beträgt hierbei 0,432. Gleichzeitig erhöht sich aber die Scherspannung im Heidberg.

Die Scherspannung beim initialen Spannungszustand betrug 96,2 bar (9,62 MPa) und erhöhte sich durch die Druckabsenkung (444 bar) um 82,9 bar auf 179,1 bar.

Durch die Entnahme des Gases hat sich die Scherspannung im Heidberg Sandstein in kurzer Zeit nahezu verdoppelt. Dies ist das Resultat der sehr raschen Druckabsenkung im Heidberg Sandstein. Die rasche Druckabsenkung bei einem vergleichbar geringen Fördervolumen beruht auf der geringen Porosität des Sandsteins, weshalb der Heidberg für die Gasförderung relativ frühzeitig stimuliert werden musste.

6.3.2 Änderung der minimalen Horizontalspannung im Havelsandstein des Feldes Völkersen durch die Depletierung

Im Bereich Völkersen kann die Änderung der minimalen Horizontalspannung in Abhängigkeit vom Porendruck für das Reservoir des Havelsandsteins ermittelt werden. Im Zusammenhang mit den Reservoirvolumina ist dies die Grundlage für die Bewertung der Injektion von Lagerstättenwasser in das Rotliegende des Feldes Völkersen.

Aus dem Bereich des Havelsandsteins im Gasfeld Völkersen liegen neun Messungen vor, bei denen sowohl die minimale Horizontalspannung als auch der Porendruck gemessen wurden. Die Daten sind in Tabelle 11 zusammengestellt.

Tabelle 11: Zusammenstellung der wesentlichen Daten der minimalen Horizontalspannung, der Vertikalspannung und der Porendruckdaten für den Havelsandstein im Erdgasfeld Völkersen.

Teufe TVD [m]	Bohrung	S_h [bar]	S_v [bar]	Porendruck [bar]
	VK-N Z4		1053,9	
	VK-N Z5*		1080,4	
	VK-N Z5a*		1086,7	
	VKRN Z1		1128,2	
	VKRN Z3		1088,5	
	VKRN Z4		1117,2	
	VKRN Z6		1134,6	
	VKTN Z7**		1133,2	
	VKRN Z10**		1128,2	

* Vertikalspannung extrapoliert von Bohrung VK-N Z1,

** Vertikalspannung extrapoliert von Bohrung VKRN Z1

Die Änderung der minimalen Horizontalspannung mit der Änderung des Porendrucks wird in der Regel als linearer Zusammenhang beschrieben. Für die Daten des Havelsandsteins ergibt sich das Verhältnis von $\Delta S_h / \Delta P = 0,70$. Der Zusammenhang zwischen der minimalen Horizontalspannung und dem Porendruck kann wie folgt beschrieben werden:

$$S_h = 0.70 * P_p + 331,2. \quad (\text{Gleichung 4})$$

Bei einem Druckabfall auf null bar würde nach dieser Beziehung die minimale Horizontalspannung auf 331 bar abfallen (Abbildung 14).

In einer Reihe von Bohrungen wurde in einer Bezugsteufe von 4800 m ein initialer Porendruck von 654 bar festgestellt. Die minimale Horizontalspannung vor Beginn der Depletierung ist im Havel nicht bekannt. Sie berechnet sich für den Havelsandstein für einen initialen Porendruck von 654 auf 791,7 bar. Dieser Wert liegt etwas niedriger, als der im Heidbergsandstein mit 810 bar gemessene Wert.

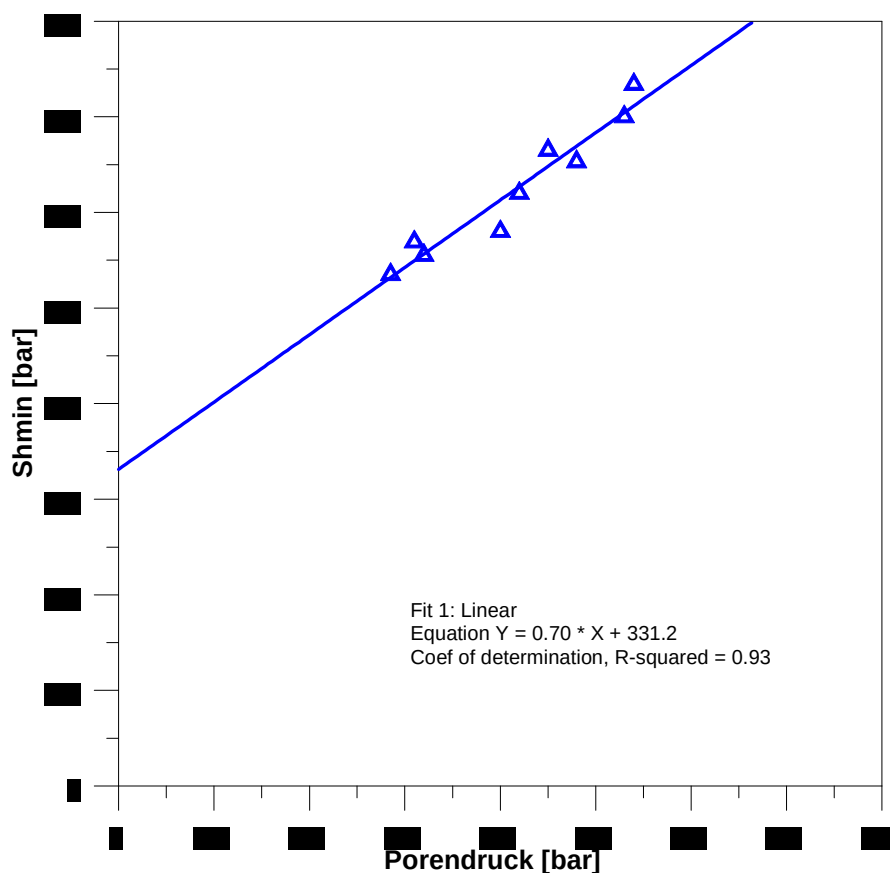


Abbildung 14: Linearer Zusammenhang zwischen der Änderung des Porendrucks und der minimalen Horizontalspannung im Havelsandstein (Völkersen).

Durch die Porendruckabsenkung werden die Spannungen im Reservoir verändert. Eine Verschiebung entlang einer Trennfläche wird eintreten, wenn die Scherspannungen gleich oder größer als die Scherfestigkeit werden. Die Gleichungen für die Normal- und Scherspannung bei Anwendung des Mohr-Coulomb'schen Bruchkriteriums lauten für absolute Spannungen:

$$\sigma_n = (\sigma_1 + \sigma_3)/2 + (\sigma_1 - \sigma_3)/2 \cos(2\theta) \quad (\text{Gleichung 5})$$

$$\tau = (\sigma_1 - \sigma_3)/2 \sin(2\theta) \quad (\text{Gleichung 6})$$

und für effektive Spannungen:

$$\sigma_n' = (\sigma_1' + \sigma_3')/2 + (\sigma_1' - \sigma_3')/2 \cos(2\theta) \quad (\text{Gleichung 7})$$

$$\tau = (\sigma_1' - \sigma_3')/2 \sin(2\theta) \quad (\text{Gleichung 8})$$

Der Winkel θ beschreibt den Winkel zwischen der größten Hauptnormalspannung σ_1 und der Normalen zur Bruchfläche. Gleichung 9 beschreibt die Beziehung zwischen θ und dem Reibungswinkel φ (Abb. 16):

$$\theta = (90^\circ + \varphi)/2 \quad (\text{Gleichung 9})$$

Daraus folgt, dass die neu angelegte Bruchfläche unter einem Bruchwinkel $\alpha = 45^\circ - \varphi/2$ zu σ_1 geneigt ist (Abb. 15).

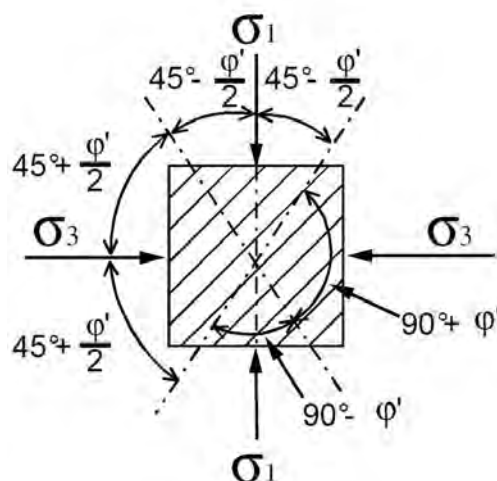


Abbildung 15: Zusammenhang zwischen Bruchwinkel und Reibungswinkel.

In Abbildung 16 ist das Mohr-Coulomb'sche Bruchkriterium dargestellt. Daraus können die Scherspannung (τ_f) entlang einer Scherfläche und die entsprechende Normalspannung (σ_f) abgelesen werden.

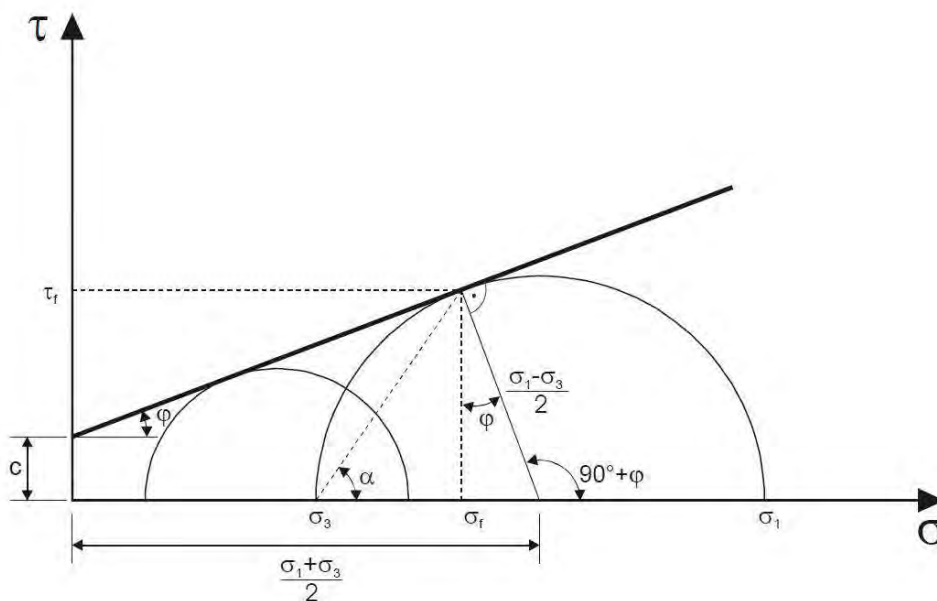
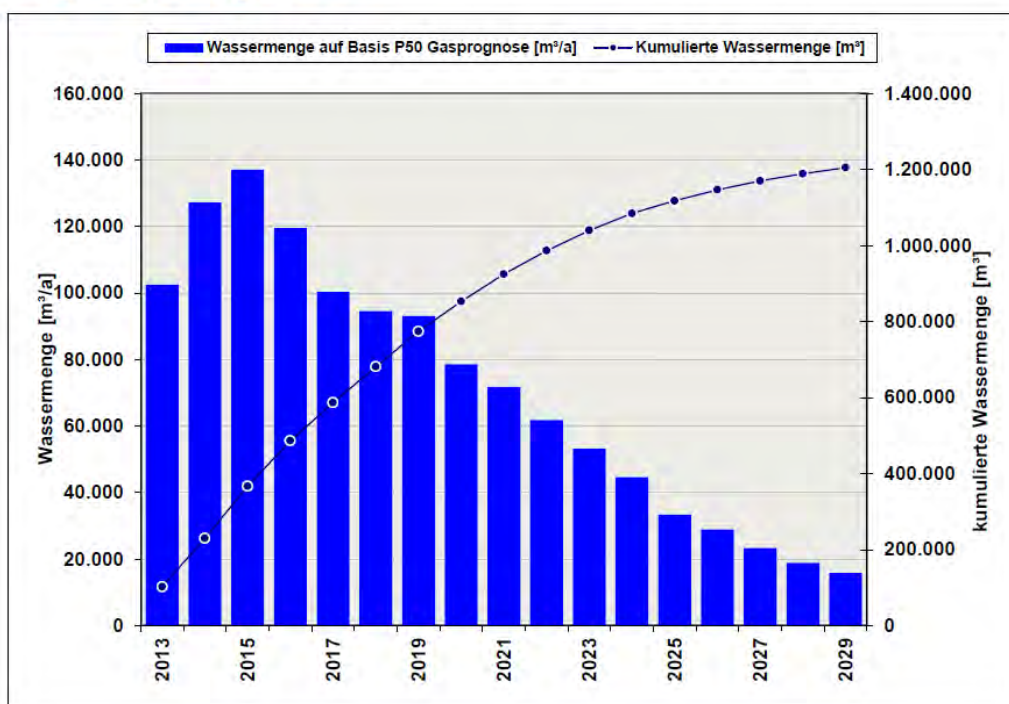


Abbildung 16: Darstellung nach Mohr-Coulomb (Abb. aus Skriptum Felsmechanik und Tunnelbau, TU-Graz vom 20.02.2007)

Bei Abschiebungen ist die Vertikalspannung die maximale Hauptspannung. Entsprechend ist für ein Gestein mit einem hohen Reibungswinkel ($\varphi = 45^\circ$) ein Bruchwinkel von $22,5^\circ$ zu erwarten, während für ein Gestein mit einem niedrigen Reibungswinkel ($\varphi = 30^\circ$) mit einem Bruchwinkel von 30° zu rechnen ist. Dies entspricht bei den Abschiebungen den häufig beobachteten Einfallwinkeln von 60° bis $67,5^\circ$.

In der Bohrung VK-NZ3 wurde aus dem Heidelberg produziert. Der Havelsandstein wurde verwässert angetroffen. Der Havel kann deshalb künftig zur Injektion von Lagerstättenwasser genutzt werden. In Abbildung 17 ist die Aktuelle Mengenprognose für das anfallende Lagerstättenwasser dargestellt. Demnach liegt der maximale Lagerstättenwasseranfall um 130.000 m³ pro Jahr oder durchschnittlich etwa 350 m³ pro Tag. Bis zum Jahr 2029 sollen etwa 1.200.000 m³ Lagerstättenwasser versenkt werden.

Lagerstättenwasserentsorgung Mengenprognose



VORWEG GEHEN

RWE Dea AG; Besprechungstermin LBEG 15.08.2013; 395

Abbildung 17: Prognose des anfallenden Lagerstättenwassers bis zum Jahr 2029 (Daten RWE-Dea).

Die Tiefe des Horizontes, in den injiziert werden soll, liegt in einer Tiefe von ca. 5000 m (TVD). Der Lagerstättendruck im Havel wird zum 01.01.2013 mit 225,3 bar angenommen (Abbildung 18). Am 01.01.2015 sollte der Druck in der Lagerstätte auf 181,7 bar abgesenkt sein. In Abbildung 18 ist die Druckabsenkung bei fortlaufender Förderung aus der Lagerstätte dargestellt. Danach fällt der Druck bis zum 01.01.2038 auf 63,5 bar ab, wenn kein Lagerstättenwasser in die Lagerstätte injiziert wird. Bei einer Injektionsrate von täglich 200 m^3 verringert sich der Druckabfall in der Lagerstätte im gleichen Zeitraum auf 70,3 bar. Durch die Injektion des Lagerstättenwassers verringert sich der Druckabfall somit um 6,8 bar.

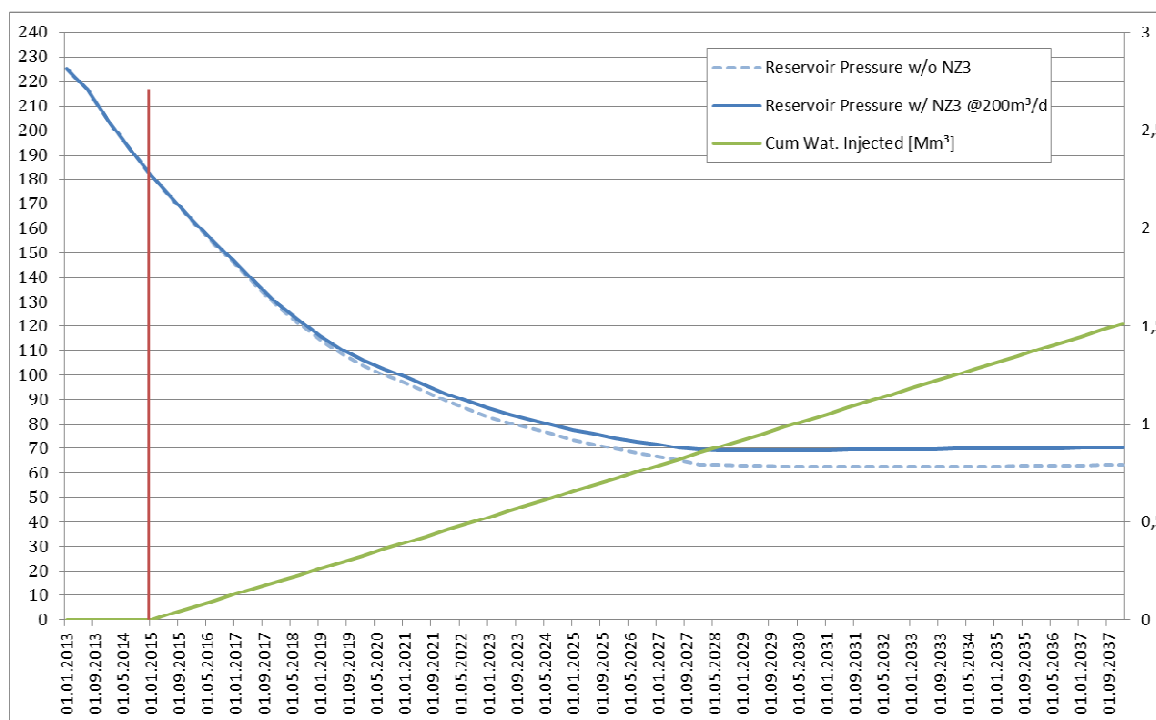


Abbildung 18: Entwicklung des Drucks im Havel bei einer Injektionsrate von 200 m^3 pro Tag. Bei einer kumulativen Versenkung von $1,512 \text{ Mio. m}^3$ an Lagerstättenwasser verringert sich die Druckabsenkung im Reservoir um 6,8 bar.

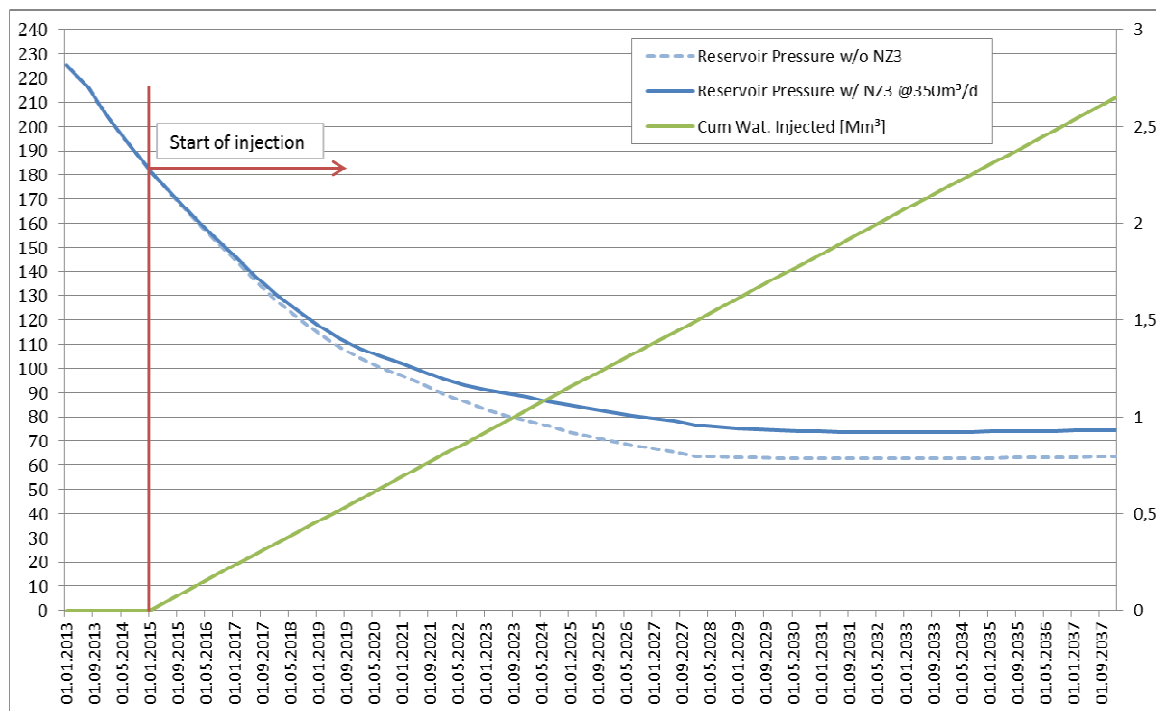


Abbildung 19: Entwicklung des Drucks im Havel bei einer Injektionsrate von 350 m³ pro Tag. Bei einer kumulativen Versenkung von 2,648 Mio. m³ Lagerstättenwasser verringert sich die Druckabsenkung im Reservoir um 10,9 bar.

Aus Abbildung 19 ist zu ersehen, dass bei einer Injektionsrate von täglich 350 m³ sich der Druck in der Lagerstätte im gleichen Zeitraum auf 74,41 bar einstellt. Durch die Injektion von 350 m³ Lagerstättenwasser pro Tag verringert sich der Druckabfall im Reservoir um 10,9 bar. Bei einer Injektionsrate von ca. 350 m³ pro Tag werden über das Jahr insgesamt etwa 130.000 m³ Lagerstättenwasser injiziert. Dies ist die maximale Versenkrate, die momentan angenommen wird. Im Zuge der Verringerung der Gasförderung dürfte sich die Injektionsmenge weiter reduzieren. Dies dürfte dem Fall entsprechen, dass etwa 200 m³ Lagerstättenwasser pro Tag injiziert werden. Trotz gewisser Unsicherheiten bei den Injektionsraten und der exakten Druckentwicklung im Reservoir kann aus den Druckdaten abgeschätzt werden, welche Auswirkungen die Injektion des Lagerstättenwassers auf die Entwicklung der Scherspannung im Reservoir hat.

7 Folgerungen für eine Injektion in den Havelsandstein

Um die Auswirkung der Injektion auf die Seismizität zu beurteilen, wird der Spannungszustand zu Beginn der Injektion mit dem Spannungszustand am Ende des Injektionszeitraums (01.01.2038) verglichen. Zunächst wird aus *in situ* Messungen des Porenfluiddrucks P_p im Reservoir nach Gleichung 4 (Seite 34) der initiale Wert für die minimale horizontale Spannung S_h bestimmt. Im nächsten Schritt erfolgt die Berechnung der zukünftig erwarteten Werte für S_h basierend auf den Vorhersagen der Porenfluiddruckentwicklung (Abb. 18 und 19). Die Ergebnisse sind in Tabelle 12 zusammengefasst.

Tabelle 12: Auflistung der Vertikalspannungen, der Porenfluiddruckdaten und der nach Gleichung 4 berechnete Werte der minimalen horizontalen Spannungskomponente S_h für den Havelsandstein im Erdgasfeld Völkersen (Bezugsteufe 4800 m).

Zeitpunkt	Betriebszustand	S_h [bar]	S_v [bar]	P_p [bar]	S_v' [bar]	S_h' [bar]
	Initial	791,7	1033,2	654,0	379,2	137,7
01.01.2015	Beginn Injektion	459,2	1033,2	181,7	851,5	277,5
01.01.2038	Depl. ohne Injektion	375,9	1033,2	63,5	969,7	312,4
01.01.2038	Depl. mit 200 m ³ Injektion/Tag	380,7	1033,2	70,3	962,9	310,4
01.01.2038	Depl. mit 350 m ³ Injektion/Tag	383,6	1033,2	74,4	958,8	309,2

Ausgehend von den abgeleiteten Spannungszuständen werden nach Gleichung 8 die Scherspannungen auf Flächen mit der größten Neigung zum Scherversagen berechnet. Die Werte für θ werden nach Gleichung 9 aus Labordaten für interne Reibungswinkel der Reservoirgesteine (Abb. 21) und bei *in situ* Spannungsmessungen beobachteten Reibungswinkeln für das Gebirge (Abb. 20) berechnet. Die Labordaten zeigen hohe Festigkeiten der Reservoirgesteine des Rotliegend mit internen Reibungswinkeln von bis zu $\varphi = 45^\circ$ (Abb. 21). Daten aus *in situ* Spannungsmessungen im Reservoir implizieren $30^\circ < \varphi < 36^\circ$ für das Gebirge (Abb. 20). Die Labordaten werden als obere Grenze, die *in situ* Messungen als untere Grenze der Reibungswinkel angenommen. Nach Gleichung 9 resultiert ein Wertebereich für θ von 60° ($\varphi = 30^\circ$) bis $67,5^\circ$ ($\varphi = 45^\circ$). Die vorhergesagten Scherspannungen auf den entsprechenden Flächen (Gleichung 8) sind in Tabelle 13 zusammengefasst.

Tabelle 13: Auflistung der Vorhersagen des Porenfluiddrucks P_p , der effektiven Spannungen, und der Scherspannungen auf kritisch orientierten Flächen, Havelsandstein, Erdgasfeld Völkersen (Bezugsteufe 4800 m).

Zeitpunkt	Betriebszustand	P_p [bar]	S_v' [bar]	S_h' [bar]	Scherspannung ($\varphi=45^\circ$, $\theta=67,5^\circ$), [bar]	Scherspannung ($\varphi=30^\circ$, $\theta=60^\circ$), [bar]
	Initial	654,0	379,2	137,7	85,4	104,6
01.01.2015	Beginn Injektion	181,7	851,5	277,5	202,9	248,5
01.01.2038	Depl. ohne Injektion	63,5	969,7	312,4	232,4	284,6
01.01.2038	Depl. mit 200 m ³ Injektion/d	70,3	962,9	310,4	230,6	282,5
01.01.2038	Depl. mit 350 m ³ Injektion/d	74,4	958,8	309,2	229,6	281,3

Die Daten zeigen, dass die Scherspannung durch die Entnahme von Gas im Havelsandstein seit Beginn der Produktion kontinuierlich angestiegen sind. Für den Fall, dass der Reibungswinkel bei 45° liegt (Laborversuche), ergibt sich im Zeitraum vom 01.01.2015 bis 01.01.2038 ein Anstieg der Scherspannung von 202,9 bar auf 232,4 bar, wenn keine Injektion von Lagerstättenwasser erfolgt.

Findet eine Injektion von Lagerstättenwasser mit einer Rate von 350 m³/Tag statt, so berechnet sich der Anstieg der Scherspannung um 26,7 bar auf 229,6 bar. Der Anstieg der Scherspannung reduziert sich in diesem Fall um 2,8 bar bzw. um etwa 9 %.

Die höchsten Scherspannungen ergeben sich für kritisch orientierte Trennflächen für einen Reibungswinkel von 30° (Tab. 13). Da dies den kritischsten Fall darstellt, werden die nachfolgenden Betrachtungen auch für diesen Fall ausgeführt.

Bei einem Reibungswinkel von 30° berechnet sich der Anstieg der Scherspannungen auf den kritischen Flächen im Zeitraum vom 01.01.2015 bis 01.01.2038 um 36,1 bar auf 284,6 bar, wenn keine Injektion von Lagerstättenwasser erfolgt.

Erfolgt die Injektion von Lagerstättenwasser mit einer Rate von 350 m³/Tag, so berechnet sich ein Anstieg der Scherspannung um 32,8 bar auf 281,3 bar. Der Anstieg der Scherspannung reduziert sich durch die Injektion des Lagerstättenwassers um 3,3 bar bzw. ebenfalls etwa 9 %. Die Ergebnisse zeigen, dass die geplante Injektion von Lagerstättenwasser den Anstieg der Scherspannung auf kritisch orientierten Flächen im betrachteten Zeitraum gegenüber dem Fall reduziert, dass keine Injektion von Lagerstättenwasser erfolgt. Dieser Zusammenhang impliziert eine Reduzierung des seismischen Risikos im Gasfeld Völkersen durch die Injektion von Lagerstättenwasser in den Havelsandstein.

8 Auswirkungen der Injektion von Lagerstättenwasser auf Störungszonen

Durch die Injektion von Lagerstättenwasser in den Havelsandstein wird einer stärkeren Druckabsenkung im Reservoir entgegen gewirkt. Hierdurch wird der Anstieg der Scherspannungen auf kritisch orientierten Flächen im Reservoir vermindert (Tab. 13).

In gut permeablen Reservoiren wie dem Havelsandstein wird lediglich ein geringer lokaler Anstieg des Porenfluiddrucks erwartet. Im Folgenden wird analysiert, ob der Anstieg des Porenfluiddrucks ausreicht, um seismische Ereignisse durch Reaktivierung von Störungen im Umfeld der Bohrung VK-N Z3 oder durch Anlage neuer Trennflächen durch bruchhaftes Versagen des Gesteins auszulösen.

Bei Abschiebungen ist die Vertikalspannung die maximale Hauptspannung. Entsprechend ist für ein Gestein mit einem hohen Reibungswinkel ($\varphi=45^\circ$) ein Bruchwinkel von $22,5^\circ$ zu erwarten, während für ein Gestein mit einem niedrigen Reibungswinkel ($\varphi=30^\circ$) mit einem Bruchwinkel von 30° zu rechnen ist. Dies entspricht bei den Abschiebungen den häufig beobachteten Einfallswinkeln von 60° bis $67,5^\circ$.

Die Herdflächen sollten in Richtung der maximalen Horizontalspannung streichen. Diese ist im Bereich Völkersen N-S bis NNW-SSE orientiert (Abb. 22). Blattverschiebungen können bevorzugt in einem Winkel von etwa $22,5^\circ$ bis 30° zur maximalen Horizontalspannung aktiviert werden.

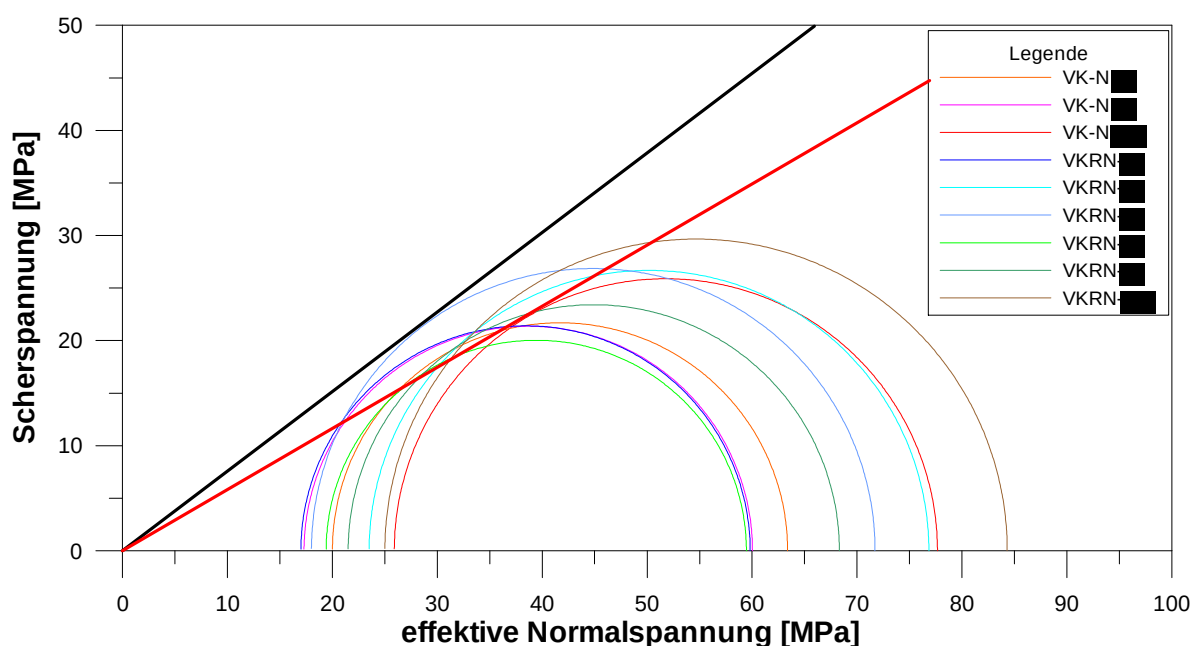


Abbildung 20: Mohr-Coulomb'sche Darstellung der Spannungsmessungen im Havel. Aus den Ergebnissen ergibt sich ein Reibungswinkel von 30° bis 36° .

Um das Verhältnis von maximaler und minimaler effektiver Spannung abzuleiten, kann nach JAEGER & COOK (1979) und ZOBACK & HEALY (1984) Gleichung (10) angewandt werden, wenn die Reibung der aktiven Störungen den Spannungszustand in der Tiefe kontrolliert:

$$(S_1 - P_p)/(S_3 - P_p) = [(\mu^2 + 1)^{1/2} + \mu]^2 \quad (\text{Gleichung 10})$$

LOCKNER (1995) gibt Reibungskoeffizienten $\mu = \tan(\varphi)$ an Störungsflächen mit $\mu = 0,58$ ($\varphi = 30^\circ$) an. Für den Fall eines relativ intakten Gebirges betragen die Reibungswinkel bis zu $\varphi = 45^\circ$. Dies entspricht einem Reibungskoeffizienten von $\mu = 1$. Hierfür ergibt sich:

$$(S_1 - P_p)/(S_3 - P_p) = 5,83 \quad (\text{Gleichung 11})$$

Für einen Reibungswinkel von $\varphi = 36^\circ$ beträgt der Reibungskoeffizient $\mu = 0,73$ und das Verhältnis von minimaler zu maximaler effektiver Spannung beträgt 3,87. Für einen Reibungswinkel von 30° beträgt der Reibungskoeffizient $\mu = 0,58$ und das Verhältnis von minimaler zu maximaler effektiver Spannung beträgt 3,0.

In Abbildung 21 sind Labordaten von Reservoirsandsteinen aus dem Bereich Völkersen dargestellt (BRAUN 1996).

Im Folgenden sollen die Scherspannungen auf einer kritisch orientierten Schwächefläche mit den Scherspannungen im intakten Gestein verglichen werden. Dies soll für die Bezugsteufe von 4800 m anhand der Daten zu Beginn der Injektion am 01.01.2015 (Tab. 12) erfolgen.

Bei einem Porendruck von 181,7 bar beträgt die effektive Vertikalspannung 851,5 bar. Die effektive minimale Horizontalspannung berechnet sich nach Gleichung 4 zu 277,5 bar und die Differenzspannung zu 574 bar. Das Verhältnis S_v'/S_h' beträgt 3,07. Dies entspricht nahezu genau dem Verhältnis von 3,0 das nach Gleichung 10 einem Reibungswinkel von 30° entspricht.

Der Reibungswinkel des intakten Gesteins liegt bei etwa 45° (Abbildung 21). Das Verhältnis von S_v'/S_h' berechnet sich für diesen Fall zu 5,83 (Gleichung 11).

Für die effektive Vertikalspannung von 851,5 bar berechnet sich die effektive minimale Horizontalspannung zu 146 bar und die Differenzspannung zu 705,5 bar.

Aufgrund der hohen Festigkeit der Gesteine ist eher von Gebirgsversagen durch Reaktivierung bereits vorhandener Störungen auszugehen.

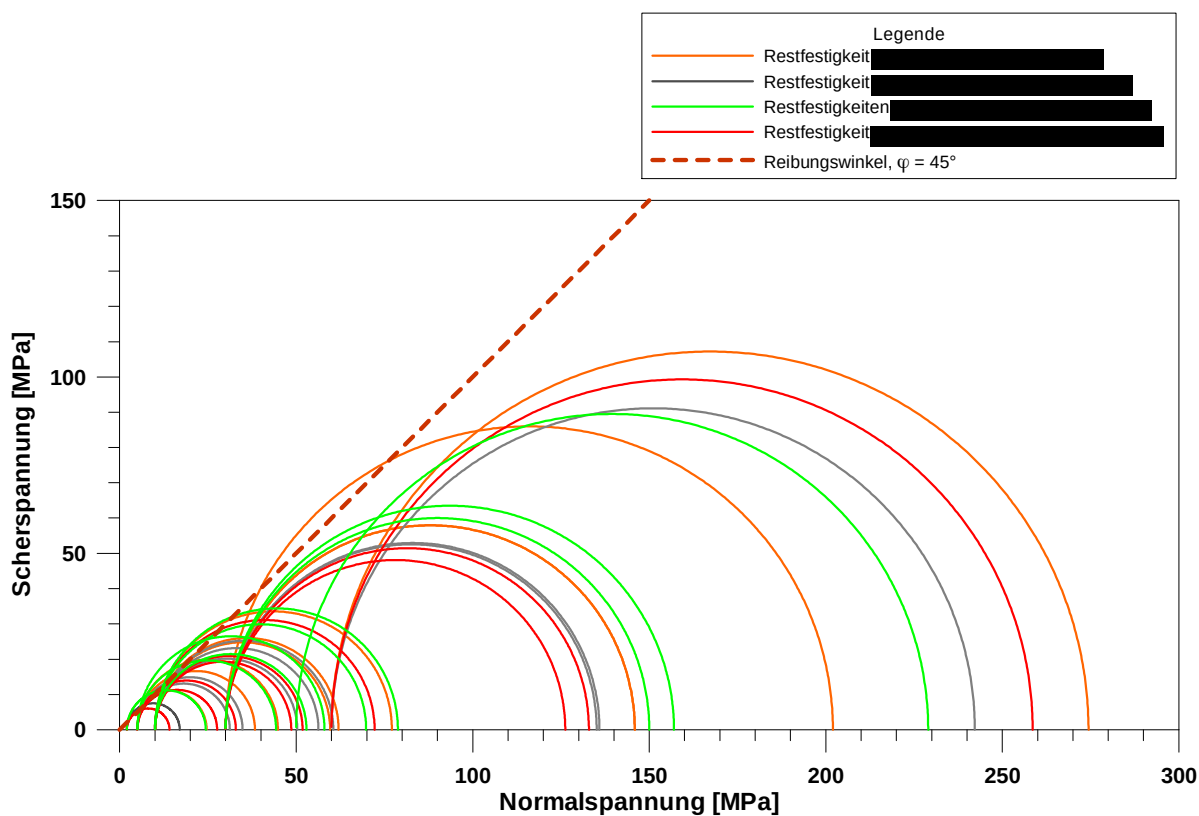


Abbildung 21: Labordaten mit den Restfestigkeiten aus Triaxialversuchen.

Wenn um die Injektionsstelle keine Störungen vorhanden sind, dann kann es selbst bei einer lokalen Druckerhöhung nicht zur Auslösung von seismischen Ereignissen kommen. Dies könnte nur der Fall sein, wenn sich die Druckerhöhung bis in eine größere Entfernung von der Injektionsstelle ausbreitet. Auf Grund der allgemeinen Druckabsenkung und der hohen Durchlässigkeit des Havelsandsteins ist dies jedoch nicht zu erwarten.

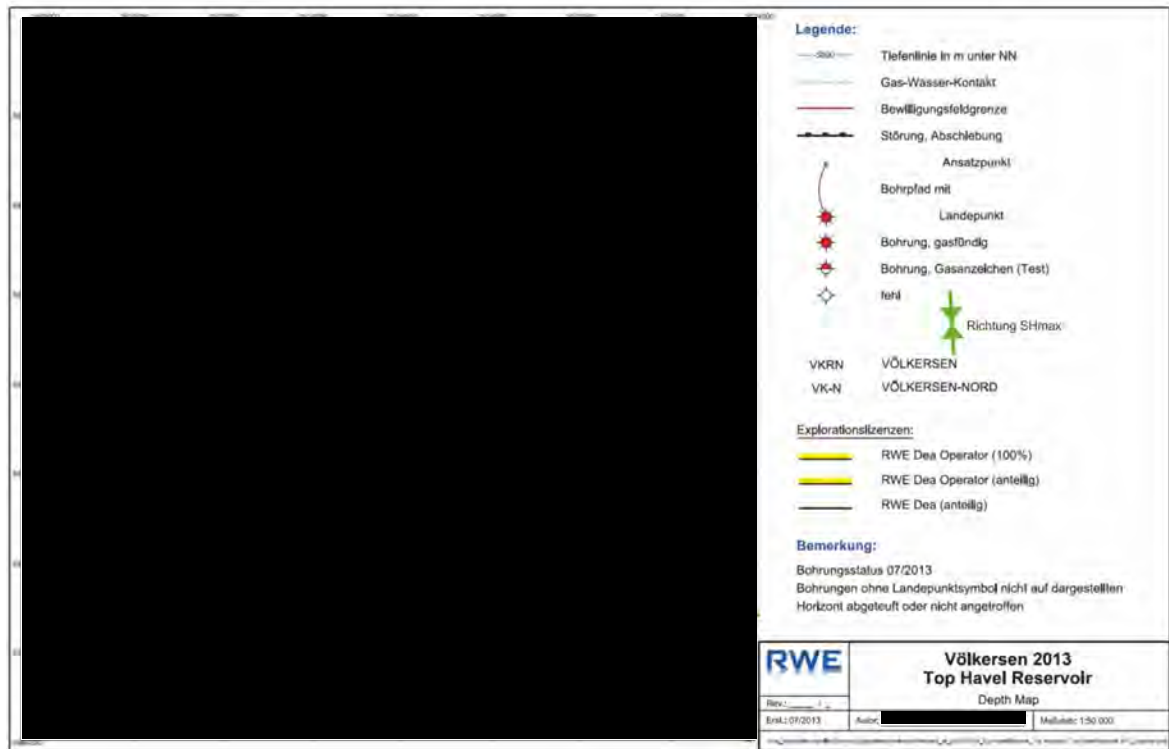


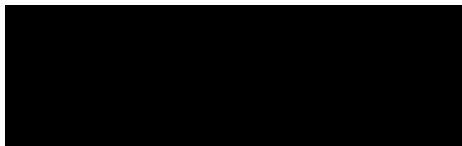
Abbildung 22: Orientierung der maximalen Horizontalspannungen und der kartierten Störungszonen. Die Bohrung VK-N Z3 ist mit einem hellgelben Kreis kenntlich gemacht. Als Rosen-diagramm ist die Orientierung der maximalen Horizontalspannung von 14 Bohrungen im Bereich Völkersen mit dargestellt. Die möglichen aktivierbaren Störungszonen sind weit von der Bohrung entfernt.



Im Bereich der Bohrung VK-N Z3 zeigen weder Log Daten noch seismische Daten Hinweise auf Störungszonen (Abb. 22). Zusätzlich ist zu erkennen, dass kartierte Störungen im weiteren Umfeld der Bohrung nahezu senkrecht bzw. parallel zur Orientierung der maximalen Horizontalspannung in der Bohrung VK-N Z3 streichen. Diese Störungen sind ungünstig zum Spannungsfeld orientiert. Daher ist eine Reaktivierung dieser Störungen durch die Injektion von Lagerstättenwasser unwahrscheinlich. Auf Grund der hergeleiteten Beziehungen zwischen der erwarteten Entwicklung der Scherspannungen auf kritisch orientierten Flächen in Abhängigkeit von dem vorhergesagten Verlauf des Porenfluid-drucks im Reservoir, und der Analyse der Verteilung der Störungsorientierung bezüglich des regionalen Spannungsfeldes kommen wir zu dem Schluss, dass die Bohrung VK-N Z3 für die Injektion von Lagerstättenwasser in den Havelsandstein geeignet ist.

Piewak & Partner GmbH
Ingenieurbüro für Hydrogeologie und Umweltschutz
Bayreuth, 03.06.2014

Bearbeiter



Dr.-Ing. Thomas Röckel
Dipl.-Geologe

Geschäftsführer



Manfred Piewak
Dipl.-Geologe
Sachverständiger nach § 18 BBodSchG



9 Verzeichnisse

9.1 Abkürzungsverzeichnis

α	Biot-Koeffizient bei Poroelastischen Betrachtungen, Bruchwinkel in der Felsmechanik
μ	Reibungskoeffizient
$\Delta Sh/\Delta P$	Änderung der minimalen Horizontalspannung zur Änderung des Porendrucks
ν	Poissonzahl (Querdehnungszahl)
φ	Reibungswinkel
σ_1	(Betrag) maximale Hauptspannung
σ_2	(Betrag) mittleren Hauptspannung
σ_3	(Betrag) minimalen Hauptspannung
σ_1'	effektive maximale Hauptspannung
σ_2'	effektive mittleren Hauptspannung
σ_3'	effektive minimalen Hauptspannung
σ_f	Normalspannung auf Schwächefläche
σ_n	(absolute) Normalspannung
σ'_n	effektive Normalspannung
τ	Scherspannung
τ_f	Scherspannung an Schwächeflächen
BGR	Bundesanstalt für Geologie und Rohstoffe
BHTV	Borehole-Televiwer
FMS	Formation-MicroScanner
FMI	Formation-MicroImager
LBEG	Landesamt für Bergbau Energie und Geologie
MPa	Megapascal
MD	Measurement Depth (Meßsteufe)
ML	Lokalmagnitude
MN/m ²	Meganewton pro Quadratmeter
NN	Normal Null
P_p	Porendruck
S_{eff}	effektive Spannung
S_h	Richtung der kleinsten Horizontalspannung
S_H	Richtung der größten Horizontalspannung
S_v	Vertikalspannung
SZGRF	Seismisches Zentralobservatorium Gräfenberg
TVD	True Vertical Depth
VK-N Z-1	Völkersen-Nord Z1
VKRN Z1	Völkersen Z1



9.2 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Richtung der maximalen Horizontalspannung im Suprasalinar
Tabelle 2a:	Spannungsrichtungen in der Bohrung Ahausen Z 1
Tabelle 2b:	Spannungsrichtungen in der Bohrung Hemsbünde Z5
Tabelle 2c:	Spannungsrichtungen in der Bohrung Stapel Z1
Tabelle 3a:	Spannungsrichtungen in den Bohrungen VKRN Z1 bis VKRN Z3 (nach GMI 2002).
Tabelle 3b:	Spannungsrichtungen für Bohrungen im Bereich des Feldes Völkersen (nach LINGNAU 2007)
Tabelle 4:	Herdmechanismus des Bebens bei Rotenburg. Vergleich der Lösungen des SZGRF mit der Lösung der ETH Zürich
Tabelle 5:	Herdparameter der Erdbeben in den Jahren 2008, 2010, 2011 und 2012 am Erdgasfeld Völkersen
Tabelle 6a:	Vertikalspannung in der Bohrung Ahausen Z1
Tabelle 6b:	Vertikalspannung in der Bohrung Hemsbünde Z5
Tabelle 6c:	Vertikalspannung in der Bohrung Stapel Z1
Tabelle 6d:	Integrierte Dichtewerte und Vertikalspannung für die Endtiefe der Bohrungen im Bereich Völkersen
Tabelle 6e:	Integrierte Dichtewerte und Vertikalspannung für die Endtiefe der Bohrungen
Tabelle 7:	Zusammenfassung der Ergebnisse von Leak-off-Tests aus dem Deckgebirge im Bereich Völkersen (BÜCKER & GMI 2002)
Tabelle 8:	Zusammenfassung der Ergebnisse von Leak-off-Tests aus dem Deckgebirge im Bereich Völkersen
Tabelle 9:	Zusammenfassung der Ergebnisse von Hydraulic-Fracturing Messungen aus dem Rotliegend von Nordhannover
Tabelle 10:	Kopplungskoeffizienten aus wiederholten Spannungsmessungen in KW-Feldern
Tabelle 11:	Zusammenstellung der wesentlichen Daten der minimalen Horizontalspannung, der Vertikalspannung und der Porendruckdaten für den Havelsandstein im Erdgasfeld Völkersen
Tabelle 12:	Minimale Horizontal- und Vertikalspannung sowie Porendruckdaten für den Havelsandstein im Erdgasfeld Völkersen für die Bezugsteufe 4800 m
Tabelle 13:	Zusammenstellung der effektiven Spannungen und der Porendruckdaten für den Havelsandstein im Erdgasfeld Völkersen für die Bezugsteufe 4800 m

9.3 Abbildungsverzeichnis

- Abbildung 1:** Spannungsindikatoren in Bohrkernen und im Bohrloch (aus RÖCKEL & LEMPP 2003)
- Abbildung 2:** Beispiel für Bohrlochrandausbrüche im FMS-Image der Bohrung VKRN Z2.3
- Abbildung 3:** Beispiel für nichtvertikale, en echelon förmige Risse im FMS-Image der Bohrung VKRN Z1 in einer Messteufe von 5201 bis 5221 m
- Abbildung 4:** Schemazeichnung eines Petal-Centerline-Fractures der in einen Centerline-Fracture übergeht und Bohrkern mit einem Centerline Fracture
- Abbildung 5:** Spannungsrichtungen im Deckgebirge im Norddeutschen Becken
- Abbildung 6:** Richtung der maximalen Spannungsrichtungen (S_H) abgeleitet aus Bohrkernmessungen der Bohrungen Ahausen Z1, Hemsbünde Z 5 und Stapel Z1
- Abbildung 7b:** Orientierung der maximalen Horizontalspannung der von LINGNAU (2007) ausgewerteten Bohrungen im Bereich des Feldes Völkersen
- Abbildung 7a:** Orientierung der maximalen Horizontalspannung der von BÜCKER & STRÖBEL (2003) ausgewerteten Bohrungen im Bereich des Feldes Völkersen
- Abbildung 8:** Richtung der maximalen Spannungsrichtungen (S_H) abgeleitet aus verschiedenen Messungen
- Abbildung 9:** Vergleich der Herdflächenlösung mit der Richtung der maximalen Horizontalspannung der umgebenden Tiefbohrungen
- Abbildung 10:** Zusammenstellung der bisher bestimmten Herdmechanismen und Störungszonen im Umfeld der Erdgasfelder
- Abbildung 11:** Vertikalspannung in Abhängigkeit von der Tiefe, ermittelt aus Lithodensity-Daten
- Abbildung 12:** Darstellung der minimalen Horizontalspannung in Abhängigkeit von der Teufe
- Abbildung 13:** Porendruckverringerung innerhalb eines Reservoirs führt zur Kompaktion, zu Spannungsänderungen und auch zur lokalisierten Änderung des tektonischen Regimes sowie zur Reaktivierung von Störungszonen im Bereich des Reservoirs
- Abbildung 14:** Linearer Zusammenhang zwischen der Änderung des Porendrucks und der minimalen Horizontalspannung im Havelsandstein (Völkersen)
- Abbildung 15:** Zusammenhang zwischen Bruchwinkel und Reibungswinkel
- Abbildung 16:** Darstellung nach Mohr-Coulomb
- Abbildung 17:** Prognose des anfallenden Lagerstättenwassers bis zum Jahr 2029
- Abbildung 18:** Entwicklung des Drucks im Havel bei einer Injektionsrate von 300 m³/Tag
- Abbildung 19:** Entwicklung des Drucks im Havel bei einer Injektionsrate von 350 m³/Tag
- Abbildung 20:** Mohr-Coulomb'sche Darstellung der Spannungsmessungen im Havel
- Abbildung 21:** Labordaten mit den Restfestigkeiten aus Triaxialversuchen
- Abbildung 22:** Orientierung der maximalen Horizontalspannungen und der Störungszonen

10 Literatur

- ADDIS, M. A. (1997). "Reservoir depletion and its effect on wellbore stability evaluation." Int. J. Rock Mech. & Min. Sci. **34**(3-4): 17.
- BABCOCK, E.A. (1978): Measurement of subsurface fracture from dipmeter logs, Am. Assoc. Petrol. Geologist Bull., **62**: 1111 - 1126.
- BANKWITZ, P., GROSS, U. & BANKWITZ, E. (1993): Krustendeformation im Bereich der Finne-Kyffhäuser-Gera-Jachimov-Zone.- Z. geol. Wiss., **21** (1/2), Berlin.
- BAUMANN (1982): Spannung und Spannungsumwandlung im Rheinischen Schiefergebirge.- 232 S.- Koblenz (Numismat. Verlag).
- BECKER, A. & PALADINI, S. (1990): In situ-Spannungen in Nord- und Mitteleuropa, Schr. Angew. Geol. Karlsruhe, **10**, 1-63
- BELL, J.S. & GOUGH, D.I. (1979): Northeast-southwest compressive stress in Alberta: evidence from oilwells.-Earth Planet. Sci. Lett., **45**: 475 - 482.
- BLÜMLING, P. (1986): In-Situ Spannungsmessungen in Tiefbohrungen mit Hilfe von Bohrloch-randausbrüchen und die Spannungsverteilung in der Kruste Mitteleuropas und Australiens, Dissertation, Universität Karlsruhe, 135 S.
- BORM, G., LEMPP, CH., NATAU O. & Röckel TH. (1989): Instabilities of borehole and drillcores in crystalline rocks, with examples from the KTB pilot hole.- Scientific Drilling, **1**: 105-114, Springer.
- BRAUN, R. (1996): Experimentelle Bestimmung felsmechanischer Parameter an ausgewählten Bohrkernen aus insgesamt 5 Bohrungen in Norddeutschland, Auftraggeber DRILLCORE MEASUREMENTS.
- BRUDY, M. & M. D. ZOBACK (1993): Compressive and tensile failure of boreholes arbitrarily-inclined to principal stress axes: Application to the KTB boreholes, Germany, Int. J. Rock. Mech. Min. Sci., **30**, 1035-1038.
- BÜCKER, CHR. & GMI (2002): Geomechanics Study Voelkersen, Determination of a geomechanical model for the Völkersen Field, North Germany.- Interner Bericht RWE-Dea, Hamburg.
- BÜCKER, CH., & STROBEL, J. (2003): Das Voelkersen Fas Feld in Norddeutschland: Anzeichen für zwei Spannungsrichtungen im Rotliegenden?, DGMK-Tagungsbericht 2003-1, ISBN 3-936418-03-9, Celle.
- CORNET, F.H. & RÖCKEL, TH. (2012): Vertical stress profiles and the significance of "stress decoupling".-Tectonophysics, **581**, 193-205.
- COX, J.W. (1970): The high resolution dipmeter reveals dip-related borehole and formation characteristics.- 11th Ann. Logging Symp., Soc. Prof. Well Log Analysis.
- DOSER, D. I., M. R. BAKER, et al. (1992). "The not so simple relationship between seismicity and oil production in the Permian basin, West Texas." PAGEOPH **139**(3/4): 481-506.
- DAHM, T., KRÜGER, F., STAMMLER, K., KLINGE, K., KIND, R., WYLEGALLA, K., GRASSO, J.-R. (2007): The 2004 Mw 4.4 Rotenburg, Northern Germany, earthquake and its possible relationship with gas recovery. Bulletin of the Seismological Society of America **97**, S. 691-704.
- ENGELDER, T. & FISCHER, M.P. (1994) Influence of poroelastic behavior on the magnitude of minimum horizontal stress, S_h , in overpressured parts of sedimentary basins. Geology **22**, 949-952.



- EVANS, M.A. (1980): "Fractures in oriented Devonian Shale cores from the Appalachian Basin", West Virginia University Department of Geology and Geography, Master Thesis, Morgantown, 277 S.
- GESTERMANN, N., PLENEFISCH, TH., & KEYSER, M. (2013): Seismicity in the vicinity of natural gas fields in Northern Germany Observations and analysis.- AGIS Workshop Karlsruhe, 26.– 28.11.2012.
- GMI (2002): Determination of a geomechanical model for the Völkersen Field, Report submitted to RWE-Dea, August 26, 2002.
- GRASSO, J. R. & WITTLINGER, G. (1990). "Ten Years of Seismic Monitoring Over a Gas Field." Bulletin of the Seismological Society of America **80**(2): 450-473.
- GROTE, R. (1998): Die rezente horizontale Hauptspannung im Rotliegenden und Oberkarbon in Norddeutschland,- Erdöl Erdgas Kohle, 114, (10) 478-482, Hamburg/Wien (Urban Verlag).
- JAEGER, J. C. & COOK, N.G.W. (1979): Fundamentals of Rock Mechanics, 3rd, 593 p., Chapman and Hall, New York.
- KNOLL, P. (1979): Analyse der Gebirgsspannungen in Bergbaurevieren der DDR, Freiburger Forschungshefte C, **349**, 61-73
- LINGNAU, R. (2007): Voelkersen Region, Structural Re-evaluation of Image Data and interaktive Dip Results, GSC-FE Report FE2007-02, Hamburg, 20.03.2007.
- LOCKNER, D.A. (1995): "Rock Failure".- in: Rock Physics and Phase Relation: A Handbook of Physical Constants.- T. Ahrens (ed.), AGU, Washington D.C., 127-147.
- MEREU, R. F., & BRUNET, R. F. (1986): "A study of the microearthquakes of the Gobles oil area of Southwestern Ontario." Bulletin of the Seismological Society of America **76**(5): 1215-1223.
- NATAU, O., BORM, G. & Roeckel TH. (1990): Influence of Lithology and Geological Structure on the Stability of the KTB Pilot Hole.- In MAURY, V. & FORMAINTRAUX, D. (eds). Rock at Great Depth, Proc. Int. Symp. ISRM, **3**, 1487 -1490, Pau, France.
- ROECKEL, TH., NATAU, O., DIETRICH, H.G. (1992): Core reorientation by comparison of core instabilities and borehole instabilities.- In Emmermann, R., Dietrich, H.G., Lauterjung, J., und Wöhl, Th., (eds.), KTB Hauptbohrung, Results of the Geoscientific Investigation in the KTB Field Laboratory, 0-6000m, KTB Report 92-2: F1 - F17.
- RÖCKEL, TH. & LEMPP CH. (2003) Der Spannungszustand im Norddeutschen Becken. ERDÖL ERDGAS KOHLE, 119, 2, 73-80.
- RÖCKEL, TH. (1996): Der Spannungszustand in der Erdkruste am Beispiel der Tiefbohrungen des KTB-Programms, Veröffentlichungen des Institutes für Bodenmechanik und Felsmechanik der Universität Fridericiana, Karlsruhe.
- RÖCKEL, TH. & PIEWAK, M. (2010): Geomechanische Bewertung der Störungen westlich Wittorf Z1, 18.10.2010, Bayreuth.
- LEMPP, CH. & RÖCKEL, TH. (1999): Bohrloch- und Bohrkern-Instabilitäten als Indikatoren des regionalen Spannungszustandes. Ber. 12. Nationale Tagung für Ingenieurgeologie, 12.-16.4. 1999, Halle/S., 94-104, Fachsektion Ing.- Geol. DGG/DGGT.
- ROTH, F., BÄSLER, H., WEIGOLD, G., FUCHS, K., PALMER, J. & FLECKENSTEIN, P. (1998): Spannungsmessungen in Osteuropa- Orientierungsdaten aus Nordost-Deutschland, Weißrussland und der Ukraine.- ICDP/KTB-Kolloquium, Wissenschaftliches Programm und Abstracts, Bochum.



- ROTH, F. & FLECKENSTEIN, P. (2001): Stress orientation found in north-east Germany differ from the West European trend.- Terra Nova, 13, 289-296.
- RUMMEL, F. & BAUMGÄRTNER, J. (1982): Spannungsmessungen im östlichen Bereich der Süddeutschen Scholle.- Bericht an die BGR 145 S.
- RUTLEDGE, J. T. & PHILLIPS, W. S. (1998): "Reservoir characterization using oil-production-induced microseismicity, Clinton County, Kentucky." Tectonophysics **289**: 129-152.
- RWE-Dea 2013: LaWa Völkersen – Konzeptstudie und Basic Engineering Planung für primäre und sekundäre Aufbereitung.
- RWE-Dea 2013: Water Disposal 2014, Statusbericht beim Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie am 15.08.2013, Hannover.
- SEGALL, P. & FITZGERALD, S. D. (1998): "A note on induced stress changes in hydrocarbon and geothermal reservoirs." Tectonophysics **289**: 117-128.
- TEUFEL, L. W. (1996): Influence of Pore pressure and production-induced Changes in Pore Pressure on In Situ Stress. U. S. D. o. Energy, Sandia National Labs. : 54.
- TU GRAZ: Skritum Felsmechanik und Tunnelbau, TU-Graz vom 20.02.2007.
- TEUFEL, L. W. & RHETT, D. W. (1991): Effect of reservoir depletion and pore pressure drawdown on in situ stress and deformation in the Ekofisk field, North Sea. . Rock Mechanics as a Multidisciplinary Science. J.-C. Rogiers. Rotterdam, Balkema: 63-72.
- VAN EIJNS, R. M. H. E. & MULDER, F. M. M. (2006): "Correlation between hydrocarbon reservoir properties and induced seismicity in the Netherlands." Engineering Geology **84**: 99-111.
- WOLTER, K. E.. (1996): Spannungsmessungen: Nord-Hannover, Lokationen Ahausen Z1, Hemsbünde Z5, Stapel Z1, Abschlußbericht zu den durchgeführten Untersuchungen, Teil II.
- WOLTER, K. E. & BERNERS, H.P. (2000): Gebirgsspannungsmessungen im Bereich des Ölfeldes Mittelplatte - Bohrlochstabilität in Abhängigkeit von den Gebirgsspannungsverhältnissen. ERDÖL ERDGAS KOHLE, 116, Jg. 2000, Heft 10, Urban Verlag, 482-486.
- as a tool in fracture mechanics and stress analysis (Ed. A. J. FLEET).
- ZOBACK, M.D. & HEALY, J.H. (1984): Friction, faulting and in situ stress, Ann. Geophys., 2, pp. 689-698.

Überprüfung der Bohrung Völkersen Nord Z3 auf Eignung als Injektionsbohrung

Anlage "Gutachten Sonderteil C"

zur Studie

**"Nachhaltiger Umgang mit Lagerstättenwasser
aus der Erdgasförderung der RWE Dea AG in Niedersachsen"**



erstellt für

**RWE-Dea AG
Überseering 40,
D-22297 Hamburg**

von

**IDEAS Ing.-Büro A. Sperber
Grüne Riede 20
D-31234 Edemissen**

März 2014

Überprüfung der Bohrung Völkersen Nord Z3 auf Eignung als Injektionsbohrung

Inhaltsverzeichnis

Verzeichnis der verwendeten Abkürzungen	3
1. Integrität einer Bohrung – allgemeine Betrachtung	4
1.1 Verrohrungen	4
1.2 Rohrzementationen.....	8
1.3 Dichtheitsanforderungen	9
1.4 Möglichkeiten zum Nachweis der Bohrungsintegrität.....	10
2. Ergebnisse der Untersuchungen an der Bohrung Völkersen Nord Z3	12
2.1 Nachberechnung der Futterrohre.....	12
Allgemeine Anmerkungen	12
13 3/8“-Ankerrohrtour.....	16
9 5/8“-Produktionsrohrtour	18
7 5/8“-Produktionsliner	20
5“-Produktionsliner	21
4 1/2“-Tubing	22
Accessoires im Tubingstrang	24
2.2 Sicherheitsbetrachtung für Packer und sonstige Dichtelemente	25
2.3 Sicherheitsbetrachtung für den Bohrlochkopf und das E-Kreuz.....	27
2.4 Bewertung der Zentrierung der Rohrtouren	28
13 3/8“-Ankerrohrtour.....	28
9 5/8“-Produktionsrohrtour	29
7 5/8“-Produktionsliner	29
5“-Produktionsliner	29
2.5 Bewertung der Zementationen	29
13 3/8“-Ankerrohrtour.....	30
9 5/8“-Produktionsrohrtour	31
7 5/8“-Produktionsliner	33
5“-Produktionsliner	35
2.6 Betrachtung der Spülungssedimentation in ausgewählten Ringräumen	36
9 5/8“-Produktionsrohrtour	37
7 5/8“-Produktionsliner	37
2.7 Sicherheitsbetrachtung für den Betrieb	38
2.8 Zusammenfassende Bewertung zur Integrität der Bohrung	39
2.9 Fazit.....	41
Quellennachweis:	43
Anlagenverzeichnis:	44

Überprüfung der Bohrung Völkersen Nord Z3 auf Eignung als Injektionsbohrung

Verzeichnis der verwendeten Abkürzungen (in der Reihenfolge des ersten Erscheinens)

API	American Petroleum Institute
FGT	Formations-Gradienten-Test
FIT	Formation-Integrity Test
LOT	Leak-Off-Test
TVD	true vertical depth
MD	measured depth
CBL	Cement Bond Log
CEL	Cement Evaluation Log
USIT	UltraSonic Imaging Tool
WEG	Wirtschaftsverband Erdöl- und Erdgas-Gewinnung
DLS	Dogleg-Severity
OD	outer diameter
ID	inside diameter
LK	Linerkopf
IPC	internal plastic coating

Überprüfung der Bohrung Völkersen Nord Z3 auf Eignung als Injektionsbohrung

Die RWE-Dea AG erwägt, die Bohrung Völkersen Nord Z3 als Injektionsbohrung für Lagerstättenwasser zu nutzen. Dabei stehen als Alternativen sowohl die Nutzung der jetzt bestehenden Bohrung als auch eine Ablenkung zur Diskussion. IDEAS Ingenieurbüro Sperber wurde mit der Überprüfung der Eignung der Bohrung als Injektionsbohrung beauftragt. Unabhängig davon, welche der eingangs genannten Alternativen gewählt oder welche geologische Schicht als Versenkhorizont genutzt werden soll, können grundsätzliche Kriterien genannt werden, die für eine Eignung als Versenkbohrung zu untersuchen und zu bewerten sind. Diese werden zum besseren Verständnis nachfolgend zunächst allgemein diskutiert. In einem zweiten Kapitel wird dann konkret die Bohrung Völkersen Nord Z3 betrachtet, wobei anzumerken ist, dass die hier gezeigte Vorgehensweise der Überprüfung grundsätzlich auch auf andere Bohrungen und Standorte übertragbar ist.

1. Integrität einer Bohrung – allgemeine Betrachtung

Eine Injektionsbohrung muss geeignet sein, das zu versenkende Fluid sicher in den Versenkhorizont einbringen zu können. Dazu muss sie „integer“ sein. Für die Integrität einer Bohrung sind verschiedene Elemente zuständig; dies sind im Wesentlichen

- die Verrohrungen (Rohrtouren)
- die zur Verschraubung der einzelnen Rohre verwendeten Gewindeverbindungen
- die Zementationen der Rohrtouren
- die übertägige Verflanschung und der Bohrlochkopf und
- die untertägige Zusatzausrüstung (Packer, Zubehörteile).

Diese Elemente werden nachfolgend diskutiert.

1.1 Verrohrungen

Eine wichtige Rolle bei der Betrachtung der Bohrungsintegrität kommt den Verrohrungen zu. Bohrungen werden i.d.R. in einzelnen Abschnitten gebohrt und verrohrt. Das Bohrloch-Design - die Planung des Bohr- und Verrohrungsschemas - legt die Anzahl der Rohrtouren (Casing oder Liner) fest, die eingebaut werden müssen. Die Festlegung, wo Rohrtouren

vorzusehen sind, hängt primär von der Geologie ab und kann daher nur unter Berücksichtigung der lokalen Geologie erfolgen.

Die Absetzteufen der Rohrtouren sind aber auch so zu wählen, dass beim Niederbringen der Bohrung in einer „Kicksituation“ – also bei Zufluss von Fluid (Gas oder Flüssigkeit) aus dem Gebirge in das Bohrloch - ein Einschließen der Bohrung und die Kickbekämpfung möglich ist, ohne dass durch den zusätzlich entstehenden Einschließdruck in der Bohrung das Gebirge unter dem Rohrschuh der zuletzt eingebauten Rohrtour aufbricht.

Der abschnittsweise Einbau von Rohren dient

- dem Schutz von Grundwasser,
- zur Sicherung bereits erbohrter Abschnitte (z.B. in instabilen Formationen),
- zur Trennung von Abschnitten/Formationen mit unterschiedlichen Drücken/Druckgradienten und/oder unterschiedlichen Fluiden,
- zur Abdichtung des Bohrloches gegen unerwünschte Zuflüsse aus dem Gebirge (Gas, Öl, Wasser)
- zur Vermeidung unerwünschter Abflüsse (Verluste) aus dem Bohrloch in das Gebirge.

Um diese Ziele zu erreichen wird üblicherweise nach jedem Rohrtoureinbau in den Zwischenraum zwischen Rohraußenseite und Bohrlochwand Zement gepresst, der nach Aushärtung eine Abdichtung und lastaufnahmefähige Verbindung zum Gebirge bildet. Hierauf wird in Kapitel 1.2 eingegangen.

Üblicherweise nimmt nach jedem Verrohrungseinbau der Durchmesser ab, da einerseits das Rohr in das vorher gebohrte Loch mit ausreichend „Spiel“ passen muss, und andererseits auch das nächste Bohrwerkzeug durch die letzte Verrohrung durchgehen muss, um den nächsten Abschnitt zu bohren. Es ist zu unterscheiden zwischen „Tagestouren“, die – wie der Name schon sagt – bis zutage reichen, und „Linern“, die nur bis in die vorherige Rohrtour geführt und in dieser abgehängt werden.

Generelle Anforderungen an Bohrungsverrohrungen

Die Verrohrungen von Tiefbohrungen müssen verschiedenen Belastungen widerstehen können. Auf die Rohre wirken

- Außendrucke
- Innendrucke

- Zuglasten
- Biegebelastungen
- u.U. korrosive Fluide (Gas, Öl, Wasser) aus dem durchteuften Gebirge
- Hohe Temperaturen und Temperaturänderungen

Die folgende Grafik zeigt beispielhaft verschiedene vereinfachte Temperaturprofile, wie sie sich in Tiefbohrungen je nach „Betriebszustand“ einstellen können.

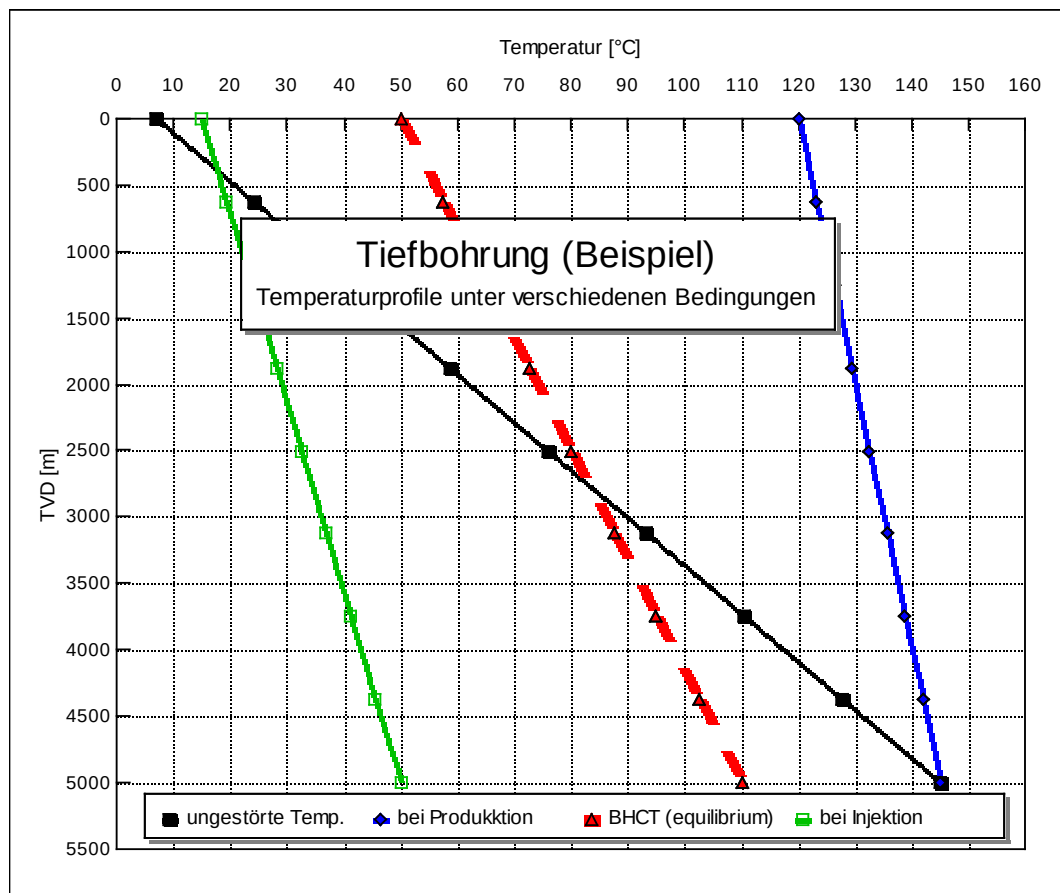


Abbildung 1: Temperaturprofile in einer Bohrung bei verschiedenen Betriebszuständen

Das Beispiel zeigt, dass die Temperaturschwankungen in einer Tiefbohrung erheblich sein können.

Die oben aufgezählten Belastungen treten auch in Kombination (z.B. Druck, Temperatur, Biegung) auf und dürfen weder zu Kollaps, Bersten oder Abriss der Rohre führen.

Jede Rohrtour muss den auf sie wirkenden Belastungen jederzeit widerstehen können. Da sich die Belastungen über den „Lebenszyklus“ einer Bohrung ändern, müssen die verschiedenen zu erwartenden Belastungsfälle phasenweise einzeln betrachtet werden.

Die oben genannten Belastungsfälle sind für jede einzelne Rohrtour einer Bohrung zu berechnen; dabei sind, da i.d.R. zum Zeitpunkt der Bohrungsplanung keine exakten Daten verfügbar sind, plausible Annahmen z.B. zu den Spülungs- und Zementdichten und Temperaturen zu treffen. Die Spülungsdichten richten sich i.d.R. nach den Formationsdrücken (Porendrücken) und werden üblicherweise aus Sicherheitsgründen etwas höher gewählt als dem Porendruck entsprechend („overbalanced drilling“); manchmal kann beim Bohren aber auch eine darüber hinaus gehende Erhöhung notwendig werden, z.B. zur Stabilisierung der Bohrlochwand oder auch um drückende Ton- oder Salzschiefer daran zu hindern in das Bohrloch zu kriechen.

Die Rohrberechnung erfolgt allgemein nach bestimmten Regeln, die international überwiegend auf den vom American Petroleum Institute (API) aufgestellten Formeln beruhen. Dabei ist zu unterscheiden zwischen

- den Berechnungen zur Erfassung der voraussichtlichen Belastungen einerseits, und
- den Berechnungen der Belastbarkeitsgrenzen der Rohre andererseits.

Je nach „Einsatzzweck“ der Rohrtour (z.B. Grundwasserschutztour, Ankerrohrtour, Zwischenrohrtour, Produktionsrohrtour oder -liner) sind Berechnungen vorzunehmen, die die jeweils möglichen einsatzspezifischen Belastungen berücksichtigen. Dabei stellen die Auslegungskriterien für eine Produktionsrohrtour in einer Gasförderbohrung die höchsten Anforderungen dar; letztlich stellt eine Produktionsrohrtour – zusammen mit dem Tubingstrang – einen „doppelwandigen Behälter“ dar.

Im Endeffekt müssen die Rohrtouren so ausgelegt werden, dass die Belastbarkeitsgrenzen der Rohre immer größer sind als die über die Lebensdauer der Bohrung auftretenden Belastungen. Hier ist ggf. auch zu berücksichtigen, dass an Rohrtouren auch Wandstärkenminderungen (z.B. durch Korrosion) auftreten können, die die Belastbarkeiten reduzieren.

Eine Besonderheit gilt für die Standrohrtour. Diese wird i.d.R. bereits im Zuge der Bohrplatzherrichtung gesetzt, was oft durch Rammen geschieht. Das Standrohr dient primär der Verhinderung des Unterspülens der Bohrturmfundamente, schützt aber gleichzeitig auch die oberflächennahen Grundwasserhorizonte. Für die Standrohrtour existieren keine Vorgaben für eine Auslegungsberechnung, da die Anforderungen aufgrund der geringen Einbauteufe auch nur sehr gering sind und praktisch von jedem Stahlrohr erfüllt werden.

1.2 Rohrzementationen

Die Herstellung einer guten Rohrzementation zwischen Rohraußenwand und Bohrlochwand ist sehr wichtig, da sie verschiedene Aufgaben erfüllen soll:

- als „Abdichtung“
 - um Horizonte mit unterschiedlichen Drücken/Druckgradienten voneinander zu trennen
 - um unerwünschte Zuflüsse aus dem Gebirge (Gas, Öl, Wasser) zu verhindern
 - um unerwünschte Abflüsse (Verluste) aus dem Bohrloch in das Gebirge zu verhindern
- als „mechanisches Element“
 - zur Belastungsverteilung (Vermeidung punktförmiger Belastungen auf die Rohre)
 - um die thermisch induzierten Spannungen der Rohre aufzunehmen

Die Qualität einer Rohrzementation ist - unter anderem - abhängig von der Effektivität der Spülungsverdrängung bei der Zementation, die Ringraumgeometrie wiederum beeinflusst die Effektivität der Spülungsverdrängung. Eine starke Exzentrizität ist dabei als kritisch einzustufen, da die Zementbrühe grundsätzlich den Weg des geringsten Widerstands nimmt – also bevorzugt die Querschnittssektionen des Ringraums wählt, die am größten sind. Gelingt aber nur eine unvollständige Verdrängung, so verbleiben im Ringraum Spülungsreste, die später durch Fluide „ausgewaschen“ werden können. Solche Zonen sind als einzelne, nicht miteinander verbundene „Taschen“ i.d.R. unkritisch; wenn sich aber „Kanäle“ ausbilden, wie in Abbildung 2 im Bereich der Pfeile gezeigt, so können dadurch Wegsamkeiten am Rohr entlang geschaffen werden, die die gewünschte Dichtigkeit der Zementation beeinträchtigen.

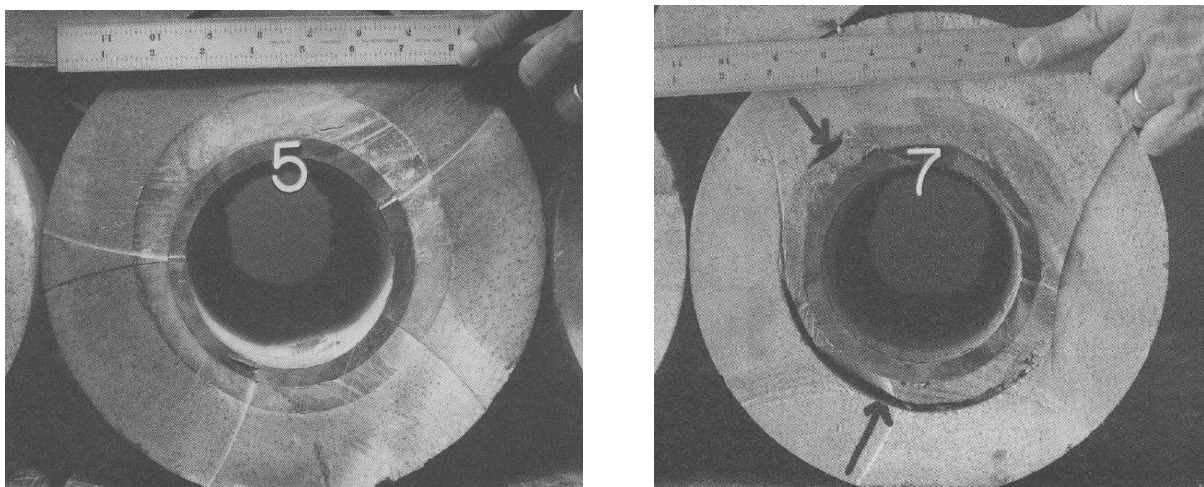


Abbildung 2: Einfluss der Exzentrizität auf die Spülungsverdrängung im Ringraum [8]

Um eine gute Zentrierung der Rohre im Bohrloch sicherzustellen, werden daher in bestimmten Abständen „Centralizer“ auf den Rohren installiert, die zirkumferential einen möglichst gleichförmigen Abstand zwischen Rohr- und Bohrlochwand bewirken sollen. Auch kann die Zementationsgüte durch Bewegung (Rotation und Reziprokation) des Strangs während des Zeitraums, in dem der Zement im Ringraum aufsteigt, verbessert werden. Besonders in stark abgelenkten Bohrlochabschnitten kann die Anwendung dieser Technik sich sehr positiv auf die Zementationsgüte auswirken.

Ein weiterer Aspekt sind Druck- und Temperaturschwankungen, denen die Rohrtouren unterliegen. Diese induzieren u.a. Veränderungen im realen Durchmesser der Rohre infolge der Elastizität und der thermischen Ausdehnung des Stahles. Da Stahl und Zement unterschiedliche E-Moduli und thermische Ausdehnungskoeffizienten haben, kann z.B. bereits die Innendruckentlastung einer Rohrtour, die nach einer Zementation unter hoher Spüldichte durch einen Spülungswechsel auf eine sehr leichte Spülung hervorgerufen wird, zu einem „Schrumpfen“ des Rohrdurchmessers führen, das größer ist als die Elastizität des Zementes im Ringraum. In diesem Fall kann ein Ablösen der Zementhaftung am Rohr erfolgen und ein „Mikroringraum“ entstehen.

1.3 Dichtheitsanforderungen

Sowohl die Rohrverbindungen zwischen den einzelnen Rohren einer Rohrtour als auch die Ringraumzementationen müssen für die jeweiligen Fluide „dicht“ sein. Hier ist – je nach Fluid und dessen unterschiedlicher Mobilität – zu unterscheiden zwischen „Gasdichtheit“ und „hydraulischer Dichtheit“. Die höchsten Anforderungen werden durch unter Hochdruck stehende Gase gestellt, die i.d.R. auch spezielle Rohrverbinder erfordern, die einen metallischen Dichtsitz aufweisen. Dabei werden durch Aufbringen eines Verschraubmoments in den Partnern der Verbindung (Muffe und Zapfen) im Dichtsitz Verformungen im elastischen Spannungsbereich erzeugt, die zwischen diesen beiden Teilen dichten. Zur Erzielung „hydraulischer Dichtheit“ ist allgemein kein metallischer Dichtsitz nötig; hier reicht die Abdichtung durch das beim Verschrauben in den Gewindespalten verbleibende viskose Gewindefett aus, das über die Länge des Gewindespalts selbst bei hohen Drücken von einigen hundert bar einen so hohen Widerstand gegen Fließen darstellt, dass dieses vermieden wird.

Für Zementationen gilt prinzipiell das gleiche; hier muss die Bildung eines Mikroringspalts zwischen Rohrwand und Zement sowie zwischen Zement und Bohrlochwand vermieden werden um Gasdichtheit zu erlangen. Hingegen stellen bei der Zementation eventuell

entstehende Mikroringspalten bis zu einer bestimmten Größe für Flüssigkeiten wie Öl oder Formations-/Lagerstättenwasser eine unüberwindliche Barriere dar.

In diesem Zusammenhang ist auch zu erwähnen, dass bestimmte geologische Formationen natürliche „Barrieren“ bilden können, die abdichtend wirken [9]. Hier sind besonders plastische Ton- und Salzlagen zu nennen. So können selbst im Falle originär undichter Ringraumzementationen Ringräume durch das „Kriechen“ des Gebirges in solchen plastischen Formationen nach einiger Zeit dicht werden.

Ein weiterer Aspekt, der in diesem Zusammenhang der „selbstgängigen Abdichtung“ genannt werden muss, ist die Sedimentation von im Ringraum über dem Zementkopf befindlicher Spülung. Bohrspülung besteht i.d.R. aus einer wässrigen Phase, der zu verschiedenen Zwecken Feststoffe zugesetzt werden. Diese Feststoffe sedimentieren in längeren Stillstandsphasen ohne Zirkulation (z.B. nach erfolgten Zementationen im Ringraum hinter Rohrtouren) allmählich aus und können sehr effektive Abdichtungen erzielen, wie Untersuchungen gezeigt haben [9]. Auf den Sedimentationsaspekt wird später bei der spezifischen Situationsbewertung in der Bohrung Völkersen Nord Z3 noch näher eingegangen.

Dichtheitsanforderungen bestehen außerdem an Dichtelemente wie Packer und Dichtungen in Verflanschung und Bohrlochkopf.

1.4 Möglichkeiten zum Nachweis der Bohrungsintegrität

In einer im Abteufen befindlichen oder fertiggestellten Bohrung können die Integritätsnachweise auf verschiedene Weise erbracht werden. Hier sind „direkte“ und „indirekte“ Maßnahmen zu unterscheiden; als direkte Maßnahmen sind Druckteste, als indirekte Maßnahmen Bohrlochmessungen anzusehen.

Übliche Methodik ist z.B. die Dichtheit einer Rohrzementation zu testen, indem nach dem Aufbohren des Rohrschuhs und Bohren eines kurzen Sacklochs ein Drucktest vorgenommen wird. Dieser wird allgemein entweder mit einem maximalen Druckgradienten geplant (Formationsgradienten-Test FGT oder Formation-Integrity Test FIT) und bei Erreichen des entsprechenden Druckes als Dichtheitsprobe über einen gewissen Zeitraum (z.B. 10 Minuten) gehalten oder der Druck wird solange erhöht, bis der Brechdruck des Gebirges direkt unter dem Rohrschuh erreicht wird und der Druck nach dem Aufbrechen abfällt (Leak-Off-Test; LOT).

Die (hydraulische) Dichtheit der Rohrtour kann analog vor dem Aufbohren des Rohrschuhs getestet werden. Die Berechnung des erforderlichen Kopfdrucks erfolgt unter

Berücksichtigung der Dichte der im Bohrloch befindlichen Spülung und der Seiger- oder Vertikalteufe (true vertical depth = TVD) der Bohrung.

Schwieriger – und aufwändiger - ist der Nachweis der Gasdichtheit zu erbringen; dies gilt sowohl für die Rohrverbinder (bei Rohreinbau und später im Verlaufe der Lebens-/Nutzungsdauer einer Bohrung) als auch für die Zementationen. Jedoch ist die Gasdichtheit im vorliegenden Fall – Nutzung als Wasserinjektionsbohrung - nicht relevant und wird deshalb nicht näher diskutiert.

Die Dichtheit von Dichtelementen wie Packer und Dichtungen in Verflanschung und Bohrlochkopf wird ebenfalls mit Drucktesten überprüft und nachgewiesen; dies gilt bereits für die Installationsphase.

Bei Verflanschung und Bohrlochkopf sind üblicherweise Manometer zur permanenten Überwachung der Drücke in den einzelnen Ringräumen und des Steigrohrdruckes installiert, so dass in der Betriebsphase im Prinzip kontinuierlich der Zustand der Bohrung bekannt ist. Bei Änderungen im Druck ist im Einzelfall zu prüfen, was die Ursache für die Druckänderung ist. Nicht jede Druckänderung deutet dabei jedoch auf eine Undichtigkeit hin; vielmehr kann eine Druckänderung auch durch thermische Effekte erzeugt werden. Als Beispiel sei hier die thermische Ausdehnung eines Fluids in einem geschlossenen Ringraum genannt. Bei einer Änderung des Betriebszustandes einer Bohrung kann das Temperaturfeld in der Bohrung geändert werden; die lokal wirksame Temperaturänderung wiederum kann zu einer Druckänderung im Ringraum führen.

Zur Beurteilung der Bohrungsintegrität können auch Bohrlochmessungen dienen. So kann zum Beispiel mit geeigneten Messungen die Zementationsgüte beurteilt werden. Hierfür kommen Messungen wie „Cement Bond Log“ (CBL), „Cement Evaluation Log“ (CEL) oder das „UltraSonic Imaging Tool“ (USIT) infrage. Hiermit kann – insbesondere, wenn die Messung „orientiert“ (mit Aufzeichnung einer Referenzrichtung und azimuthaler Drehung der Sonde über die Teufe) gefahren wird – festgestellt werden, ob sich bei der Zementation z.B. ein Kanal im Zementmantel gebildet hat, der dann u.U. eine Gasmigration erlaubt.

Mit anderen Messverfahren (z.B. Gamma-Neutron) kann festgestellt werden, ob sich hinter einer Rohrtour Gas befindet. Wenn also eine undichte Ringraumzementation zu einer Gasmigration geführt hat, kann dies nachgewiesen werden, sofern nicht ohnehin über den gesamten zu messenden Teufenbereich eine gasführende Geologie vorliegt.

Zur Lokalisierung von Undichtheiten in Rohrtouren können z.B. Temperaturlogs gefahren werden; an undichten Stellen (z.B. defekten Rohrverbindern) wird sich aufgrund der Zu- oder

Abströmung infolge der Undichtheit eine Störung im Temperaturprofil zeigen, das mit einer solchen Messung festgestellt werden kann.

Ebenfalls mit dem „UltraSonic Imaging Tool“ (USIT) kann auch die Wandstärke von Rohren in einer Bohrung gemessen werden. Allerdings ist dies nur möglich, wenn die Messsonde direkten Kontakt zur Innenwand des zu messenden Rohrstrangs hat; eine Messung durch mehrere Rohrtouren hindurch ist nicht möglich.

2. Ergebnisse der Untersuchungen an der Bohrung Völkersen Nord Z3

Nachfolgend werden die Ergebnisse der konkreten Überprüfungen zur Eignung der Bohrung Völkersen Nord Z3 als Versenkbohrung geschildert. Wie eingangs des Berichtes bereits erwähnt stehen als Alternativen sowohl die Nutzung der bestehenden Bohrung als auch eine Ablenkung zur Diskussion; nach tel. Auskunft von [REDACTED] (RWE-Dea HH; 28.06.2013) ist bisher aber noch keine definitive Entscheidung zum Ablenkbohrpfad und der Endverrohrung getroffen worden

Hier ist anzumerken, dass eine konkrete Integritätsprüfung naturgemäß nur für die aktuell verfügbaren Elemente – also die bestehende Bohrung – möglich war. Da eine in die Zukunft gerichtete Integritätsprüfung nicht möglich ist, bedürfen alle im Rahmen einer Ablenkung neu zu tätigen Arbeiten und in die Bohrung einzubauenden Elemente einer separaten Prüfung, die zu gegebener Zeit durchzuführen ist.

Auch ist zu berücksichtigen, dass die Integritätsprüfung auf die geplante Nutzung als Versenkbohrung ausgerichtet ist; etwaige für später angedachte andere Nutzung oder auch Verfüllungsmaßnahmen der aktuellen Bohrung wurden bei der durchgeführten Untersuchung nicht berücksichtigt.

Weiterhin ist festzuhalten, dass die Bohrung als Gasförderbohrung ausgelegt wurde. Wenn nun eine Konvertierung in eine Versenkbohrung stattfinden soll, so ist damit allgemein keine Erhöhung, sondern vielmehr eine Verringerung der Anforderungen hinsichtlich Dichtheit und Innendruckfestigkeit verbunden. Eine Ausnahme bildet unter Umständen die auf den Tubingstrang wirksam werdende Zugbelastung, wie später noch diskutiert wird.

2.1 Nachberechnung der Futterrohre

Allgemeine Anmerkungen

Die zur Kontrolle durchgeführten Rohrauslegungsberechnungen erfolgten mit einem eigenen Softwareprogramm, das die Druckfestigkeiten auf Basis der in der API Bulletin 5C3

gegebenen Formeln unter Berücksichtigung der durch Spülungs- bzw. Zementbrühdichten, Biegung, Axiallast und temperaturbedingter Streckgrenzenreduzierung berechnet. Mit dem Programm kann ein vollständiger Match der in der API-Specification 5CT gegebenen Rohrfestigkeitswerte erreicht werden.

Bei den Berechnungen werden auch die WEG-Richtlinien zur Rohrauslegung, die in Deutschland üblicherweise als Standard gelten, berücksichtigt.

Dem entsprechend sind in den Berechnungen folgende Sicherheitsfaktoren (SF) berücksichtigt:

- o Wandstärke 87,5% der Nominalwandstärke
- o Axiallast Rohr SF = 1,25
- o Axiallast Verbinder SF = 1,6 für Rohrdurchmesser < 13 3/8“, darüber 1,8
- o Innendruck Rohr SF = 1,1
- o Außendruck Rohr SF = 1,0

Da Formations- und Spülungsdrücke teufenproportional zunehmen – und hierfür die TVD relevant ist – wurden die Rohrberechnungen für die jeweils angegebene TVD-Rohrschuhteufe vorgenommen. Der hydrostatische Druck berechnet sich nach der bekannten Formel

$$P_{\text{hydrostat}} = \rho \times g \times h$$

mit ρ = Dichte des Fluids, g = Erdbeschleunigung und h = Höhe (hier: TVD). Für die Berechnung der Rohrtourlängen und Bohrteufen wurde der realisierte Bohrfad angenommen (s. *Anlage 1*).

Weiter wurden bei den vorliegenden Berechnungen die temperaturbedingte Festigkeitsreduktion und die Biegespannung durch im realen Bohrlochverlauf zu unterstellende Knicke („doglegs“) berücksichtigt. Für die Temperatur wurde für die Endteufe von 5550m ein Wert von 145°C genommen, Zwischenwerte wurden linear interpoliert.

Die Rohrauslegungsberechnungen berücksichtigen für alle Rohre eine Biegebelastung durch „doglegs“, wie sie sich auch beim ungerichteten Bohren und beim Bohren von Tangentialektionen durch Neigungs- und Richtungsänderungen im Bohrlochverlauf ergeben und die zu einer Biegebeanspruchung der Rohre führen. Dabei wurde für Rohre, die in Neigungsaufbausektionen eingebaut bzw. durch diese hindurch geführt wurden, eine Verlaufsänderung (Dogleg-Severity = DLS) von 1°/10m und für andere Sektionen 0,5°/10m veranschlagt.

Für alle Berechnungen wurde eine temperaturbedingt auftretende Reduzierung der Materialstreckgrenze berücksichtigt, die sich nach der Formel

$$R_{p_{\text{warm}}} = R_p / 20^{b \cdot T^b}$$

mit $b = 0,05$ errechnet und erfahrungsgemäß die real auftretenden Warmstreckgrenzreduktionen der üblichen Rohrmaterialien gut wiedergeben.

Die Belastungen und die Rohrbelastbarkeitsgrenzen sind in den betreffenden Anlagen (Anlagen 3, 6, 8, 10 und 12) grafisch als Funktion der Teufe dargestellt; zu den Rohrauslegungsgrafiken seien zum besseren Verständnis einige Erläuterungen gegeben. Die jeweils für die Berechnungen benutzten Werte sind im oberen Teil der Berechnungen wiedergegeben. Sofern die Rohrtouren zementiert werden, ist auch die Außendruckbelastung am Ende der Zementation (Annahme: Zement flüssig) berechnet worden; die betreffenden Berechnungen sind jeweils in den Grafiken b) der o.g. Anlagen gezeigt.

Grundsätzlich sind in den grafischen Darstellungen immer zwei korrespondierende Kurven miteinander zu vergleichen: die aus den Annahmen abgeleitete Belastung und die durch die Rohrauswahl gegebene Belastbarkeit. Im einzelnen sind zu vergleichen:

- Außendruck: „p a wirk“ (= wirksamer Außendruck) mit „p c“ (= Kollapsfestigkeit)
- Innendruck: „p i wirk“ (= wirksamer Innendruck) mit „p b“ (= Berstfestigkeit)
- Last: „Zugfestigkeit eff“ mit „Last in Spülung“.

Gleiches gilt für die Außendruckbelastung bei der Zementation; hier wird die Kollapsfestigkeit jeweils mit der sich aus Außendruck (Zementbrühe/Spülung im Ringraum) und Innendruck (Spülung im Rohr) ergebenden effektiven Außendruckbelastung der Rohrtour verglichen. In allen Fällen gilt: Wenn die Belastungskurve links von der Belastbarkeitskurve liegt, kann die Auslegung als sicher angesehen werden. Wandstärkenmindernder Verschleiß und/oder Lochfraß- bzw. abtragende Korrosion wurde dabei nicht berücksichtigt, da diese von diversen, derzeit nicht bekannten Einflussfaktoren abhängen.

Als „Zugfestigkeit eff“ ist jeweils der geringste Festigkeitswert von Rohrkörper oder Rohrverbinder unter Berücksichtigung der oben genannten Sicherheitsfaktoren dargestellt.

Zur Erläuterung der Kurvenverläufe wird noch darauf hingewiesen, dass bei der Außendruckbelastung die höchste zu erwartende Belastung („worst case“ = maximales Leerlaufen der Rohrtour) gezeigt ist; bei der Innendruckbelastung ergibt sich die gezeigte Kurve als „Einhüllende“ der betrachteten Lastfälle und stellt somit ebenfalls die „worst case“-Auslegung dar, da sie zeigt, ob für alle betrachteten Lastfälle die Auslegung ausreichend ist.

Grundsätzlich gilt für die Nachberechnungen: Als „Spüldichte bei Einbau“ ($s_{G_{\text{einbau}}}$) wurde die in den Tagesberichten am Einbautag der Rohre angegebene Wert genommen; als „Spüldichte beim Weiterbohren“ die Dichte der Spülung beim nächsten Rohreinbau. Einen Überblick über die eingebauten Rohrtouren und deren Absetzteufen gibt die nachfolgende Abbildung 3.

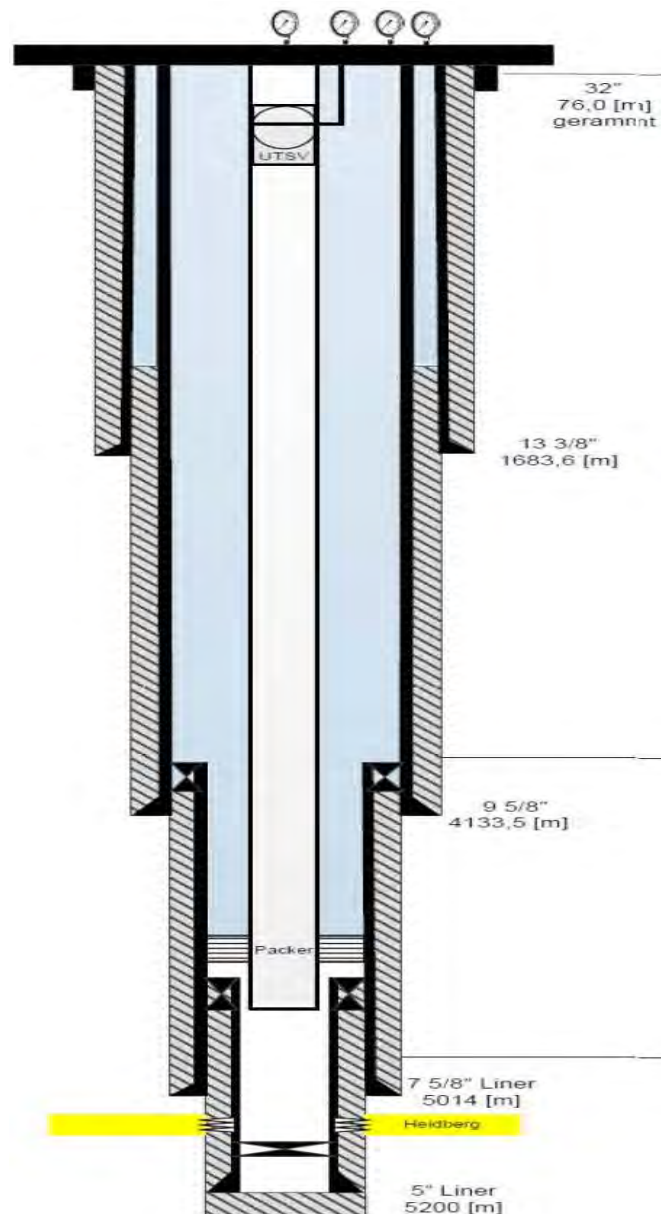


Abbildung 3: Verrohrungsschema der Bohrung Völkersen Nord Z3 [1]

Wie im Kapitel 1.1, Abschnitt „Generelle Anforderungen an Bohrungsverrohrungen“ bereits beschrieben, unterliegen Standrohre keinen besonderen Auslegungskriterien. Aus diesem Grund wird im Folgenden das in der o.g. Abbildung gezeigte 32“-Standrohr, das bis 76m eingerammt wurde, nicht näher behandelt.

13 3/8“-Ankerrohrtour

Die Ankerrohrtour dient im Zuge des Abteufens der Bohrung der frühestmöglichen Absicherung der Bohrung gegen Bohrlochausbrüche durch Installation der Bohrlochsicherung (Blow-out-Preventer) direkt nach Einbau und Zementation der Rohrtour. Demzufolge muss die Rohrtour in der Lage sein, die Innendruckbelastung durch eine eventuelle Zuflusssituation (Kick) auszuhalten ohne zu bersten. Dieser Aspekt verliert seine Relevanz mit Einbau und Zementation der nächsten zutage geführten Rohrtour (hier die 9 5/8“-Produktionsrohrtour). Als Außendruckbelastung wird maximal die sich nach dem Prinzip der kommunizierenden Röhren („U-Rohr-Prinzip“) ergebende Differenz der Säulendrücke aus Spülungsdichte außen (= maximal die Spülungsdichte bei Einbau der Rohrtour) und durch Spülungsverluste beim Weiterbohren verursachte Spiegelabsenkung innen wirksam. Der daraus resultierende Außendruckverlauf ist grafisch dargestellt (grüne Linie).

Die Rohrtour ist durchgängig mit hydraulisch dichten BTC-Verbindern ausgerüstet; eine Gasdichtheit war hier nicht erforderlich, da in der aus der Ankertour heraus führenden Bohrphase keine gasführenden Schichten erwartet wurden.

Für den Zeitraum nach Beendigung der Bohrarbeiten ist bei einer Ankerrohrtour primär die axiale Lastaufnahmekapazität von Interesse, da auf dem Bodenflansch, der auf dem Rohrkopf der Ankerrohrtour installiert wird, alle weiteren zutage geführten Rohrtouren abgehängt werden und auch der Bohrlochkopf aufgebaut wird. Da zudem die Ankerrohrtour im Bereich des Standrohres/Kellerbodens erfahrungsgemäß häufig Außenkorrosion unterliegt, ist von Zeit zu Zeit die Restwandstärke des Kopfrohrs bzw. der Korrosionsschutz zu überprüfen.

Die 13 3/8“-Rohrtour wurde bis 1683,55m eingebaut, die Spülungsdichte (sG_{einbau}) betrug zu dem Zeitpunkt 1,17 kg/l; zum Einbau kamen die in *Anlage 2* (Einbauliste) beschriebenen Rohre. Warum Rohrschuh und Collar aus dem höherwertigen Material L80 verbaut wurden, obwohl direkt darüber nur Rohre aus der festigkeitsmäßig ausreichenden Werkstoffgüte K55 eingebaut wurden, ist nicht mehr definitiv festzustellen, dies mag aber auf Verfügbarkeitsgründen beruhen. Die Rohrtour wurde bis zutage zementiert (Stinger-Zementation mit 18m³ Spacer, 182m³ Lead-Zement 1,6 kg/l und 20m³ Tail-Zement 1,9 kg/l. Am 15.01.1998 wurde unterhalb des Rohrschuhs nach Aufbohren ein Formationsgradiententest bis 1,9 bar/10m äquivalentem Druck durchgeführt.

Die – nach Fertigstellung der Bohrung eigentlich nicht mehr relevanten – Drucksituationen der Rohrtour sind in *Anlage 3*, Grafik 1, gezeigt; es ist ersichtlich, dass die Rohrtour den während des Teufens der Bohrung erwarteten Ansprüchen genügt. Die leichte

Überschneidung der schwarzen mit der blauen Linie bei ca. 750m ist als unkritisch anzusehen, da hier bei der Nachrechnung der Rohrtour auf Innendruck die schärfsten anwendbaren Kriterien (40% Leerlaufen bei Gaskick und Substitution der Spülung im leeren Rohrabschnitt durch Gas entsprechenden Porendruckes) benutzt wurden. Oftmals werden – wie auch in den WEG-Richtlinien für die Rohrauslegung vorgesehen – bei der Planung der Rohrtouren einer Bohrung in bereits durch andere Bohrungen erschlossene Areale die daraus gewonnenen Erkenntnisse zu Druckgradienten und potenziellen Zuflüssen genutzt, die i.d.R. deutlich unter den Maximalkriterien liegen. Möglicherweise war hier bei der ursprünglichen Rohrauslegung daher von einer etwas geringeren Spüldichte beim Weiterbohren ausgegangen worden; im vorliegenden Fall würde z.B. bei angenommener Spüldichte von 1,83 kg/l statt der später tatsächlich benutzten Maximaldichte von 1,86 kg/l die blaue Kurve keine Überschreitung der schwarzen Linie mehr ergeben. Auch ist zu berücksichtigen, dass bezogen auf Innendruck eine „dreifache“ Sicherheit in den Berechnungen einbezogen ist:

- 1) wird nur eine Wandstärke von 87,5% der Nominalwandstärke berücksichtigt,
- 2) wird nach WEG-Richtlinie ein Sicherheitsfaktor von 1,1 angesetzt, und
- 3) wird lediglich die Mindeststreckgrenze als Materialfestigkeit veranschlagt; die reale Festigkeit liegt aber i.d.R. darüber.

Im übrigen hätte bei Auftreten eines entsprechenden Kicks beim Auszirkulieren über die Chokeline der in der Rohrtour auftretende Innendruck begrenzt werden können.

Im Gegensatz zu der Innendruckfestigkeit der 13 3/8“-Rohrtour, die mit Einbau der 9 5/8“-Rohrtour ihre Bedeutung verlor, ist die Lastkapazität des Ankerrohrtour-Kopfes auch heute noch relevant. Eine erste Untersuchung zur Standsicherheit und Mindestrestwandstärke des Ankerrohrs wurde bereits 2007 durchgeführt und ergab das folgende Resultat.

(Zitat aus Anlage 4):

„Die Ankerrohrtour besteht am Kopf aus 13 3/8“-68# L-80-Rohren mit BTC-Verbindern.

Eine Stützplatte ist installiert.

Die ermittelte Gesamtabsetzlast beträgt einschließlich angenommener 50 kN für

Verflanschung und Bohrlochkopf 3719 kN (s. Anlage 1). Die L-80-Rohre weisen bei

Nominalwandstärke – bezogen auf die nominelle Rohrstreckgrenzenlast – eine Sicherheit von 1,86 auf.

Diese Last kann unter Zugrundelegung der min. Yield Strength von 80 ksi und eines Sicherheitsfaktors von 1,1 ab einer mittleren Restwandstärke von ca. 7,3 mm sicher vom Rohr getragen werden (s. Anlage 2). Bezogen auf die min. Yield Strength ist damit eine Wandstärkenreduktion von ca. 40 % zu tolerieren.

Bezogen auf die min. Tensile Strength von 95 ksi wäre bei einem Sicherheitsfaktor von 1,1 eine mittlere Restwandstärke von ca. 6,2 mm als Mindestwert anzusehen.“

Übersichtstabelle	
<i>ermittelte Gesamtabsetzlast</i>	3719 kN
<i>SI bezogen auf nominelle Rohrstreckgrenze und Nominal-Wandstärke</i>	1,86
<i>Relative Auslastung des Rohrkörpers (bezogen auf min. Yield Strength)</i>	53,7 %
<i>Nominalwandstärke der Kopfrohre der Ankerrohrtour</i>	12,19 mm
<i>minimale mittlere Restwandstärke (bei min. Yield Strength; SF = 1,1)</i>	7,32 mm
<i>tolerierbare Wandstärkenreduktion (bei min. Yield Strength; SF = 1,1)</i>	39,98 %

(Zitat Ende)

Die Situation direkt nach der Zementation (schwere Zementbrühe außen, noch flüssig; innen leichtere Spülung) ist in *Anlage 3*, Grafik 2, gezeigt; man sieht, dass die aus der höheren Fluiddichte außen resultierende Außendruckbelastung für die Rohre unkritisch ist.

Somit erfüllte die 13 3/8“-Rohrauslegung unter Berücksichtigung der nach WEG empfohlenen Sicherheitsfaktoren (s. Kapitel 2.1 Nachberechnung der Futterrohre; Absatz „Allgemeine Anmerkungen“) zum Zeitpunkt der o.g. Untersuchung die Anforderungen einer Ankerrohrtour.

Neuere Messungen zur Wandstärke wurden nach tel. Auskunft von [REDACTED] (RWE-Dea Langwedel; 28.06.2013) seither noch nicht wieder durchgeführt, so dass eine erneute aktuelle Überprüfung bisher nicht vorgenommen werden konnte.

9 5/8“-Produktionsrohrtour

Die 9 5/8“-Rohrtour wurde bis 4133,5m eingebaut, die Spüldichte (sG_{einbau}) betrug dabei 1,86 kg/l; zum Einbau kamen die in *Anlage 5* (Einbauliste) beschriebenen Rohre.

Die Zementation der Rohrtour erfolgte als 3-Stopfenzementation (Spacer zwischen 2 Vorstopfen) mit 10,2m³ Spacer und 89,4m³ Zementbrühe 2,04 kg/l (133,32 t Mischzement).

Die Rohre wurden mit 291 t in den Keilen abgehängt. Der Zementkopf wurde mit Temperatur-Log am 25.02.98 bestimmt und nach Tagesbericht bei 1580m festgestellt. Am 27.02.1998 wurde nach Aufbohren unterhalb des Rohrschuhs ein Formationsgradiententest bis 2,3 bar/10m äquivalentem Druck durchgeführt.

Die 9 5/8“-Rohrtour war als Produktionsrohrtour vorgesehen und wurde entsprechend nachgerechnet. Dies bedeutet, dass außen die bei Rohreinbau im Bohrloch befindliche

Spülungsdichte berücksichtigt wird, während die Rohrtour innen als leer (ohne inneren Stützdruck) betrachtet wird. Zusätzlich wird im Bereich von potenziell drückenden Formationen (in Salinarstrecken und plastischen Tonen) eine Dichte außen entsprechend 2,3bar/10m angenommen, um so den mittleren lithostatischen Säulendruck als Außendruck anzunehmen. Die erhöhte Kollapsfestigkeit in diesen Bereichen wird durch besonders dickwandige Rohre erzielt, wenn normalwandige Rohre auch hoher Gütestufe nicht mehr ausreichen; deshalb sind insbesondere in den unteren Abschnitten die schweren Rohre (109 lb/ft) mit 10 ¾“-Außendurchmesser und Wandstärken von ca. 26 mm eingebaut. So konnte der für das Weiterbohren benötigte Innendurchmesser von ca. 8 3/8“ beibehalten werden. Die Innendruckfestigkeit muss dem initialen Gasdruck unter Lagerstättenbedingungen standhalten können.

Wie Anlage 6, Grafik 1, zeigt, erfüllt die Rohrauslegung unter Berücksichtigung der nach WEG empfohlenen Sicherheitsfaktoren (s. Kapitel 2.1 Nachberechnung der Futterrohre; Absatz „Allgemeine Anmerkungen“) über die gesamte Länge alle Anforderungen einer Gasproduktionsrohrtour. Die Grafik verdeutlicht dies dadurch, dass die jeweiligen Belastungslinien in jeder Teufe links von der korrespondierenden Belastbarkeitslinie liegt. So liegt die „Kollapsfestigkeitslinie“ (rot) immer rechts von der „Außendruckbelastungslinie“ (grün). Gleiches gilt für die „Berstdrucklinie“ (schwarz) in Bezug zur „Innendruckbelastungslinie“ (blau) und die „Zugfestigkeitslinie“ (dünne schwarze Linie) in Relation zur Linie „Last in Spülung“ (violett).

Auf die Kollapsfestigkeit bezogen bedeutet Auslegung als Gasproduktionsrohrtour, dass die Rohrtour innen völlig leer – also ohne Stützdruck innen – angenommen wird; dies stellt die höchstmögliche Anforderung an die Kollapsfestigkeit dar.

Die „Außendruckbelastungslinie“ (grün) weist in den TVD-Bereichen von 1707m bis 1939m und unterhalb 2373m bis Rohrschuh ein höheres Druckniveau auf als in den anderen Teufenbereichen. Der Grund hierfür ist darin zu sehen, dass in diesen Teufenbereichen dickwandigere Rohre vorgesehen wurden, um so eventuell erhöhten Kollapsdrücken in dort vorhandenen Salinarstrecken vorzubeugen. Hier wurde das „Salinarkriterium“ angewandt, das als Außendruckgradient 2,3 bar/10m veranschlagt; in den anderen Teufenbereichen wurde als Außendruckgradient das Äquivalent zu der Spülungsdichte bei Rohreinbau (1,86 kg/l) benutzt.

Ein Vergleich des nach Bohrberichten geteufte geologischen Profils mit den Strecken, in denen dickwandige Rohre eingebaut wurden, zeigt, dass hier eine gute Übereinstimmung zu Salzstrecken vorliegt:

- Ab 1637,5m Ob. Muschelkalk (mit Muschelkalk-Salinar)
- Ab 1928m Mittlerer Buntsandstein
- Ab 2055m Unterer Buntsandstein
- Ab 2381m Zechstein (Übergangsfolge)
- Ab 2469m Zechstein-Salinar

Zu der Grafik ist anzumerken, dass aufgrund der Beschränkung des zur Nachrechnung benutzten Computerprogramms auf 8 Elemente (Rohrschuh und sieben weitere verschiedene Rohrabschnitte) jeweils einige Rohrabschnitte zusammengefasst dargestellt werden mussten; dies Zusammenfassen wurde jedoch so vorgenommen, dass dadurch die Aussagekraft der Auslegungsüberprüfung nicht beeinträchtigt wurde (am Kopf wurde der aus Material MW125 gefertigte Rohrübergang von 10 ¾“ auf 9 5/8“, der stärker ist als die darüber eingebauten P110-Rohre, vernachlässigt; die P110-Rohre zwischen den MW125-Rohren im Teufenbereich von 1707,77m bis 1940,35m wurden vernachlässigt und statt dessen die gesamte Länge als „Salinar“ angesehen. Für die nicht-salinare Zwischenlage reichen, wie direkt im Bereich darunter gezeigt ist, die 53,5 lb/ft-P110-Rohre).

Wie für Produktionsrohrtouren in Gasförderbohrungen üblich kamen nur gasdichte Verbinder mit metallischem Dichtsitz zum Einsatz.

Die Situation direkt nach der Zementation (schwere Zementbrühe außen, noch flüssig; innen leichtere Spülung) ist in *Anlage 6, Grafik 2*, gezeigt; man sieht, dass die aus der höheren Fluidichte außen resultierende Außendruckbelastung aufgrund der geringen Dichteunterschiede nur marginal und daher für die Rohre unkritisch ist.

7 5/8“-Produktionsliner

Der 7 5/8“-Liner ist als Produktionsliner ausgelegt; die Auslegungskriterien sind damit prinzipiell die gleichen wie bereits bei der 9 5/8“-Produktionsrohrtour erläutert. Die Spüldichte (sG_{Einbau}) betrug 2,04 kg/l; die Einbaufolge des Liners, der von 4036,1m bis 5014m reicht, ist in *Anlage 7* gezeigt. Die Zementation erfolgte mit 3m³ Spacer 2,1 kg/l und 22,3m³ Zement 2,1 kg/l (19,756 t HOZ).

Da der Liner durchgängig mit Dickwandrohren bestückt ist, wurde bei der Auslegungsnachberechnung über die gesamte Linerlänge das „Salinarkriterium“ (Dichte außen entsprechend 2,3bar/10m) angenommen. Wie aus der *Anlage 8, Grafik 1* ersichtlich erfüllt die Rohrauslegung die Kriterien vollständig; eine Ausnahme bildet lediglich der Linerkopf. Anzumerken ist hier, dass nach tel. Rücksprache mit RWE-Dea, [REDACTED], in *Anlage 7* die Wandstärke des Linerhängerteils – die obersten 3m – falsch eingetragen ist; hier handelt

es sich um Material, das äquivalent zu 7“ 35 lb/ft der Gütestufe Q125 ist (konstruktiv kann ein Linerhänger für den Einbau in 9 5/8“ nicht mit 7 5/8“ OD und 20,6mm Wandstärke ausgeführt werden). Die Nachberechnung wurde daher entsprechend 7“ 35 lb/ft Q125 vorgenommen. Wie aus der Anlage 8 ersichtlich erfüllt dies Teil das Salinarkriterium nicht vollständig; dies ist jedoch unkritisch, da der Linerhänger in den in diesem Abschnitt der 9 5/8“-Rohrtour eingebauten 10 3/4“-Dickwandrohren abgehängt ist, die selbst bereits das Salinarkriterium erfüllen. Auch hier ist der Einbau der Dickwandrohre dem Antreffen von Salinarstrecken geschuldet, wie die nach Bohrberichten geteufte Geologie zeigt:

- Ab 2469m Zechstein-Salinar
- Bis ca. 4908m Anhydrit
- Bis 4921m Steinsalz
- Ab ca. 4986m Werra-Anhydrit.

Da der Liner als Produktionsliner einer Gasförderbohrung konzipiert war, kamen wie auch schon für die vorherige 9 5/8“-Produktionsrohrtour ausschließlich gasdichte Verbinder mit metallischem Dichtsitz zum Einsatz.

Die Situation direkt nach der Zementation (schwere Zementbrühe außen, noch flüssig; innen leichtere Spülung) ist in *Anlage 8*, Grafik 2, gezeigt; man sieht, wie schon bei der 9 5/8“-Produktionsrohrtour, dass die aus der höheren Fluidichte außen resultierende Außendruckbelastung aufgrund der geringen Dichteunterschiede - und aufgrund der kurzen Linerlänge geringen Höhe - nur marginal und daher für die Rohre unkritisch ist.

5“-Produktionsliner

Auch der 5“-Liner ist als Produktionsliner ausgelegt; die Auslegungskriterien sind damit prinzipiell die gleichen wie bereits früher erläutert. Die Spülungsdichte ($s_{G_{\text{Einbau}}}$) betrug 1,44 kg/l; die Einbaufolge des Liners, der von 4990,6m bis 5200m reicht, ist in *Anlage 9* gezeigt. (Anmerkung: Die erreichte Bohrloch-Teufe betrug zwar 5550m, da der untere Teil aber verwässert angetroffen worden war, verzichtete man auf eine Überdeckung dieses Bereichs mit dem Liner). Die Zementation erfolgte nach Zementationsbericht mit 2,34m³ Spacer 1,61 kg/l und 4m³ Zement 2,04 kg/l (5,22 t Class G).

Da der Liner unterhalb der Salinarstrecken eingebaut wurde, kam hier das „Salinarkriterium“ nicht zur Anwendung. Wie aus der *Anlage 10* ersichtlich erfüllt die Rohrauslegung die Kriterien vollständig. Die Grafik verdeutlicht dies wieder dadurch, dass die jeweiligen Belastungslinien in jeder Teufe links von der korrespondierenden Belastbarkeitslinie liegt. So liegt die „Kollapsfestigkeitslinie“ (rot) immer rechts von der „Außendruckbelastungslinie“ (grün). Gleiches gilt für die „Berstdrucklinie“ (schwarz) in Bezug zur

„Innendruckbelastungslinie“ (blau) und die „Zugfestigkeitslinie“ (dünne schwarze Linie) in Relation zur Linie „Last in Spülung“ (violett).

Die Situation direkt nach der Zementation (schwere Zementbrühe außen, noch flüssig; innen leichtere Spülung) ist in *Anlage 10*, Grafik 2, gezeigt; auch hier sieht man, dass die aus der höheren Fluidichte außen resultierende Außendruckbelastung trotz des relativ hohen Dichteunterschieds aufgrund der kurzen Linerlänge nur marginal und daher für die Rohre unkritisch ist.

Da auch dieser Liner als Produktionslinier einer Gasförderbohrung konzipiert war, kamen wie schon für die vorherige 9 5/8“-Produktionsrohrtour und den 7 5/8“-Produktionslinier ausschließlich gasdichte Verbinder mit metallischem Dichtsitz zum Einsatz.

4 1/2“-Tubing

Zum Tubingstrang ist eingangs anzumerken, dass nach Angabe von RWE-Dea zwischenzeitlich (Stand Ende Oktober 2013) beschlossen wurde, definitiv nicht in die Heidberg-Formation injizieren zu wollen, sondern in den Havel-Sandstein. Um dies zu ermöglichen, muss die aktuell in der Bohrung eingebaute Komplettierung ausgebaut werden. Auf die Überprüfung der derzeitigen Komplettierung könnte daher prinzipiell verzichtet werden. Allerdings soll auch für die geplante Nutzungsphase der Bohrung als Injektionsbohrung wieder ein Tubingstrang eingebaut werden, so dass es hier sinnvoll erschien, den vorhandenen Tubingstrang grundsätzlich auf entsprechende Eignung zu untersuchen, zumal dafür eventuell sogar der ausgebaute Strang nach entsprechender Inspektion wieder verwendet werden kann (eine Gasdichtheit der Verbinder ist dann nicht mehr erforderlich, so dass leichte Gebrauchsspuren an den metallischen Dichtsitzen unkritisch sind). Eingangs wird zunächst die prinzipielle Druckberechnung für die ehemals konstruktiv berücksichtigte Auslegung als Gasförderstrang nachvollzogen. Anschließend erfolgt die grundsätzliche Prüfung, ob ein solcher Tubingstrang auch für den Einsatz als Injektionsstrang geeignet ist.

Der aktuell eingebaute Tubingstrang besteht nach Rohrliste (s. *Anlage 11*) durchgängig aus 12,6 lb/ft-Rohren (nom. Wandstärke 6,88 mm), Material Cr13 – 95 mit gasdichtem FOX-Verbinder. Die in *Anlage 12* gezeigte Berechnung gibt die hier besonders interessierende Innendruckfestigkeit (schwarze Volllinie) als Gasförderstrang über die Teufe wieder; sie beträgt demnach ca. 628 bar am Kopf und ca. 572 bar unten in Packerteufe. Hier ist allerdings anzumerken, dass die Innendruckfestigkeitskurve nur die Berstfestigkeit wiedergibt, die ohne Berücksichtigung von Tubinginhalt, dessen hydrostatischen Säulendruck oder eventuellen

Stützdruck von außen gerechnet ist. Des weiteren ist zu berücksichtigen, dass bei der geplanten Verwendung als Injektionsstrang abhängig von der Fließrate sowohl im Strang als auch im Gebirge (im Injektionshorizont) Fließwiderstände auftreten, die durch zusätzlich aufzubringenden Kopfdruck zu überwinden sind. Während die Strömungsdruckverluste im Strang relativ gut berechnet werden können ist der im Injektionshorizont auftretende ratenabhängige Strömungsdruckverlust nur schwierig vorhersagbar; hier ist eine zuverlässige exakte Aussage erst nach einem mehrstufigen Einpresstest zu treffen. Dies ist jedoch unkritisch, da über eine vorläufige Berechnung, wie sie nachfolgend gezeigt ist, leicht festgestellt werden kann, dass die Tubingauslegung ausreichend ist.

Ausgehend von dem maximal zu erwartenden jährlichen Lagerstättenwasservolumen, das nach der folgenden Abbildung 4 [10] bei knapp 140.000m³ im Jahr 2015 liegt und sich danach sukzessive reduziert, ergeben sich tägliche Injektionsvolumina von maximal ca. 380m³/d bei kontinuierlicher Injektion über 24 Betriebsstunden.



Abbildung 4: Prognose der zu injizierenden Wassermengen [10]

Geht man von dem genannten maximalen Wasservolumen von ca. 380 m³/Tag aus, ergibt sich bei einer angenommenen kontinuierlichen Injektion (24 h/d) ein Volumenstrom von ca. 264

l/min; die Injektionsrate sollte damit selbst bei intermittierendem Betrieb eine Rate von 400 l/min kaum überschreiten.

Nach Berechnungen (s. *Anlage 13*) beträgt der Fließwiderstand im Strang bei 400 l/min lediglich ca. 3 – 4 bar und ist damit nahezu vernachlässigbar. Berücksichtigt man, dass sich bei der Verpressung im Strang eine Lagerstättenwassersäule befindet, deren Dichte ca. 1,05 kg/l beträgt [1], und im Ringraum zwischen Tubing und Produktionsrohrtour i.d.R. eine Komplettierungsflüssigkeit mit einer Dichte von ca. 1,02 kg/l, so ergibt sich für eine Vertikalteufe von 4800 m als Differenz zwischen Innen- und Außendruck lediglich eine Innendruckbelastung von ca. 14 bar (s. *Anlage 14*). Die o.g. Innendruckfestigkeit der Tubingrohre von mindestens 572 bar steht demnach fast vollständig zur Überwindung des „Fließwiderstandes“ im Gebirge (Injektionshorizont) zur Verfügung. Rechnerisch kann unter Ausnutzung der Innendruckfestigkeit – ohne Berücksichtigung von Strömungsdruckverlusten im Strang – mit dem Lagerstättenwasser bei 4800 m ein Druckgradient von 0,222 bar/m erzeugt werden, ohne Stützdruck im Ringraum aufbauen zu müssen. Da in Anbetracht der geringen geplanten Injektionsrate nicht davon auszugehen ist, dass sehr hohe Drücke im Gebirge zu überwinden sein werden, ist die geplante Auslegung druckmäßig als sicher und für den Einsatzzweck ausreichend anzusehen. Wie eingangs des Kapitels erwähnt ist allerdings zu beachten, dass durch die Nutzung des Tubings als Injektionsstrang eine deutliche Abkühlung erfolgen kann, die – da der Strang unten im Packer verriegelt und oben im Bohrlochkopf abgehängt ist – zu einer zusätzlichen Zuglast aufgrund der thermisch induzierten Kontraktion führt; hier sei auf die in Kapitel 1.1 gezeigte Abbildung 1 verwiesen, die dies verdeutlicht. Gegebenenfalls muss der Tubingstrang mit geringer(er) Last als bisher erfolgt abgehängt werden, damit bei Abkühlung die zulässige Zuglast des Tubings nicht überschritten wird. Die Auswirkung einer eventuell sich durch die Abkühlung ergebenden zusätzlich wirksam werdenden Zuglast auf dem Bodenflansch/Ankerrohrkopf ist dem gegenüber als unkritisch anzusehen.

Accessoires im Tubingstrang

Neben dem eigentlichen Förderstrang (Tubing) sind im Rahmen einer Integritätsprüfung auch die „Accessoires“ (Flow Couplings, Landenippel, etc.) hinsichtlich der Festigkeiten zu betrachten. Hier sind die jeweils verwendeten Material-/Wandstärkenkombinationen und die daraus resultierenden Innen- und Außendruckfestigkeiten (im Vergleich zum Tubingrohr) zu bewerten.

Im vorliegenden Fall wird darauf jedoch verzichtet, da, wie bereits im vorhergehenden Kapitel „4 ½“-Tubing“ erwähnt, die aktuelle Komplettierung vor Nutzung der Bohrung als Injektionsbohrung ersetzt werden soll.

Die in *Anlage 15* [5] gezeigte Liste gibt die im Tubingstrang verbauten Elemente mit einigen Details wieder. Flow Couplings und Landenippel werden i.d.R. aus Material mindestens gleichwertiger Festigkeit wie der Tubing, jedoch mit höheren Wandstärken gefertigt und verfügen deshalb generell über höhere Druckfestigkeiten. Diese Teile sind daher hier zur Beurteilung der Bohrungsintegrität hinsichtlich der geplanten Nutzung als Injektionsbohrung nicht von primärem Interesse.

Jedoch soll im Hinblick darauf diskutiert werden, ob die Installation eines Untertage-Sicherheitsventils, wie sie bei Nutzung als Gasförderbohrung unstrittig ist, im Fall der geplanten Nutzung als Injektionsbohrung erforderlich ist. Bei der derzeit noch im Bohrloch befindlichen Komplettierung ist dieses Sicherheitsventil in einem Landenippel (*Anlage 15*; Teil Nr. 7) in ca. 49 m Teufe abgesetzt.

Der initiale Lagerstättendruck im Havelsandstein betrug vor Aufnahme der Gasförderung ca. 654 bar; aktuell beträgt er noch ca. 200 bar. Bezogen auf die Vertikalteufe von ca. 4750 m betrug der initiale Druckgradient damit rund 0,138 bar/m (s. *Anlage 16*, Fall 1). Der aktuelle Druckgradient beträgt nur noch ca. 0,042 bar/m (s. *Anlage 16*, Fall 2). Wie in Fall 3 der *Anlage 16* gezeigt, entspricht dem aktuellen Lagerstättendruck eine Flüssigkeitssäule aus Lagerstättenwasser mit einer Dichte von 1,02 kg/l von ca. 2000 m Länge. Das heißt aber, dass selbst ein Absinken des Wasserspiegels in Zeiten ohne Lagerstättenwasser-Injektion bis auf ca. 2750 m toleriert werden könnte, ohne dass ein Gaszutritt in die Bohrung erfolgt. Es empfiehlt sich daher, nach Entfernen der jetzigen Komplettierung - und noch vor einer endgültigen Umkomplettierung - zu testen, wie das Abströmverhalten bei Unterbrechung der Injektion sich darstellt; abhängig von dem Ergebnis und der sonstigen Gestaltung der Injektionsleitung über- und untertage kann ggf. auf ein Untertage-Sicherheitsventil verzichtet werden.

2.2 Sicherheitsbetrachtung für Packer und sonstige Dichtelemente

Die in der Bohrung aktuell vorhandenen Dichtelemente sind in *Anlage 17a* gezeigt. Wie ersichtlich sind die beiden Liner (7 5/8“ und 5“) jeweils mit einem Linerkopfpacker ausgerüstet. Diese dienen sowohl der Verhinderung von Gasmigration während des Abbindeprozesses des Zementes als auch als Abdichtung danach. Die Linerkopfpacker wurden nach den vorliegenden Berichten am Ende der jeweiligen Zementation

ordnungsgemäß gesetzt. Die Dichtheit der Linerkopfpacker wurde durch Druckproben mittels Einsatz einer jeweils speziellen Packergarnitur (RTTS-Packer) und Druckprobe mit klarem Wasser nachgewiesen; eine genauere Beschreibung der Druckteste ist im Kapitel 2.5 „Zementationen“ gegeben.

Zusammen mit dem Tubingstrang wurde ein 7“-Produktionspacker (Baker; Typ SB-3) eingebaut.

Der Packer ist nach [6] für Differenzdrücke bis zu 10.000 psi (= 690 bar) konstruiert und entspricht im Prinzip dem Typ DB, ist allerdings für hydraulisches Setzen konzipiert; er ist nachfolgend gezeigt; weitere Detailinformationen sind der *Anlage 17b* [6] zu entnehmen.



Abbildung 5: Produktionspacker (Baker; Typ SB-3) [6]

Die Dichtheit des Produktionspackers kann durch Druckprobe nachgewiesen werden; dies erfolgt üblicherweise direkt nachdem der Setzvorgang abgeschlossen wurde.

Gleiches gilt im Prinzip für alle sonstigen Dichtelemente.

Die Festlegung der Testdrücke sollte sich nach den Erfordernissen richten, insbesondere wenn bereits Betriebserfahrungen vorliegen. Eine bedarfsgerechte Auslegung vorausgesetzt sollten jedoch grundsätzlich Druckproben auf ein System nur mit dem kleinsten maximal zulässigen Druck aller beaufschlagten Elemente vorgenommen werden, sofern nicht einzelne Elemente separat getestet werden können; letzteres ist prinzipiell zu bevorzugen, aber nicht immer möglich bzw. mit erheblichem Aufwand verbunden.

Die Dichtheitstests der Systeme „Bohrung“ und „Förderstrang“ können separat vorgenommen werden, indem auf den Ringraum (Test des Systems „Bohrung“) bzw. auf den Tubingstrang (Test des Systems „Förderstrang“) Druck aufgebracht wird. Bei hydraulischen Druckproben (üblicherweise mit Wasser) ist allerdings zu beachten, dass aufgrund der Inkompressibilität des Wassers, der Elastizität von Stahl und der thermischen Ausdehnung beider sich durchaus korrespondierende Reaktionen im Nachbarsystem zeigen können. So kann z.B. ein Drucktest auf den Tubing durch „ballooning“ des Tubingstrangs auch zu einer gewissen Druckerhöhung im Ringraum (System „Bohrung“) führen, da das Ringraumvolumen hierdurch etwas verringert wird.

2.3 Sicherheitsbetrachtung für den Bohrlochkopf und das E-Kreuz

Für diese Elemente ist die Beurteilung der druckmäßigen Eignung besonders einfach, da sie nach Nenndruckstufen eingeteilt hergestellt werden; üblicherweise in Schritten zu je 1000 psi. Für die Festlegung der Testdrücke gilt auch hier das oben bereits Ausgeführte.

Im konkreten Fall handelt es sich um den folgenden Aufbau [2]:

- Flansch 11“ 10.000psi, montiert auf der 9 5/8“-10 3/4“-Produktionsrohrtour
- Abschlussvorrichtung, mit Seitenabgang 2 1/16“ 10.000psi
- E-Kreuz 4 1/16“ 10.000psi des Herstellers Cameron.

Der Aufbau ist auch aus der nachfolgend gezeigten Skizze (Abbildung 6) ersichtlich.

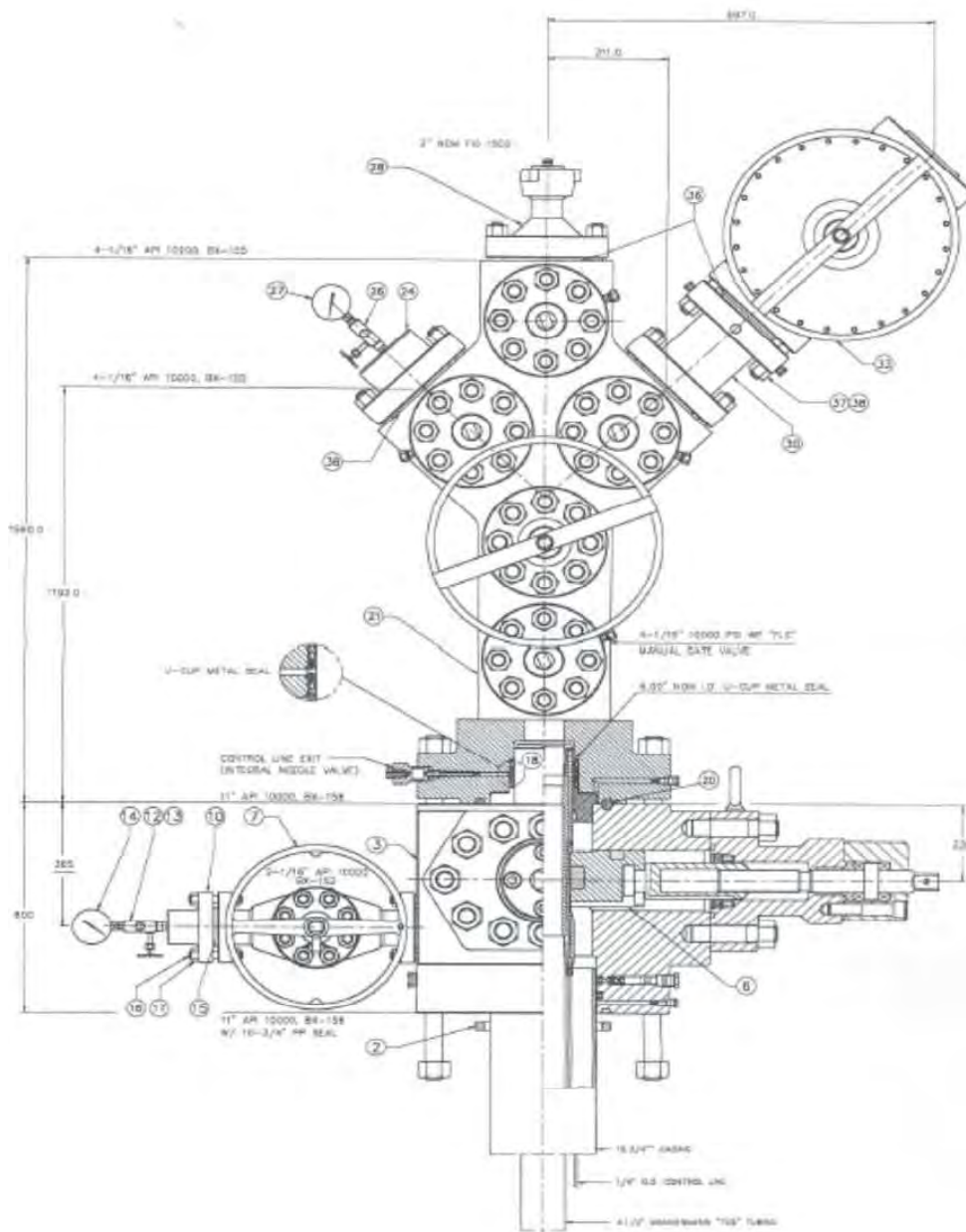


Abbildung 6: Aktueller Bohrlochkopfaufbau der Druckstufe 10.000 psi [2]

Somit ist die gesamte Absicherung ab dem Kopf der Produktionsrohrtour in 10.000psi-Druckstufe ausgeführt (das entspricht 690bar).

Dieser Wert korrespondiert gut mit der rechnerisch nachgewiesenen Innendruckfestigkeit der 9 5/8“-10 3/4“-Produktionsrohrtour, die bei ca. 640bar liegt, wobei diese Druckfestigkeit für den „Warmzustand“ berechnet wurde, während die 10.000psi ein Nominalwert ohne Berücksichtigung der temperaturinduzierten Festigkeitsreduzierung darstellt.

Die Liner (7 5/8“ und 5“) weisen eine noch höhere Innendruckfestigkeit auf, die sich jedoch aufgrund der Auslegung dieser Rohrtouren, die prioritär auf hohe Kollapsfestigkeit erfolgte, automatisch ergab.

2.4 Bewertung der Zentrierung der Rohrtouren

Wie die Auswertung der Bohrlochverlaufsmessung ergab (s. *Anlage 18*) weist der Bohrlochverlauf insgesamt nur geringe bis moderate DLS-Werte auf. Selbst in den Neigungsaufbausektionen (ca. 3600 – 4000m und ca. 5100 – 5400m) werden DLS-Werte von nur wenig mehr als 1°/10m registriert; die Maximalwerte liegen knapp unter 1,3°/10m. Diese niedrigen Werte stellen eine gute Grundvoraussetzung für eine gute Rohrzentrierung als Voraussetzung für eine gute Zementation dar. Nachfolgend werden die einzelnen Rohrzentrierungen analysiert und bewertet. Zur Analyse wurde ein eigenes Computerprogramm benutzt, das den „stand-off“ unter Berücksichtigung der Geometrie aus Nominalbohr- und Verrohrungsdurchmesser, der Normalkraft, die aufgrund der Krümmungen und Neigungen im Bohrlochverlauf im Rohr erzeugt wird, und der Federkraft (restoring force) der Centralizer (s. *Anlage 19a/b*) berechnet.

13 3/8“-Ankerrohrtour

Die Rohrtour wurde bis 1683,55m eingebaut.

Nach Rohreinbauliste (s. *Anlage 20a*) sind die untersten beiden Rohre mit 2 Centralizern/Rohr ausgerüstet, darüber bis zum 18. Rohr wurde je Rohr 1 Centralizer montiert. Auf den restlichen Rohren im offenen 17 1/2“-Bohrloch ist auf jedem 2. Rohr ein Centralizer installiert. Dies führt insgesamt zu einer recht guten Zentrierung, wie *Anlage 20b/c* zeigen; allerdings zeigt die Grafik auch deutlich, dass selbst moderate DLS-Werte aufgrund der hohen Biegesteifigkeit der 13 3/8“-Rohre bereits zu einer deutlichen Absenkung der „stand-off“-Werte führen. Insgesamt ist aber die Zentrierung für eine oberflächennahe Rohrtour, bei der üblicherweise keine Gasdichtheit benötigt wird, gut und sollte eine gute Zementation ermöglicht haben.

9 5/8“-Produktionsrohrtour

Die Rohrtour wurde wie in Abbildung 3 gezeigt bis 4133,5m eingebaut.

Nach Rohreinbauliste (s. *Anlage 21a*) sind die untersten 42 Rohre mit je 1 Centralizer/Rohr ausgerüstet, darüber im offenen 12 ¼“-Bohrloch bis in die 13 3/8“-Rohre wurde auf jedem 3. Rohr ein Centralizer installiert. Die Berechnung (*Anlage 21b*) und die Grafik (*Anlage 21c*) zeigen insgesamt eine sehr gute Zentrierung, die nahezu durchgängig über 80% liegt; lediglich im Bereich des Neigungsaufbaubeginns ab ca. 3560m, in dem nur auf jedem 3. Rohr ein Centralizer montiert ist, ergibt sich biegungsbedingt eine – allerdings unkritische – Reduzierung des Zentrierungsgrades, da die Bereiche darunter und darüber sehr gut zentriert sind.

7 5/8“-Produktionsliner

Der Liner reicht von 4036,1m (Linerkopf) bis 5014m (Schuhteufe).

Nach Rohreinbauliste (s. *Anlage 22a*) sind alle Rohre mit je 1 Centralizer/Rohr ausgerüstet. Die Angaben zum Centralizertyp („7 5/8“-MUST Spezial“) sind aus *Anlage 19b* ersichtlich; mit diesen wurden die Berechnungen vorgenommen, die in den *Anlagen 22b* und *c* gezeigt sind. Das „stand-off“ liegt überwiegend bei ca. 90%, die Zentrierung ist damit auch für die schweren und biegesteifen Rohre als ausgezeichnet anzusehen und bietet daher beste Voraussetzungen um eine gute Zementation zu ermöglichen.

5“-Produktionsliner

Nach Rohreinbauliste (s. *Anlage 23a*) sind alle Rohre mit je 1 Centralizer/Rohr ausgerüstet. Die Angaben zum Centralizertyp sind falsch; es handelt sich hierbei nicht um Centralizer für 7 5/8“-MUST-Rohre, sondern um Centralizer für 5“-EXL-Rohre, die lediglich durch 7 5/8“-MUST-Rohre eingebaut werden mussten und im Überlappungsbereich auch in diesen blieben. Es wurden daher plausible Annahmen zu den verwendeten Centralizern getroffen. Berechnung (*Anlage 23b*) und Grafik (*Anlage 23c*) zeigen insgesamt eine sehr gute Zentrierung, die nahezu durchgängig über 80% liegt.

2.5 Bewertung der Zementationen

Nach Informationen von RWE-Dea wurden damals, als die Bohrung geteuft wurde (1998), keine Messungen zur Kontrolle der Zementationsgüte durchgeführt. Da heute selbst nach Ausbau des Tubingstrangs nicht mehr alle Rohrzementationen einer Messung (z.B. USIT)

zugänglich sind, wurde versucht, die Kontrolle bestmöglich „auf anderem Wege“ vorzunehmen.

Nachfolgend werden – u.a. deshalb - die einzelnen Rohrzementationen analysiert und bewertet. Ein weiterer Grund ist aber auch, dass erfahrungsgemäß bei den Zementrezepturen Fehler vorkommen können, die die Qualität und Quantität beeinträchtigen. Die nach Zementationsberichten verwendeten Rezepturen wurden deshalb durch eigene Berechnungen überprüft. Die Ergebnisse sind nachfolgend kommentiert. Dabei ist ein wichtiges Kriterium zur Beurteilung der Qualität einer Zementrezeptur der Wasseranteil, der relativ zur Zementmenge zugemischt wird. Als Anhaltspunkt können für „Standardzementrezepturen“ die in der folgenden Tabelle aufgeführten Wassermengen dienen, die im Hinblick auf die Verpumpbarkeit der Zementbrühe möglichst nicht unterschritten werden sollten.

Wasserbedarf verschiedener Zemente und Additive		
	spez. Wasserbedarf	
Zementtyp	l/100 kg Zement	l/t Zement
PZ35F	46	460
HOZ35L	50	500
EFA-Füller	25	250
Pozmix 80	65	650
Class C	56	560
Class G	44	440
Additive		
Bentonit	530	5300
SWDC	530	5300
Sand (100 mesh)	35	350
Schwerspat	25	250
Kreide	80	800

Tabelle 1: Wasserbedarf verschiedener Zemente und Zementadditive

13 3/8“-Ankerrohrtour

Die Zementation der bis 1683,55m eingebauten Ankerrohrtour erfolgte nach vorliegenden Berichten zutage mittels Stinger-Zementation (5“-DP) mit 18m³ Süßwasser als Spacer, 182m³ Lead-Zement (Class G, mit Bentonit) 1,6 kg/l und 20m² Tail-Zement (Class G) 1,9 kg/l. Nachgepumpt wurden 16m³ Spülung 1,17 kg/l; der Anschlag/Endruck bei der Zementation wird mit 75 bar berichtet, der Rücklauf mit 420 l.

Zementationsbericht und Tagesbericht sind als *Anlagen 24a* und *b* beigelegt; die genannten Zementrezepturen wurden durch eigene Berechnungen überprüft (s. *Anlage 24c*). Die

Angaben sind plausibel, die nach Bericht gesamt verbrauchte Menge Zement entspricht dem nachgerechneten Bedarf.

Für oberflächennahe Zementationen – wie hier im Fall der Ankerrohrtour – wird zur Vermeidung des Aufbrechens druckschwacher Horizonte üblicherweise die zutage geführte Zementation mit einem leichten Leadzement und einem schwereren Tailzement im Rohrschuhbereich durchgeführt; dabei wird in der Leadrezeptur i.d.R. Bentonit zugemischt, wodurch der Wasseranteil zur Dichtesenkung deutlich erhöht werden kann, ohne dass Freiwasser entsteht, das sonst Wassertaschen bilden könnte. Die hier eingestellte Dichte von ca. 1,6 kg/l entspricht gängiger Praxis und ergibt erfahrungsgemäß noch ausreichende Zementfestigkeiten. Die Tailzementrezeptur ist mit 1,9 kg/l und einem Wasseranteil von ca. 440 – 450 l/t Zement ebenfalls im technisch üblichen Rahmen.

Die nachfolgende Tabelle gibt einen Vergleich der wichtigsten Komponenten und Daten der Zementrezepturen nach berichteten Verbräuchen und Kontrollberechnungen.

Vergleich der Zementationsdaten der 13 3/8“-Zementation				
Verbrauch			n. Bericht	n. Kontrollber.
Class G (Lead + Tail)		kg	182.720	182.755
Bentonit (im Leadzement 182m ³)	17,2	kg/m ³ = kg	3.130	3.130
Wasser		l	k.A.	143.349
Dichte Lead		kg/l	1,60	1,60
Dichte Tail		kg/l	1,90	1,90
Ergiebigkeit Lead		m ³ /t Zement	k.A.	1,14
Ergiebigkeit Tail		m ³ /t Zement	k.A.	0,76

Tabelle 2: Vergleich der Zementationsdaten der 13 3/8“-Zementation

Die Ausbildung eines Mikroringraums durch Spülungsdichtedifferenz („schwer bei Einbau, leicht in der nächsten Bohrphase“; s. Kapitel 1.2) kann hier ausgeschlossen werden, da die Spülungsdichte beim Weiterbohren höher war als beim Zementieren. Die nach dem Einbau der 9 5/8“-Produktionsrohrtour stattgefundenen Dichteänderungen haben praktisch keinen Einfluss mehr auf die 13 3/8“-Rohrtour.

Am 15.01.1998 wurde nach aufbohren des Rohrschuhs ein Gradiententest bis 1,9 bar/10m erfolgreich durchgeführt (s. *Anlage 24d*).

9 5/8“-Produktionsrohrtour

Die Zementation der bis 4133,5m eingebauten Produktionsrohrtour erfolgte nach vorliegenden Berichten als 3-Stopfenzementation (Spacer zwischen 2 Vorstopfen) mit 10,2m³ Spacer und 89,4m³ Zement 2,04 kg/l (133,32 t Mischzem.). Nachgepumpt wurden 159,7m³

Spülung 1,86 kg/l; der Anschlag/Endruck bei der Zementation betrug nach Tagesbericht 158 bar, nach Zementationsbericht 150 bar. Rücklauf ist nicht berichtet.

Zementationsbericht und Tagesbericht sind als *Anlagen 25a* und *b* beigelegt; die genannte Zementrezeptur wurde durch eigene Berechnung überprüft (s. *Anlage 25c*). Die Angaben sind plausibel, die nach Bericht gesamt verbrauchte Menge Zement entspricht nahezu dem nachgerechneten Bedarf. Die Mengenabweichungen zwischen den im Zementationsbericht angegebenen Mengen und den sich aus der Nachberechnung ergebenden Mengen sind gering und liegen erfahrungsgemäß i.d.R. an etwas von den Annahmen abweichenden realen Dichten aufgrund von herkunftsbedingten Schwankungen der einzelnen Rezepturbestandteile. Die Rohre wurden mit 291 t in den Keilen abgehängt.

Die Bestimmung der Zementkopfteufe erfolgte am 25.02.98 mittels Temperatur-Log, das von 600 – 1800m gefahren wurde; er wurde nach Tagesbericht bei 1580m festgestellt.

Da die Zementation der Produktionsrohrtour nur bis in die 13 3/8“-Rohrtour, aber nicht bis zutage geführt werden sollte, war es nicht nötig zur Verringerung des Säulendrucks der Zementbrühe einen leichteren Leadzement zu verwenden. Vielmehr konnte und wurde hier ein einheitlicher Zement verpumpt, dessen Dichte beim Anmischen mit etwas über 2 kg/l relativ hoch war. Dies ist jedoch als technisch normal anzusehen, da der Zement mit aufgesalzenem Anmachwasser angesetzt wurde um in den durchteuften Salzformationen Auslaugungen zu vermeiden. Die verwendete Rezeptur - Hochofenzement mit EFA-Füller (= Elektroofen-Flug-Asche) - und Zugabe von Quarzmehl (Sand) entspricht dem bewährten Zementrezept für langzeitstabile hochtemperaturbeständige Zemente.

Die nachfolgende Tabelle gibt einen Vergleich der wichtigsten Komponenten und Daten der Zementrezepturen nach berichteten Verbräuchen und Kontrollberechnungen.

Vergleich der Zementationsdaten der 9 5/8"-Zementation			
Verbrauch		n. Bericht	n. Kontrollber.
HOZ	kg	70.440	72.010
EFA	kg	10.190	10.417
Sand	kg	50.920	52.055
Wasser	l	k.A.	37.445
Salz	kg	8.490	8.679
Dichte	kg/l	2,03	2,03
Ergiebigkeit	m ³ /t Zement	0,67	0,66

Tabelle 3: Vergleich der Zementationsdaten der 9 5/8“-Zementation

Auch hier kann die Ausbildung eines Mikroringraums durch Spülungsdichtedifferenz („schwer bei Einbau, leicht danach“; s. Kapitel 1.2) ausgeschlossen werden, da die Spülungsdichte beim Weiterbohren höher war als beim Zementieren. Erst im Verlauf der

Komplettierung erfolgte eine Dichtereduzierung in den Rohren auf ca. 1,02 kg/l, die eine Durchmesseränderung von unter 0,2mm verursacht. Außerdem führt die Rohrtour durch als plastisch einzustufendes Salinar (Grund für den Einbau der 10 ¾“-Dickwandrohre!), in dem wie in Kapitel 1.3 beschrieben, aufgrund der Kriechprozesse eine selbstgängige Abdichtung eventueller Mikroringräume zu unterstellen ist.

Am 27.02.1998 wurde nach aufbohren des Rohrschuhs ein Gradiententest bis 2,3 bar/10m über 15 Minuten erfolgreich durchgeführt (s. *Anlage 25d*).

7 5/8“-Produktionsliner

Die Zementation des Liners, der von 4036,1m (Linerkopf) bis 5014m (Schuhteufe) reicht, erfolgte mit 3m³ Spacer 2,1 kg/l und 22,3m³ Zement 2,1 kg/l (19,756 t HOZ). Nachgepumpt wurden 53,4m³ Spülung 2,04 kg/l; der Anschlag/Endruck bei der Zementation betrug nach Tagesbericht 90 bar, der für 10 Minuten gehalten und dann abgelassen wurde, dabei kamen als Rücklauf 160 l zurück. Anschließend wurde der Kopfpacker gesetzt und dann der Setzstrang bis 3802m (ca. 235m über LK) ausgebaut und abgespült; ob dabei Zement zutage kam ist nicht berichtet. Am Folgetag (20.03.98) wurde jedoch eine Meißelgarnitur eingebaut und bis Linerkopf aufgespült, dabei kamen nach Tagesbericht ca. 10m³ Zementbrühe zutage. Zementationsbericht und Tagesbericht sind als *Anlagen 26a* und *b* beigelegt; die genannte Zementrezeptur wurde durch eigene Berechnung überprüft (s. *Anlage 26c*). Die Angaben sind plausibel, die nach Bericht gesamt verbrauchte Menge Zement entspricht nahezu dem nachgerechneten Bedarf. Lediglich der Wert für die Ergiebigkeit weicht deutlich ab, wie auch die nachfolgende Tabelle mit dem Vergleich der wichtigsten Komponenten und Daten der Zementrezepturen nach berichteten Verbräuchen und Kontrollberechnungen zeigt. Hierbei mag es sich um einen Schreibfehler oder einen Rechenfehler im Bericht handeln; möglicherweise wurde hier auch lediglich die spezifische Wassermenge (gemäß Nachkalkulation ca. 550 l) je 1000 kg Zement angegeben.

Vergleich der Zementationsdaten der 7 5/8“-Zementation			
Verbrauch		n. Bericht	n. Kontrollber.
HOZ	kg	19.760	19.904
EFA	kg	3.592	3.618
HiDense	kg	9.210	9.277
Wasser	l	k.A.	11.047
Salz	kg	2.690	2.710
Dichte	kg/l	2,10	2,10
Ergiebigkeit	m³/t Zement	0,55	0,67

Tabelle 4: Vergleich der Zementationsdaten der 7 5/8“-Zementation

Auch hier wurde – wie bereits bei der 9 5/8“-Zementation – der Zement mit aufgesalzenem Anmachwasser angemischt, um in den durchteuften Salzformationen Auslaugungen zu vermeiden. Die hier verwendete Rezeptur - wiederum Hochofenzement mit EFA-Füller - enthält Beschwermaterial (Eisenoxid), um der Zementbrühe eine Dichte zu geben, die über der der Spülung liegt; damit wird die Verdrängung der schweren Spülung aufgrund der Dichtedifferenz unterstützt.

Die Ausbildung eines Mikroringraums durch Spülungsdichtedifferenz („schwer bei Einbau, leicht danach“; s. Kapitel 1.2) kann hier prinzipiell nicht ausgeschlossen werden, da die Spülungsdichte beim Zementieren höher war als beim Weiterbohren. Allerdings unterliegen die hier verbauten Dickwandrohre nur einer sehr geringen Durchmesser verkleinerung durch die Innendruckabsenkung infolge Spülungsdichtereduzierung. Im konkreten Fall verändert sich der Rohrdurchmesser in einer Seigerteufe von 4050m bei Spülungsdichtereduzierung von 2,04 kg/l (Einbau) auf 1,44 kg/l (weiterbohren) und der daraus resultierenden Absenkung des hydrostatischen Drucks im Rohr um 238 bar lediglich um knapp 0,1mm. Selbst bei Entlastung innen auf die Dichte eines Komplettierungsfluids von 1,02 kg/l würde die Durchmesseränderung unter 0,16mm liegen, dies entspricht bei gleichmäßiger circumferentialer Ausbildung also einem Spalt von weniger als 0,08mm.

Da auch der Zement eine gewisse Elastizität aufweist und daher dem schrumpfenden Rohr zumindest teilweise folgt, wird selbst im ungünstigsten Fall einer Mikroringraumbildung sich dieser Wert noch verringern. Abhängig von der Elastizität des Zementes - die allerdings stark schwanken kann, weshalb hier auch keine konkrete Abschätzung vorgenommen wird – wird die Zementbindung zum Rohr auch gar nicht abreißen; in diesem Fall wird sich somit kein Mikroringraum bilden. Außerdem führt der 7 5/8“-Liner durch als plastisch einzustufendes Salinar, in dem wie in Kapitel 1.3 beschrieben, aufgrund der Kriechprozesse eine selbstgängige Abdichtung eventueller Mikroringräume zu unterstellen ist.

Am 24.03.1998 wurde mit einem RTTS-Packer der Linerkopf/Packer durch einen Zuflusstest auf Dichtheit getestet (s. Tagesbericht *Anlage 26d*). Hierzu wurde bei Packersetzteufe von 3980 m die Spülung im Strang gegen Wasser ausgetauscht und damit bei einem Außendruck von 782 bar am Linerkopf in der Seigerteufe (TVD) von 4000m/4036,1m MD eine Druckabsenkung von 390 bar erzeugt. Auf einen Gradiententest am Linerschuh wurde nach Aufbohren verzichtet, da dieser in Anbetracht der ohnehin hohen Spülungs- und Zementdichte sehr schnell zu einem „Leak-off-Test“, d.h. einem Aufbrechen des Gebirges am Rohrschuh geführt hätte; dies sollte aber vermieden werden.

5“-Produktionsliner

Die Zementation des Liners erfolgte mit 2,34m³ Spacer 1,61 kg/l und 4m³ Zement 2,04 kg/l (5,22 t Class G). Nachgepumpt wurden 39,6m³ Spülung 1,48 kg/l; der Anschlag/Endruck bei der Zementation betrug nach Zementationsbericht 90 bar, ein Rücklauf ist nicht berichtet, wohl aber, dass das System mit 760 bar beaufschlagt wurde (was sehr unwahrscheinlich ist!). Hier erscheint der Tagesbericht glaubhafter. Hier ist als Anschlagdruck 295 bar angegeben und ein Rücklauf von 760 l beim Ablassen des Druckes.

Anschließend wurde der Kopfpacker gesetzt und danach das Setzgerät bis 4856m (ca. 45 m über LK) ausgebaut, beim Abspülen in dieser Teufe kam kein Zement zutage.

Zementationsbericht und Tagesberichte sind als *Anlagen 27a* und *b* beigefügt; die genannte Zementrezeptur wurde durch eigene Berechnung überprüft (s. *Anlage 27c*). Die Angaben sind zwar hinsichtlich des Mischungsverhältnisses und der Dichte plausibel, die nach Bericht gesamt verbrauchte Menge Zement würde jedoch für rund 5m³ Zementbrühe ausreichen, wie die Berechnung im unteren Teil der Anlage 27c zeigt, und entspricht somit nicht dem nachgerechneten Bedarf für 4 m³ im oberen Teil. (**Anm.:** Zur Sicherstellung der Langzeitstabilität des Zementes unter hoher Temperatur – hier ca. 145°C – wird der Class G-Zement üblicherweise mit ca. 35 Gewichts-% Quarzsand gemischt; dieser Ansatz ergibt sich auch aus den Mengenangaben und ergibt bei üblichem Wasseranteil die Dichte von ca. 2,03 – 2,04 kg/l).

Der Wert für die Ergiebigkeit weicht wieder - wie schon bei der 7 5/8“-Zementation - deutlich ab, wie auch die nachfolgende Tabelle mit dem Vergleich der wichtigsten Komponenten und Daten der Zementrezepturen nach berichteten Verbräuchen und Kontrollberechnungen zeigt; auch ist möglicherweise der Wert des Zementvolumens falsch und es wurden 5m³ statt der im Bericht genannten 4m³ angemischt. Für dieses Volumen können die angegebenen Mengen sehr gut bestätigt werden. Dies würde erklären, warum die einzelnen Mengenangaben mit Nachkommastellen recht genau sind und die daraus ableitbare Rezeptur gut nachvollzogen werden kann und den genannten Dichtewert gut matcht. Auch gibt es ansonsten keinerlei Anzeichen dafür, dass die Zementation nicht gelungen (dicht) ist. Insgesamt erscheint hier der Zementationsbericht in einigen Angaben nicht ganz korrekt ausgefüllt worden zu sein - so wird z.B. als „vorhergehende Rohrtour 13 3/8“ genannt, obwohl die letzte Rohrtour der 7 5/8“-Liner war. Die ebenfalls angegebene Wandstärke (20,6mm) entspricht jedenfalls wieder den verbauten 7 5/8“-Dickwandrohren.

Vergleich der Zementationsdaten der 5"-Zementation				
Verbrauch		n. Bericht	n. Kontrollberechnung	
			für 4m ³	für 5m ³
Class G	kg	5.220	4.196	5.245
Sand	kg	1.830	1.471	1.839
Wasser	l	k.A.	1.817	2.271
Salz	kg	705	567	708
Dichte	kg/l	2,04	2,04	2,04
Ergiebigkeit	m ³ /t Zement	0,55	0,69	0,69

Tabelle 5: Vergleich der Zementationsdaten der 5“-Zementation

Die Ausbildung eines Mikroringraums durch Spülungsdichtedifferenz („schwer bei Einbau, leicht danach“; s. Kapitel 1.2) kann hier prinzipiell nicht ausgeschlossen werden, da der hydrostatische Druck der Flüssigkeitssäule aus Spülung und Zementbrühe im Ringraum höher war als der Innendruck bei der Gasförderung. Allerdings unterliegen die hier verbauten hochfesten 5“-Rohre selbst bei einer Innendruckabsenkung auf den Lagerstättenwassergradienten (entsprechend 1,02 kg/l) nur einer sehr geringen Durchmesser verkleinerung von weniger als 0,1mm.

Am 13.05.98 wurde - wie auch schon beim 7 5/8"-Liner beschrieben - mit einem RTTS-Packer und Wasser der Linerkopf/Packer bei 4967 m MD Packersetzteufe ein Dichtheitstest (Zuflusstest) mit 195 bar Druckabsenkung durchgeführt (s. Tagesbericht *Anlage 27d*); der Außendruck am Linerkopf in 4744 m TVD/4990,6 m MD betrug dabei 660 bar.

Ein Gradiententest am 5“-Linerschuh wurde nicht durchgeführt, da auf das Aufbohren des Schuhs verzichtet wurde.

2.6 Betrachtung der Spülungssedimentation in ausgewählten Ringräumen

Wie bereits in Kapitel 1.3 erwähnt neigen feststoffbeladene Spülungen im Verlaufe der Zeit bei Stillstand zu Aussedimentation der Feststoffe. Diese Sedimentation ist im übrigen auch der Grund dafür, dass bei geplanten Rohrschneidarbeiten – z.B. im Zuge von Verfüllungen oder Bohrungsablenkungen – der real festgestellte Festpunkt oftmals deutlich über dem eigentlichen Zementkopf liegt. Die aussedimentierten Feststoffe können – insbesondere, wenn sie sehr feinkörnig sind – eine starke abdichtende Wirkung ausüben und z.B. in Ringräumen eventuelle primär vorhandene Undichtheiten schließen. Nachfolgend wird für zwei Fälle eine Abschätzung zu den möglichen Sedimentationshöhen gegeben.

9 5/8“-Produktionsrohrtour

Die Zementation der bis 4133,5m eingebauten Produktionsrohrtour erfolgte nach vorliegenden Berichten (Temperaturlog) bis 1580m. Die Spüldichte betrug bei Rohreinbau 1,86 kg/l. Im Ringraum 13 3/8“– 9 5/8“ ist über dem Zementkopf demzufolge nach Zementationsende diese Spülung verblieben. Das Ringraumvolumen von ZK-Teufe bis zutage beträgt ca. 48m³ bei einem über die Länge gemittelten spezifischen Ringraumvolumen von 31,16 l/m (*Anm.:* am Kopf sind 10 3/4“-Rohre eingebaut!). Aussedimentieren können nur die nicht in der flüssigen Phase gelösten Feststoffe, vernachlässigt man die druck- und temperaturabhängige Löslichkeit bleiben die gelösten Salze in Lösung. Die Ermittlung der Sedimentationshöhe im Ringraum 13 3/8“-9 5/8“ basiert auf einem – angenommenen - Vergleich der Ringraumspülung vor und nach Sedimentation und ist in *Anlage 28a* gezeigt. Demnach könnte sich im Verlaufe der Zeit über dem Zementkopf eine Sedimenthöhe von rund 400m gebildet haben, das entspricht rund 25% der gesamten Ringraumsäule! Natürlich basiert die in der Anlage gezeigte Spülszusammensetzung auf angenommenen Feststoffanteilen und kann durchaus davon real etwas abweichend gewesen sein; im Prinzip ist aber der Feststoffanteil schwerer Bohrspülungen auch real ähnlich hoch. Nicht berücksichtigt, aber erwähnenswert, ist hierbei noch der bei der Zementation vorweg gepumpte "Dual-Spacer" mit ca. 10m³ Volumen, der üblicherweise mit Schwerspat auf eine Dichte zwischen Spülung und Zementbrühe eingestellt wird und ebenfalls durch Aussedimentation des Baryts eine abdichtende Wirkung hat.

7 5/8“-Produktionsliner

Bei dem 7 5/8“-Liner wird – willkürlich - nur die Überlappung des Liners mit den im unteren Teil der 9 5/8“-Rohrtour eingebauten 10 3/4“-Dickwandrohren betrachtet; diese beträgt rund 97m. Die Spüldichte betrug bei Rohreinbau 2,04 kg/l. Theoretisch wäre im Falle einer nicht bis zum Linerkopf gelungenen Zementation demzufolge diese Spülung bis zum Linerkopfpacker im Ringraum über dem Zementkopf verblieben.

Das Ringraumvolumen des Überlappungsbereiches bis Linerkopf beträgt ca. 0,85m³ bei einem über die Länge gemittelten spezifischen Ringraumvolumen von 8,67 l/m. Die Ermittlung der Sedimentationshöhe im Ringraum basiert mangels einer damaligen Spülsanalyse wiederum auf einem – angenommenen - Vergleich der Ringraumspülung vor und nach Sedimentation und ist in *Anlage 28b* gezeigt. Auf Basis der getroffenen Annahmen könnte sich im Verlaufe der Zeit aus ca. 97m Spülung eine Sedimenthöhe von rund 25m gebildet haben, das entspricht rund 26% der gesamten Ringraumsäule. Anzumerken

ist aber, dass alles auf eine bis zum Linerkopf ausgeführte Zementation hindeutet. Nach Zementationsende wurde der Linersetzstrang bis ca. 235m über LK ausgebaut und abgespült; am Folgetag (20.03.98) wurde eine Meißelgarnitur eingebaut und bis Linerkopf aufgespült, dabei kamen nach Tagesbericht ca. 10m³ Zementbrühe zutage.

2.7 Sicherheitsbetrachtung für den Betrieb

Zwischenzeitlich wurde von RWE-Dea entschieden, für den Fall der weiteren Entsorgung des Lagerstättenwassers mittels Injektion in die Völkersen Nord Z3 eine fest installierte Anlage zu errichten; Einzelheiten hierzu sind mir aber bis dato nicht bekannt, so dass hier – unter der Annahmen, dass eine ähnliche Grundkonfiguration auch für die feste Anlage geplant wird - zunächst nur die ursprünglich für den temporären Betrieb geplante Ausrüstung [1] beurteilt werden konnte.

Nach [1] war für den temporären Betrieb vorgesehen, die Einpresspumpe (Hochdruckpumpe) als permanente Sicherheitseinrichtung mit einer Druckabschaltung auszurüsten, sowie ein Überdruckventil und ein Rückschlagventil in der Druckleitung einzubauen. So kann eine evtl. Rückströmung aus der Bohrung und das Überschreiten des Kopffließdrucklimits verhindert werden. Zudem soll ein Sicherheits-Untertageventil direkt am E-Kreuz installiert werden. Darüber hinaus gewährleisten Handarmaturen am E-Kreuz die Möglichkeit des manuellen Absperrens. Allerdings ist ein Rückfluss aus der Bohrung nicht zu erwarten, solange die Bohrung "unterhydrostatisch" ist; d.h., der Druck im Versenkhorizont kleiner ist als der Druck der hydrostatischen Säule des Lagerstättenwassers.

Da ohnehin geplant ist, die Versenkung in eine druckabgesenkte Schicht vorzunehmen, kann ein Rückfluss ausgeschlossen werden, wenn der maximale Schichtdruck unterhalb des hydrostatischen Drucks gehalten wird; für eine angenommene Seigerteufe von 4750m und einer über die Säulenlänge des Lagerstättenwassers gemittelten Dichte von 1,02 kg/l wären das 475 bar.

Im Hinblick auf die Langzeitnutzung als Injektionsbohrung ist gegebenenfalls auch die Korrosivität des Lagerstättenwassers und daraus eventuell resultierende Korrosion in der Bohrung zu diskutieren. Hier ist primär der Tubingstrang als einer Korrosion exponiert anzusehen. Nach bisherigen Erkenntnissen ist nicht davon auszugehen, dass es bei dem bisher verwendeten korrosionsfesten Stahl (Cr13-95) zu Lochfraß-Korrosion kommt; vielmehr ist allenfalls eine flächige abtragende Korrosion zu unterstellen. Da die Druckbelastungen auf den Tubing bei Nutzung als Injektionsbohrung nur noch von untergeordneter Bedeutung sind

(s. auch Kapitel 2.1, Teil 4 1/2"-Tubing) ist als begrenzender Faktor primär die Zugfestigkeit des Stranges bei durch Korrosion verminderter Wandstärke zu betrachten. Hier ist - in Verbindung mit der empfohlenen Neuberechnung der optimalen Abhängelast - eine Berechnung der Mindestwandstärke zu empfehlen, diese sollte die Mindestwandstärke sinnvollerweise als Funktion der Teufe wiedergeben, da die höchste Last am Kopf auftritt und somit dort die größte Restwandstärke nötig ist, während mit zunehmender Einbauteufe die Last am Strang abnimmt - und damit auch die erforderliche Restwandstärke geringer wird. Die Wandstärke kann - als $f(\text{Teufe})$ - wie in Kapitel 1 beschrieben mit den geeigneten Messverfahren von Zeit zu Zeit gemessen werden, wodurch auch ein zeitlicher Verlauf einer eventuellen abtragenden Korrosion erfasst werden kann ("Korrosionsrate"). So kann bei Bedarf auch der richtige Zeitpunkt zum Austausch des Tubingstrangs bestimmt werden. Alternativ kann auch der Einsatz eines (mit "internal plastic coating"; IPC) innen beschichteten Tubings in Erwägung gezogen werden. Neben der Korrosionsschutzwirkung ist mit IPC zusätzlich auch die Rohrreibung deutlich reduzierbar.

Es wird davon ausgegangen, dass am Ende der Betriebsphase als Injektionsbohrung die Bohrung entsprechend den Verfüllungsrichtlinien und dem Stand der Technik verfüllt wird. Bei sachgemäßer Ausführung ist daher auch für den Zeitraum nach Beendigung der Nutzungsphase von einer gegebenen Integrität auszugehen. Wenn am Ende der Injektionsphase der maximale Schichtdruck unterhalb des hydrostatischen Drucks gehalten wurde ist ohnehin, wie schon zuvor beschrieben, eine Rückströmung aus der Bohrung zutage ausgeschlossen.

2.8 Zusammenfassende Bewertung zur Integrität der Bohrung

Zur Bewertung der Integrität der Bohrung wurden die folgenden Schritte durchgeführt:

- konkrete theoretische Nachberechnung aller z.Zt. eingebauten Rohrtouren auf Druckfestigkeiten und Belastungen unter Berücksichtigung der realen Spülungsdichten bei Einbau; Befund: 13 3/8"-Rohrtour ist als Ankerrohrtour ausgelegt; 9 5/8"-Rohrtour, 7-5/8"-Liner und 5"-Liner sind als Gasproduktionstouren ausgelegt (= höchste Anforderung!).
- theoretische Überprüfung des z.Zt. eingebauten 4 1/2"-Tubings (ohne Accessoires); Befund: Auslegung entspricht den Anforderungen als Gasproduktionstubing.
- theoretische Überprüfung des z.Zt. eingebauten Packers; Befund: Packer entspricht den Anforderungen der Bohrung.

- theoretische Überprüfung des installierten Bohrlochkopfes (Druckstufe 10.000 psi = 690 bar); Befund: Der Bohrlochkopf entspricht den Anforderungen der Bohrung.
- theoretische Bewertung der Zentrierung der Rohrtouren; Befund: Generell gute Zentrierung; damit gute Voraussetzung für eine dichte Zementation geschaffen.
- theoretische Bewertung der Zementationen; Befund: Die Rezepturen entsprechen bewährtem Standard; die Zementationsabläufe weisen nach Aktenlage auf normale störungsfreie Durchführung hin.
- theoretische Bewertung der möglichen Bildung eines Mikroringraums durch Dichtedifferenzen und der Selbstheilung durch Kriechen; Befund: eventuelle Mikroringraumbildung wird durch Selbstheilung (Kriechen) von Salinarstrecken und plastischen Tonen kompensiert
- theoretische Betrachtung der Spülungssedimentation in den Ringräumen zwischen den Rohrtouren 9 5/8“-13 3/8“ und der 7 5/8“-9 5/8“-Überlappung.

Die wichtigsten Auslegungskriterien der Rohrtouren und ihre Bewertung nach Prüfung sind in der nachstehenden Tabelle 6 zusammengefasst dargestellt. Dabei sind bei der Bewertung der Sicherheiten die nach WEG empfohlenen Sicherheitsfaktoren als Bezugswerte genommen worden (s. hierzu auch Kapitel 2.1 „Nachberechnung der Futterrohre“, Abschnitt „Allgemeine Anmerkungen“).

Rohrauslegungen - Zusammenfassung					
Kriterium	Standrohr 32"	Ankerrohrtour 13 3/8"	Prod.-Rohrtour 9 5/8"	1. Prod.-Liner 7 5/8"	2. Prod.-Liner 5"
Auslegung als ..					
Ankerrohrtour	n.a.	ja	n.a.	n.a.	n.a.
Gas-Produktionstour	n.a.	n.a.	ja	ja	ja
Verbinder gasdichtgeschweißt		nein	ja	ja	ja
Auslegungsbedingungen und Sicherheitsfaktoren					
Außendruck / SF (WEG 1,0)	n.a.	1,43	1,05	1,19	1,22
Innendruck / SF (WEG 1,1)	n.a.	1,07	1,28	3,48	2,78
Axiallast (Rohr) / SF (WEG 1,25)	n.a.	4,86	2,45	8,32	54
Axiallast (Verb.) / SF (WEG 1,6/1,8)	n.a.	4,83	2,51	7,54	46,5
Axiallast (Kompression)	n.a.	1,86 (2007)	n.a.	n.a.	n.a.

Tabelle 6: Zusammenfassende Darstellung der Rohrauslegungen und Ergebnisse der Überprüfung

Die Zusammenfassung zeigt, dass alle Rohrtouren nach den üblichen Kriterien ausgelegt sind und den jeweiligen Anforderungen, die aus der ursprünglichen Bestimmung als Gasproduktionsbohrung entsprechen.

Ebenfalls sind die Rohrzementationen und die durchgeführten Druckteste in der folgenden Zusammenfassung dargestellt (Tabelle 7).

Rohrzementationen - Zusammenfassung				
Kriterium	Ankerrohrtour 13 3/8"	Prod.-Rohrtour 9 5/8"	1. Prod.-Liner 7 5/8"	2. Prod.-Liner 5"
Zementkopf bei	zutage	1580m	Linerkopf	Linerkopf
ZK-Höhe gemessen	nein	Temp-Log	durch Abspülen	nein
Verluste bei Zementation	nein	nein	nein	nein
sonstige Unregelmäßigkeiten	nein	nein	nein	nein
Kopfpacker gesetzt	n.a.	n.a.	ja	ja
Druckteste				
Drucktest auf Rohrtour	Anschlag 75bar	Anschlag 150bar	Anschlag 90bar	Anschlag 295bar
Drucktest auf Linerkopf	n.a.	n.a.	Packertest -390bar	Packertest -195bar
Drucktest unter Rohrschuh	FGT 1,9bar/10m	FGT 2,3bar/10m	nein	nein

Tabelle 7: Zusammenfassende Darstellung der Rohrzementationen und Druckteste

Die Zusammenfassung der Rohrzementationen und der durchgeführten Druckteste zeigt gleichfalls, dass bei den Zementationsarbeiten keine Unregelmäßigkeiten beobachtet wurden und die Zementationen die bestimmungsgemäße Abdichtung der Ringräume zwischen Rohren und Bohrlochwand erzielten, wie mit den Drucktesten nachgewiesen wurde.

2.9 Fazit

Die Bohrung wurde als Gasproduktionsbohrung konzipiert und nach ihrer Realisierung im Jahr 1998 über Jahre als Gasförderbohrung genutzt. Bisher wurden – soweit bekannt - keine Undichtheiten an den Zementationen und Rohrtouren registriert.

Nach den bisherigen Erkenntnissen ist die Bohrung daher auch als Versenkbohrung geeignet. Dabei ist zu erwähnen und zu berücksichtigen, dass bei einer Nutzung als Wasserinjektionsbohrung die Druckbelastungen des Förderstrangs deutlich geringer sind als bei einer Gasförderung. So kann bei der geplanten Verwendung als Injektionsbohrung zum Beispiel ausgeschlossen werden, dass die aus (9 5/8“-Tagestour, 7 5/8“-Liner und 5 1/2“-Liner bestehende Produktionsrohrtour innen leer läuft; abhängig von der Drucksituation im Versenkhorizont wird die Rohrtour innen mindestens teilweise mit Wasser gefüllt sein. Der potenziell hohen Außendruckbelastung in Salinarbereichen steht dadurch zusätzlich zur Außendruckfestigkeit der Rohre noch der Druck der hydrostatischen Säule innen entgegen. Die Innendruckbelastung kann dabei maximal dem Druck der hydrostatischen Säule zuzüglich dem Injektionsdruck entsprechen. Die auf die Rohre wirkenden Zuglasten werden

in diesem Fall ebenfalls geringer als die in der Grafik berechneten Zuglasten, die innen noch von dem Gewicht der schweren Spülung bei Einbau (hier: 1,86 kg/l) ausgingen.

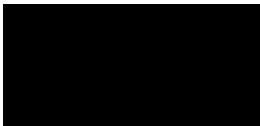
Lediglich für den Tubingstrang kann sich eine grundsätzliche Änderung der Belastungssituation ergeben, da bei Nutzung des Tubings als Injektionsstrang insbesondere im unteren Teil eine deutliche Abkühlung erfolgen kann. Diese führt zu einer zusätzlichen Zuglast aufgrund der thermisch induzierten Kontraktion und ist unter Annahme realistischer Temperaturwerte (zu erwartende bzw. geplante Injektionstemperatur des Lagerstättenwassers?) zu gegebener Zeit zu prüfen. Gegebenenfalls muss der Tubingstrang mit geringer(er) Last (als bisher erfolgt) abgehängt werden, damit bei Abkühlung die zulässige Zuglast des Tubings nicht überschritten wird.

Die Auswirkung einer eventuell sich durch die Abkühlung ergebenden zusätzlich wirksam werdenden Zuglast auf dem Bodenflansch/Ankerrohrkopf ist dem gegenüber als unkritisch anzusehen, wenn sich der in 2007 festgestellte Zustand des Ankerrohrtour-Kopfes nicht gravierend verschlechtert hat, da in diesem Fall noch ausreichende Lastaufnahmekapazität auch für höhere Tubinglasten vorhanden wäre.

Weitere empfohlene Maßnahmen:

- Evtl. erneute Wandstärkenmessung am Ankerrohrkopf und Überprüfung der Lastsituation.
- Sofern die Bohrung abgelenkt wird sollte die Güte der Zementation der neu einzubauenden Rohrtouren/Liner durch geeignete Druckteste und Messungen kontrolliert werden.
- Erneute Druckproben sollten vor Inbetriebnahme als Versenkbohrung durchgeführt werden; ein detailliertes Abdruckprogramm sollte festgelegt werden, nachdem die Planung der Versenkbohrung konkretisiert wurde.

Edemissen, im März 2014



(Axel Sperber)

Quellennachweis:

- [1] „Sonderbetriebsplan für den temporären Betrieb der Bohrung Völkersen Nord Z3 zur Injektion – Formation Heidberg“; September 2012

- [2] „Scope of Work für die Begutachtung der Völkersen Nord Z3 als Disposalbohrung“; Eisenberger, M.; 05.03.2013

- [3] „Tragfähigkeit/Lastsituation der Ankerrohrtour - Kurzbericht zur Bohrung Völkersen Nord Z3“; Sperber, A.; 11.07.2007

- [4] „Centralizer Data Sheet“; Weatherford GmbH, Hannover, November 2001

- [5] „Völkersen N Z3 Einbauteile“; eMail von RWE-Dea, [REDACTED] 01.07.2013

- [6] „15056 Packersystems_catalog-1110“; BOT-09-15056; Baker Hughes, Houston/Texas, USA 2010

- [7] “Blanking Dimensions for FOX® Accessories”; FOX-TP-L-001 (REV.1); JFE Steel Corporation, November 2008

- [8] “Petroleum Well Construction”; Economides MJ., Watters LT and S. Dunn-Norman; John Wiley & Sons, Chichester; 1998

- [9] “Methodische Entwicklung eines praktikablen Konzeptes zur Bewertung der Dichtheit verfüllter Bohrungen”; T. Tran Viet; Dissertation; TU Clausthal, Fakultät für Energie- und Wirtschaftswissenschaften; 2013

- [10] „Water Disposal 2015“; Statusbericht der RWE-Dea AG, gegeben beim Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie am 15.08.2013 in Hannover.

Anlagenverzeichnis:

- Anlage 1: Bohrfad der Bohrung Völkersen Nord Z3
- Anlage 2: 13 3/8“-Ankerrohrtour - Einbauliste
- Anlage 3: 13 3/8“-Ankerrohrtour - Nachberechnung der Druckfestigkeiten
- Anlage 4: Tragfähigkeit/Lastsituation des 13 3/8“-Ankerrohrtourkopfes [3]
- Anlage 5: 9 5/8“- Produktionsrohrtour - Einbauliste
- Anlage 6: 9 5/8“- Produktionsrohrtour - Nachberechnung der Druckfestigkeiten
- Anlage 7: 7 5/8“- Produktionsliner - Einbauliste
- Anlage 8: 7 5/8“- Produktionsliner - Nachberechnung der Druckfestigkeiten
- Anlage 9: 5“- Produktionsliner - Einbauliste
- Anlage 10: 5“- Produktionsliner - Nachberechnung der Druckfestigkeiten
- Anlage 11: 4 1/2“- Produktionstubing - Einbauliste
- Anlage 12: 4 1/2“- Produktionstubing - Nachberechnung der Druckfestigkeiten
- Anlage 13: Strömungsdruckverlust im 4 1/2“- Tubing – Berechnung für Q = 400 l/m
- Anlage 14: 4 1/2“- Tubing – Druckbelastungsberechnung als Injektionsstrang
- Anlage 15: Liste „UT- Einbauten Völkersen Nord Z3“
- Anlage 16: Ermittlung der durchschnittl. Druckgradienten und result. Sohlendrucke
- Anlage 17a: Bohrlochbild mit vorhandenen Dichtelementen (schematisch) [2]
- Anlage 17b: Produktionspacker Typ SB-3 [6]
- Anlage 18: Bohrlochverlauf der Völkersen Nord Z3 – Dogleg-Severity
- Anlage 19: Centralizerdaten [4]
- Anlage 20a: 13 3/8“-Rohrliste mit Centralizerplatzierung
- Anlage 20b: 13 3/8“- Ankerrohrtour – Zentrierungsberechnung
- Anlage 20c: 13 3/8“- Ankerrohrtour – grafische Darstellung des „stand-off“
- Anlage 21a: 9 5/8“-Rohrliste mit Centralizerplatzierung
- Anlage 21b: 9 5/8“-Produktionsrohrtour – Zentrierungsberechnung
- Anlage 21c: 9 5/8“-Produktionsrohrtour – grafische Darstellung des „stand-off“
- Anlage 22a: 7 5/8“-Rohrliste mit Centralizerplatzierung
- Anlage 22b: 7 5/8“-Produktionsliner - Zentrierungsberechnung
- Anlage 22c: 7 5/8“-Produktionsliner – grafische Darstellung des „stand-off“
- Anlage 23a: 5“-Rohrliste mit Centralizerplatzierung
- Anlage 23b: 5“-Produktionsliner – Zentrierungsberechnung
- Anlage 23c: 5“-Produktionsliner – grafische Darstellung des „stand-off“
- Anlage 24a: 13 3/8“-Zementationsbericht

- Anlage 24b: Tagesbericht zur 13 3/8“-Zementation
- Anlage 24c: Überprüfung der 13 3/8“-Zementrezepturen
- Anlage 24d: Tagesbericht zum Druckgradiententest am 13 3/8“-Rohrschuh
- Anlage 25a: 9 5/8“-Zementationsbericht
- Anlage 25b: Tagesbericht zur 9 5/8“-Zementation
- Anlage 25c: Überprüfung der 9 5/8“-Zementrezeptur
- Anlage 25d: Tagesbericht zum Druckgradiententest am 9 5/8“-Rohrschuh
- Anlage 26a: 7 5/8“-Zementationsbericht
- Anlage 26b: Tagesberichte (19./20.03.98) zur 7 5/8“-Zementation
- Anlage 26c: Überprüfung der 7 5/8“-Zementrezeptur
- Anlage 26d: Tagesbericht zum Drucktest auf den 7 5/8“-Linerkopf
- Anlage 27a: 5“-Zementationsbericht
- Anlage 27b: Tagesbericht zur 5“-Zementation
- Anlage 27c: Überprüfung der 5“-Zementrezeptur
- Anlage 27d: Tagesbericht zum Drucktest auf den 5“-Linerkopf
- Anlage 28a: Ermittlung der Sedimentationshöhe im Ringraum 13 3/8“-9 5/8“
- Anlage 28b: Ermittlung der Sedimentationshöhe im Ringraum 9 5/8“-7 5/8“

Sonderteil D

zur Hauptstudie „Nachhaltiger Umgang mit Lagerstättenwasser aus der Erdgasförderung der RWE Dea AG in Niedersachsen“

Ökologische Bewertung von 4 Verfahrensvarianten zur Vorbehandlung des Lagerstättenwassers zum Zwecke der Injektion

Gutachten-Nr.:	RWEDea_Sonderteil D_058_12_HBR_20140317
Auftraggeber:	IGU – Institut für Geologie und Umwelt GmbH Glückaufstraße 50 31319 Sehnde
Ansprechpartner	Dr. H. Paetsch
Auftragsdatum:	08/2012 c./o IGU
Gesamtprojektleitung:	RWE Dea AG Überseering 40 22297 Hamburg
Ansprechpartner RWE Dea	
Gutachter:	Dr. Hans-Bernhard Rhein
Vorlagedatum:	17.03.2014

Sarstedt, den 17.03.2014

Dr. Hans-Bernhard Rhein



Inhaltsverzeichnis

1	Aufgabenstellung	3
2	Zusammensetzung und Eigenschaften des Lagerstättenwassers	3
3	Konzept zur Aufbereitung für eine Versenkung ins Rotliegende	5
4	Ökologische Bewertungskriterien	13
5	Ökologische Bewertung am Beispiel von vier Aufbereitungsverfahren	15
5.1	Auswahl und Rangfolge der ökologischen Kriterien	16
5.2	Quantifizierbare Kenngrößen der Bewertungskriterien	18
5.3	Ökologische Bewertung	20
	 Quellenverzeichnis	 25
	Anlage 1 – Bewertungsmatrix	

1 Aufgabenstellung

Im Rahmen der Hauptstudie „Nachhaltiger Umgang mit Lagerstättenwasser aus der Erdgasförderung der RWE Dea AG in Niedersachsen“ befasst sich eine zentrale Fragestellung mit den technischen Möglichkeiten einer Aufbereitung des Lagerstättenwassers mit dem Ziel

- der Versenkung in einer Disposalbohrung (hier: ins Rotliegende)
- des Einsatzes als Flutungsmittel in einem aufgelassenen Salzbergwerk
- der Indirekteinleitung in ein öffentliches Kanalnetz (Kläranlage)
- der Direkteinleitung in ein Gewässer

jeweils unter Betrachtung der Entsorgungsoptionen der bei der Aufbereitung anfallenden Rückstände.

Neben aktueller Literatur zur spezifischen Aufbereitung von Lagerstättenwasser kann auf Studien und Angebote von Herstellern von Aufbereitungsanlagen zurückgegriffen werden, die verschiedene Verfahrenskonzepte verfolgen, um die o. g. Ziele zu erreichen.

Besonders ist auf die parallel zu Hauptstudie entstandene Konzeption der Fa. Aquaconsult, Hannover hinzuweisen, die sich gezielt mit Verfahren befasst, die das Lagerstättenwasser soweit technisch aufbereiten, dass eine Versenkung in einer Disposalbohrung möglich wird.

Der vorliegende Sonderteil D dient der ökologischen Beurteilung und Differenzierung von Verfahrensalternativen mit vergleichbarer Zielstellung.

2 Zusammensetzung und Eigenschaften des Lagerstättenwassers

Das zu betrachtende Lagerstättenwasser fällt bei der Erdgasförderung nach Abtrennung von der Gasphase und einer ersten Vorbehandlung durch Schwerkraftabscheidung von Leichtflüssigkeiten und Sedimenten in Stapeltankbehältern an den Bohrstellen an.

Von dort ist ein Transport der wässrigen Klarphase zur weiteren Aufbereitung vorgesehen.

Die Zusammensetzung dieses „Lagerstättenwassers“ bestimmt sich aus chemischen Einzelanalysen gelöster und suspendierter Bestandteile der einzelnen Bohrstellen. Die Einzelanalysen werden über gewichtete Mittelwerte anhand der jeweils erzeugten Menge (Produktionsmenge) über alle Bohrstellen zu repräsentativen Konzentrationen der untersuchten Parameter zusammengeführt.

Unter Gesichtspunkten der weitergehenden Aufbereitung zur Erlangung der Zielwerte lassen sich die Inhaltsstoffe wie folgt zusammenfassen:

Tabelle 1: Repräsentative Schadstoffkonzentrationen und -frachten im Lagerstättenwasser (gerundete Angaben)

Stoffgruppe	Konzentration	Fracht
Salzgehalt (Gesamtsalinität)	80.000 mg/L	9.600 Mg/a
Schwermetalle (As, Pb , Cd, Cr, Hg , Cu, Ni, Zn , Sb, Co, Sn, Zr)	10 mg/L	1.250 kg/a
BTEX	430 mg/L	52.250 kg/a
(M)KW	7 mg/L	890 kg/a
NORM (Ra-226, Ra-228, Pb-210, Po-210)	36 Bq/L	4.360 MBq/a

Zur detaillierten Darstellung der Parameter sei auf die Hauptstudie verwiesen.

Das so charakterisierte Lagerstättenwasser wird geprägt von seinem hohen Salzgehalt (Chloride der Alkali- und Erdalkaligruppe). Der Gehalt entspricht terminologisch einem Salzwasser (> 5 %), beträgt aber nur 30 – 50 % einer Salzsole, die bei der Salzgewinnung anfällt.

Ein in der Hauptstudie zitiertes Gutachten /CD: U 25/ im Auftrag der RWE Dea bestätigt die gute Korrelation des Gehaltes an den vorgefundenen Gehalten natürlicher Radionuklide wie Radium mit den Salzgehalten. Aufgrund der chemischen Verwandtschaft sind die geringen Konzentrationen radioaktiver Begleitstoffe des Salzes bei gleichzeitig hohen Salzkonzentrationen eine Herausforderung für die Aufbereitung, wenn diese getrennt werden sollen/müssen.

Die organischen Inhaltsstoffe sind durch die gelösten/dispersierten Anteile an BTEX, darunter vor allem Benzol geprägt, reichen aber nicht aus, um den Einsatz biologischer Aufbereitungsverfahren nahezulegen.

Die Schwermetalle liegen summarisch ebenfalls nur in geringen Konzentrationen vor.

Schwierig abzuschätzen ist der jeweils dispergiert (als Flüssigphase) oder suspendiert (als Feststoffphase) enthaltene Anteil, an den sich jeweils andere Schadstoffbestandteile adsorptiv binden können. So sind hydrophobe Kohlenwasserstoffe dafür bekannt, dass sie einerseits in wässrigen Systemen gelöst, andererseits als organische Phase dispergiert/emulgiert oder adsorptiv an suspendierten Feststoffen/Fällungsschlämmen gebunden vorliegen.

Diese Zusammenhänge sind bei der Auswahl von Aufbereitungsverfahren bzw. der Verfahrensreihenfolge zu beachten.

Besondere Beachtung ist gegebenenfalls den Anteilen an Erdgas zu widmen, das an den Bohrstellen in den Lagertanks mit Druck von etwa 0,5 bar überlagert wird,

wenngleich diese Erdgasanteile nur eine geringe Löslichkeit in Wasser aufweisen. Nach dem ISAH-Gutachten /L 44/ wird im System H₂O-NaCl-CH₄ beispielsweise bei 1 bar und 20 °C mit 60,66 g NaCl/L eine Methanlöslichkeit von 0,019 mg/L angegeben. Die abscheidbaren flüssigen Kohlenwasserstoffen dürften demgegenüber den maßgeblichen Einfluß auf den Brand- und Exschutz der Verfahrenstechnik ausüben.

Als Zielwerte ergeben sich je nach betrachteter Alternative des möglichen Verbleibs des aufbereiteten Lagerstättenwassers unterschiedliche Anforderungen:

- Versenkung ins Rotliegende: Reduzierung der suspendierten Feststoffe und der freien Kohlenwasserstoffe aufgrund technischer Vorgaben
- Einleitung (Direkt/Indirekt): Einhaltung gesetzlicher bzw. genehmigungsrechtlicher Grenzwerte
- Flutung Salzbergwerk: Genehmigungsvorgaben, zumindest Entfernung der organischen Schadstoffe (BTEX/KW).

Im Folgenden sollen nur die für eine Vorbehandlung zur Versenkung ausgewählten Verfahrensalternativen betrachtet werden.

3 Konzept zur Aufbereitung für eine Versenkung ins Rotliegende

Zur Versenkung an der dafür vorgesehenen Bohrstelle muß das Lagerstättenwasser von allen Bohrstellen an die geplante Versenkbohrstelle Völkersen Nord Z3 verbracht werden. Dort ist eine Aufbereitung aus technischen Gründen erforderlich, um den Gehalt an frei abscheidbaren Kohlenwasserstoffen von angenommen 10 mg/L auf 2 mg/L abzusenken. Gleichmaßen muß der Trockensubstanzanteil (abfiltrierbare Stoffe) nach den heutigen Erkenntnissen der Tiefenversenkung bei einer Grenzkorngröße von 5 µm auf 2 mg/L begrenzt werden, um eine Zusetzung der Infiltrationsstelle zu unterbinden.

Dabei werden folgende Annahmen für das LaWa zu Grunde gelegt:

Tabelle 2: **Auslegungsdaten für die Vorbehandlung zur Versenkung**

Jahreswassermenge	max. 130.000	m ³ /a
Betriebsstunden der Wasseraufbereitungsanlage	8.350	h/a
Wasserdurchsatz	20	m ³ /h
Eingangstemperatur (Wasserannahme)	40 - 70	°C
Feststoffkonzentration (Zulauf - im Mittel)	100	mg/l
Feststoffkonzentration (max. Ablauf)	2	mg/l
Korngröße (Ablauf)	5	µm

direkt abscheidbare KWST (Zulauf - im Mittel)	10	mg/l
direkt abscheidbare KWST (Ablauf)	max. 2	ppm
biologisch inert	entfällt	
Sauerstoffgehalt	0	%

Die Konzeptstudie /CD: U 49, U 50/ gibt hierzu folgende Lösungsvarianten an:

1. Tellerseparator oder
2. Ultrafiltration oder
3. Flotation oder
4. Hydrozyklon/Walnusschalenfilter

Die technisch-ökonomischen Vor- und Nachteile dieser Aufbereitungsverfahren werden durch Fa. Aquaconsult /CD: U 50/ wie folgt angegeben:

Tabelle 3: Verfahrensvariante 1 Tellerseparator

Vorteile	Nachteile
Getrennte Abscheidung von Leicht- und Sinkstoffen in einer Stufe	Hohe Werkstoffanforderungen (Korrosion)
Bei RWE Dea mit Reinigungswasser erprobtes Verfahren	Probleme mit Stoffen sehr hoher Dichte (speziell Quecksilber)
Kompakte Bauweise	Hoher Energiebedarf
Geschlossene Ausführung	Aufwand für Reinigung und Instandhaltung hoch
Sichere Verfahrenstechnik (in Bezug auf die Einhaltung der Zielparameter)	Scalinggefahr

Tabelle 4: Verfahrensvariante 2 Ultrafiltration

Vorteile	Nachteile
Sichere Verfahrenskombination in Bezug auf die Einhaltung der Zielparameter (keramische Membran mit definierter Porengröße)	Hoher Energiebedarf
Geringer Technisierungsgrad im Vergleich zu Konzept 4 (hoher Anteil statischer Bauteile)	Hohe Investitionskosten

Geschlossenes System (UF, Vorstufen gasdicht ausführbar)	Fouling-/Scaling-Gefahr
Modularer Aufbau	Zusätzliche anfallender Abfallstrom (Reinigungschemikalien)
Variabler Durchsatz	

Tabelle 5: **Verfahrensvariante 3 Flotation**

Vorteile	Nachteile
Offenes Verfahren ohne Einbauten	Hoher Technisierungsgrad
Kein Scaling / Fouling	Hoher Betreuungsaufwand
3-Phasen-Trennung in einer Stufe	Keine mechanische Barriere
Möglichkeit der Abscheidung von Nebenprodukten (z. B. Hydroxiden)	Abscheidegrad nur über Chemikaliengabe regulierbar
Höhere Varianz aufgrund des Chemikalieneinsatzes	Machbarkeitsstudie (Tests) erforderlich
	Teile der zugegebenen Chemikalien werden möglicherweise mit verpresst
	Reststoffanfall

Tabelle 6: **Verfahrensvariante 4 Hydrozyklon / Walnussschalenfilter**

Vorteile	Nachteile
Mit „Wasser Mittelplate“ erprobtes Verfahren (Hydrozyklon, Walnussschalenfilter)	Fouling-/Scaling-Gefahr
Geschlossenes System	Tiefbettfilter: - keine getrennte Entnahme der freien KWST - Scalingneigung - Trotz Rückspülbarkeit schwierige Reinigungsmöglichkeiten
Modularer Aufbau	Hydrozyklon-Auslegung nur über Versuchsdurchführung
	Konstanter Zulaufstrom erforderlich
	Reststoffentsorgung
	Aufkonzentrierung von Feinstoffen möglich

Für die **technisch-ökonomische Verfahrensauswahl** der für die Vorbehandlung des Lagerstättenwassers vor der Versenkung vorgeschlagenen Behandlungskonzepte zur Entfernung von frei abscheidbaren Kohlenwasserstoffen und abfiltrierbaren Stoffen ergab sich folgendes Ranking (Punkteskala 0 = keine Übereinstimmung bis 5 = vollständige Übereinstimmung).

Tabelle 7: **Technisch-ökonomische Rangfolge der betrachteten Verfahren**

Konzeptvariante	Punktbewertung Aquaconsult	Ranking
Tellerseparator	3,16	3
Ultrafiltration	3,67	1
Flotation	1,86	4
Hydrozyklon/Walnusschalenfilter	3,42	2

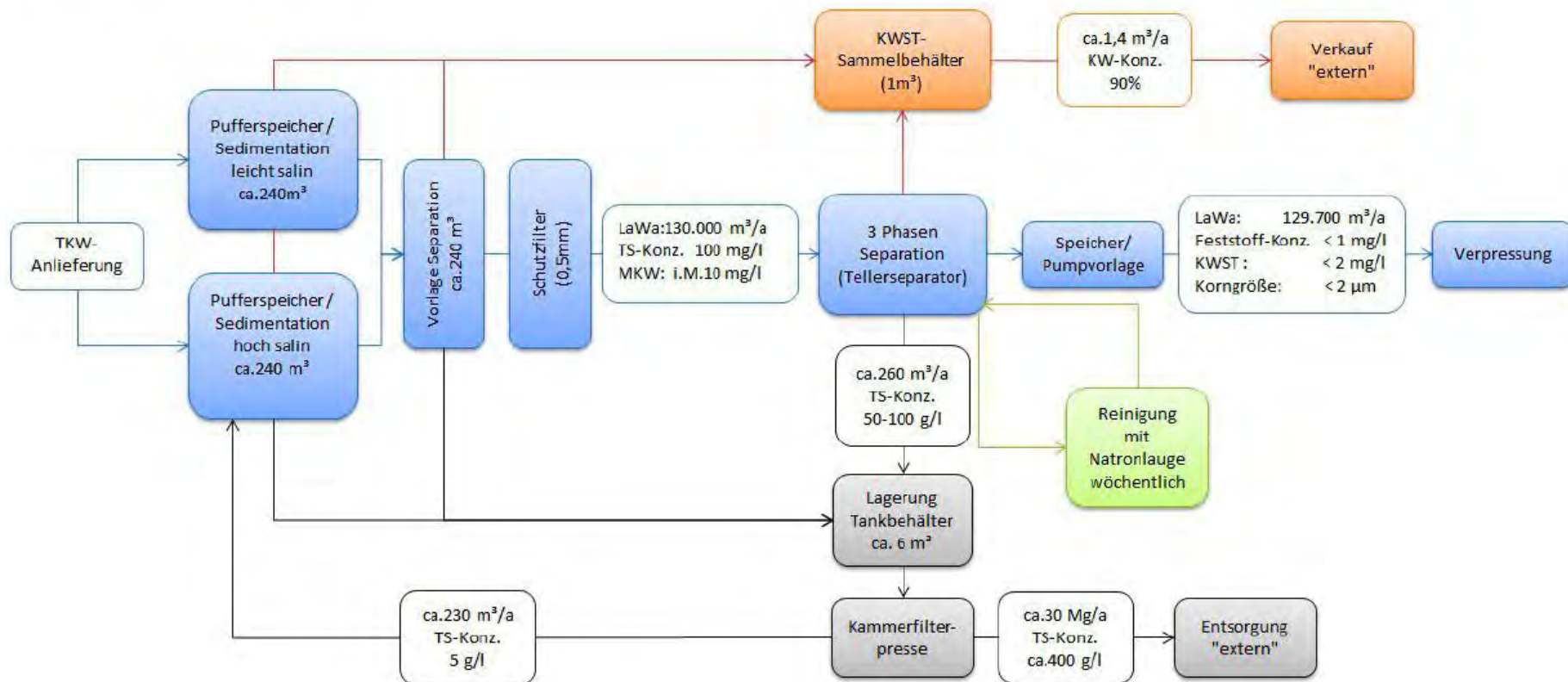
Die Bewertung erfolgte auf Basis einer Wichtung von

- 57 % Sicherheit und Zuverlässigkeit
- 31 % Technik
- 12 % Kommerzielles

Abgesehen von der deutlich negativen Bewertung des Flotationsverfahrens liegen die übrigen Verfahren dicht beieinander.

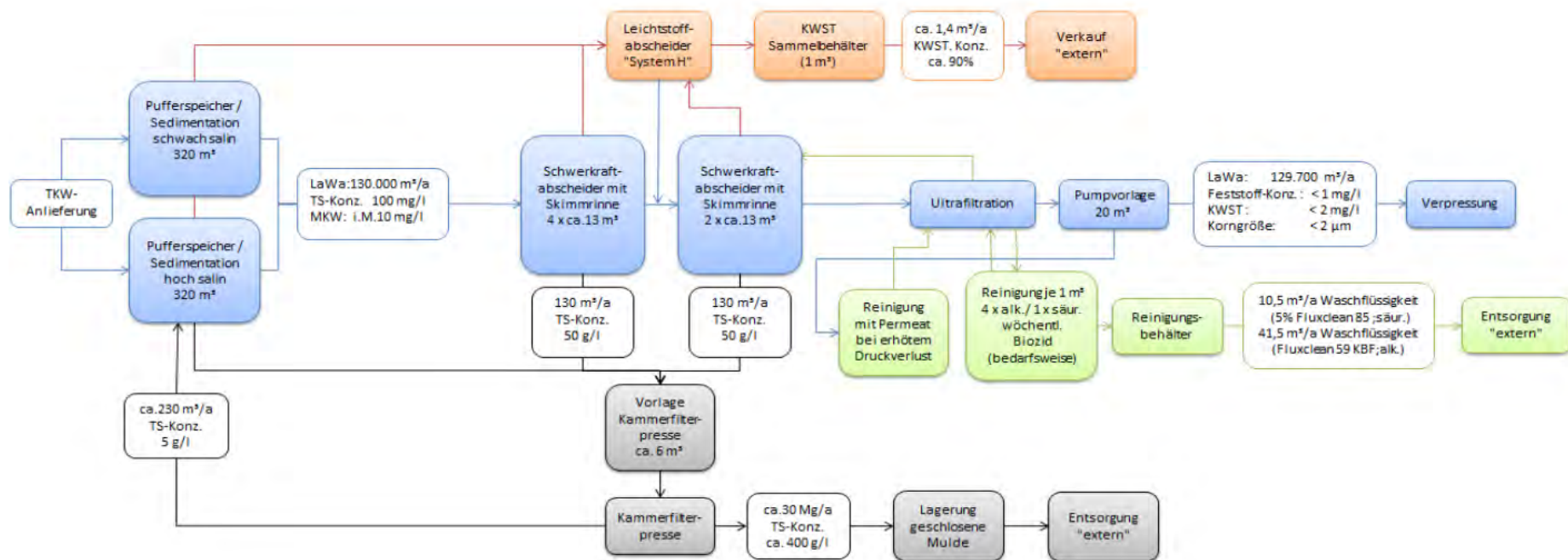
Konzept 1- Teller-Separator

➤ Grundfließbild



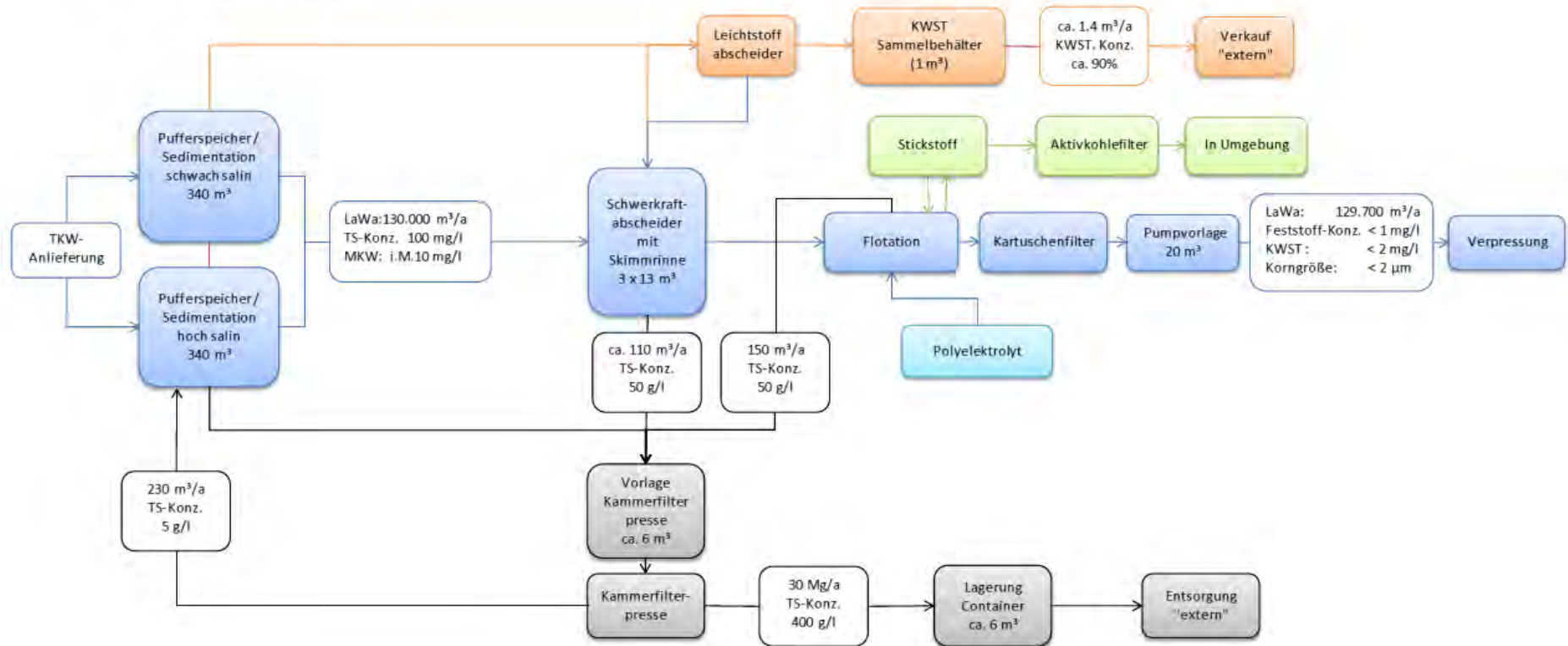
Konzept 2 - Ultrafiltration

➤ Grundfließbild



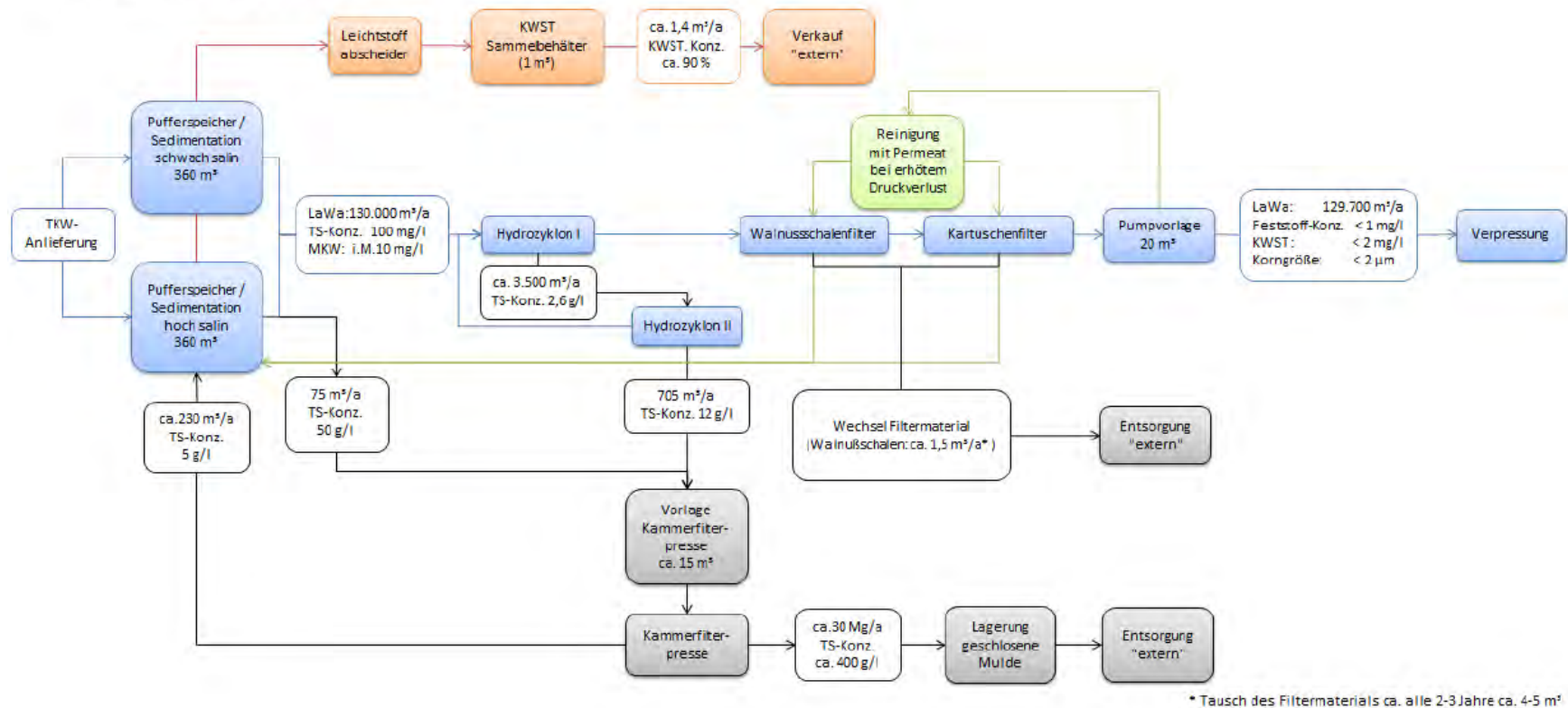
Konzept 3 - Flotation

➤ Grundfließbild



Konzept 4 – Hydrozyklon / Walnusschalenfilter

➤ Grundfließbild



4 Ökologische Bewertungskriterien

Im vorliegenden Sonderteil soll ein Bewertungsrahmen vorgeschlagen werden, der anhand ökologischer Kriterien und Einflußgrößen eine vergleichende Betrachtung zwischen verschiedenen technischen Aufbereitungsvorschlägen (Verfahren) erlaubt, ohne den Anspruch auf eine Ökobilanz mit Einbeziehung der vorgelagerten (Liefer)prozesse wie Herstellung und Transport von Hilfsmitteln und Abtransport und Entsorgung von Abfällen zu betrachten.

Damit wird eher ein Set von Kenngrößen vorgeschlagen, um die technisch ausgewählten Verfahren anhand ökologischer Parameter zu bewerten. Auf Basis dieser Verfahrensbewertung lassen sich die in der Hauptstudie betrachteten Optionen zur Aufbereitung und zum Verbleib von Lagerstättenwasser auf einen Bilanzrahmen ausweiten, der auch die Transport- und Verbleibprozesse des LaWa in die Bewertung einbindet.

Als hilfreich erweisen sich solche Kriterien-Sets, die zugleich den Stand der Technik im Sinne „Bester Verfügbare Technik“ (BVT, BAT) beschreiben. In Anlage 1 des WHG (BGBl. I 2009, 2614) werden insgesamt zwölf Kriterien angeführt, die den Stand der Technik¹ umschreiben. Hierzu gehören unter den hier relevanten Umweltgesichtspunkten:

1. Einsatz abfallarmer Technologie,
2. Einsatz weniger gefährlicher Stoffe,
3. Förderung der Rückgewinnung und Wiederverwertung der bei den einzelnen Verfahren erzeugten und verwendeten Stoffe und gegebenenfalls der Abfälle,
4. Art, Auswirkungen und Menge der jeweiligen Emissionen,
5. Verbrauch an Rohstoffen und Art der bei den einzelnen Verfahren verwendeten Rohstoffe (einschließlich Wasser) sowie Energieeffizienz,
6. Notwendigkeit, die Gesamtwirkung der Emissionen und die Gefahren für den Menschen und die Umwelt soweit wie möglich zu vermeiden oder zu verringern,
7. Notwendigkeit, Unfällen vorzubeugen und deren Folgen für den Menschen und die Umwelt zu verringern,

Damit erscheint es sinnvoll, zur ökologischen Bewertung verschiedener Verfahrenskonzepte folgende Kriterien zu quantifizieren:

¹ Bei der Bestimmung des Standes der Technik sind unter Berücksichtigung der Verhältnismäßigkeit zwischen Aufwand und Nutzen möglicher Maßnahmen sowie des Grundsatzes der Vorsorge und der Vorbeugung, jeweils bezogen auf Anlagen einer bestimmten Art, insbesondere folgende Kriterien zu berücksichtigen

Tabelle 8: Vorgeschlagene ökologische Kriterien für eine vergleichende Verfahrensbewertung

Kriterium	Kenngröße ²	Einheit
Abfallarme Technologie	Menge des entstehenden Abfalls	Mg (t)
Einsatz weniger gefährliche Stoffe	Chemikalienverbrauch/ Gefahrstoffanteil bezogen auf 0-100 % eingesetzte Stoffe	%
Rückgewinnung Einsatzstoffe/Abfälle	Recyclingquote stofflich	%
Art, Menge, Auswirkungen der Emissionen, Reduzierung der Umweltgefahren aufgrund von Emissionen	Emissionen (Art, Menge, Folgen), insbesondere Gefahrstoffverteilung auf andere Umweltkompartimente (Abluft, Abfall, Abwasser), Immissionswirkung aufgrund Akkumulation, Abbaubarkeit/ Persistenz, Verteilungskoeffizienten u.ä.)	Qualitatives ranking
Rohstoffbedarf (Fällungsmittel, Adsorber, Filtermodule, Reinigungsmittel)	a.) Rohstoffe incl. Wasserverbrauch, b.) Hilfsmittel (Wartung, Pflege)	kg bzw. L kg
Energiebedarf	Energieverbrauch (elektr. u. thermisch als Primärenergiebedarf oder HEL)	kWh
Flächenbedarf	Verbrauch an unversiegelter Fläche für Anlage/Umschlagflächen/Trassenführung	m ²
Unfall-/Risikovorsorge	Anlagen-/Arbeitssicherheit abhängig von Druck/Temperatur/Ex-Verhalten	Risiko = Schadensausmaß mal Häufigkeit

Grundsätzlich ist zur Erstellung eines „ökologischen Verfahrensvergleichs“ eine geeignete Auswahl der genannten Kriterien erforderlich, die sich an den ökologischen Schwerpunkten der Bewertung orientieren sollte. Im vorliegenden Fall liegt ein Schwerpunkt auf dem Ressourcenverbrauch, der Emission von Schadstoffen und deren Verteilung auf verschiedene Umweltkompartimente (Abluft, Abwasser, Abfall entsprechend Luft, Oberflächengewässer und Boden) sowie der Freisetzungsgefahr z.B. durch Betriebsstörungen. Die Verteilung der Gefahrstoffe kann dabei unmittelbar (direkte Emission über Abluft) oder mittelbar (Wirkungspfade wie Boden-Nahrung-Mensch) erfolgen.

² Es ist sinnvoll, die jeweilige Kenngröße auf einen bestimmten Zeitraum oder die behandelte Abwassermenge zu beziehen.

Im folgenden Kapitel ist die Bewertung anhand ausgewählter ökologischer Kriterien für vier nach technischen Vorgaben ausgewählten Verfahren zur Vorbehandlung von Lagerstättenwasser für die Versenkung ins Rotliegende vorgenommen worden.

5 Ökologische Bewertung am Beispiel von vier Aufbereitungsverfahren

Als Beispiel für die ökologische Bewertung im direkten Verfahrensvergleich wurden die vier Verfahrensvorschläge zur Aufbereitung des Lagerstättenwassers zur Versenkung ausgewählt, vgl. Abschnitt 3:

- Tellerseparator
- Ultrafiltration
- Flotation
- Hydrozyklon/Walnusschalenfilter

Für den ökologischen Verfahrensvergleich müssen folgende Rahmenbedingungen beachtet werden:

1. Der Betrachtungsrahmen (der Begriff "Bilanzrahmen" soll hier bewußt vermieden werden, um den Unterschied zu einer Ökobilanz zu verdeutlichen) wird begrenzt auf die LaWa-Behandlung zwischen Verfahrens-Input (Stapeltank Aufbereitungsanlage) und Verfahrens-Output (erzeugte Aufbereitungsprodukte bzw. Emissionen)
2. Bei der Aufbereitung zur Versenkung sind nur die suspendierten Feststoffe und die frei abscheidbaren Kohlenwasserstoffe Gegenstand der Aufbereitung; gelöste BTEX, Salze und NORM verbleiben im aufbereiteten Lagerstättenwasser zur Versenkung und können deshalb nicht als "negative Emission" ins erzeugte "Abwasser" bewertet werden.
3. Alle vier im ökologischen Vergleich betrachteten Verfahren haben dieselbe Zielstellung (Reduzierung frei abscheidbare KW auf 2 mg/L und suspendierte Feststoffe auf 5 mg/L mit max. 2 µm Korngröße im Ablauf).
4. Das angestrebte Ranking bezieht sich nur auf den durch die Vergleichsverfahren selbst gesteckten Rahmen ohne Einbeziehung eines externen Maßstabes/Qualitätskriteriums; die Einbeziehung neuer Verfahrensvarianten erfordert eine Neubetrachtung aller Varianten durch die Veränderung der Bewertungsskala

Einem von RWE Dea weiterentwickeltem Entscheidungswerkzeug folgend (Erläuterung s. Hauptstudie) wird zunächst für die ausgewählten ökologischen Kriterien (Parameter) eine Rangfolge anhand einer Matrix festgelegt (logarithmische Abstufung 0,1-1,0-10). Dann werden die quantifizierten Kenngrößen der

Bewertungskriterien aus den Verfahrensdaten erhoben und in einem 5-stufigen Punkteraster bewertet. Im Ergebnis erhält man eine Punktbewertung für jeden Parameter und jedes Verfahren auf einer Skala von 1 (sehr schlecht) bis 5 (sehr gut). Diese Bewertungen werden anhand der Kriterienrangfolge (Wichtung) je Verfahren über alle Kriterien zusammengefasst

5.1 Auswahl und Rangfolge der ökologischen Kriterien

Für die Auswahl der für den ökologischen Vergleich heranzuziehenden konkreten Kriterien wird folgende Auswahl vorgeschlagen.

Tabelle 9: **Ausgewählte Parameter für den Vergleich**

BEWERTUNGSKRITERIEN	Was wird bewertet
Ressourcen	
(Primär-)energieverbrauch	Welchen spezifischen Verbrauch an Primärenergie weist das Verfahren auf?
Betriebsmittelbedarf (Rohstoffe)	Wie hoch ist der spezifische Bedarf an Betriebsstoffen einschließlich Frischwasser für den Gesamtprozess?
Hilfsstoffbedarf	Wie hoch ist der spezifische Bedarf an Hilfsstoffen für Reinigung/Wartung? Wie anfällig/aufwändig ist die Technik; wie hoch ist der Materialverschleiß?
Flächenverbrauch	Wie hoch ist der Bedarf vor allem an bislang unversiegelten Flächen für den Anlagenstandort einschl. solcher für Lagerung/Umschlag und Rohrleitungstrassen
Gefahrenpotential	
Gefahrstoffanteil	Wie hoch ist der Anteil an kennzeichnungspflichtigen Gefahrstoffen an den eingesetzten Betriebs- und Hilfsstoffen ?
Abfallentstehung	Handelt es sich um eine abfallarme Technologie? Wieviel Abfall in kg/Mg entsteht zusätzlich bezogen auf die enthaltene bzw. entfernte Schadstofffracht. Zu welchem Anteil werden Abfälle bzw. eingesetzte Betriebsmittel stofflich recycelt?
Schadstoffeffizienz	Wie hoch ist der Grad der Schadstoffentfernung gemessen an den Zielwerten einer vollständigen Elimination?
Emissionsbegrenzung	
Prozessemissionen	Ist das Verfahren z.B. durch geschlossene Bauweise emissionsarm (Abluft)? Wird die Abluft kontrolliert erfasst und nach dem Stand der Technik gereinigt? Entstehen durch den Prozess Luft-/Klimaschadstoffe? Werden persistente, akkumulierbare oder nicht abbaubare Inhaltsstoffe des Aufbereitungsmediums freigesetzt?
Anlagensicherheit	Besteht ein geringes, mittleres oder hohes Freisetzungsrisiko durch explosionsfähige Atmosphäre, hohen Druck oder hohe Temperatur? Ist das Freisetzungsrisiko durch hohen MSR-Aufwand aufgrund komplexer Technik ggfs. erhöht?

Zur Festlegung und Abstufung der Kriterienrangfolge wird das in Anhang 1 dargestellte Excel-Datenblatt verwendet, in welchem die Kriterien logarithmisch gegeneinander bewertet werden:

- 0,1 bedeutet geringerwertig als Vergleichskriterium
- 1,0 bedeutet gleichwertig mit Vergleichskriterium
- 10 bedeutet höherwertig als Vergleichskriterium

Es ergibt sich folgende Gewichtung der Bewertungskriterien:

Tabelle 10: Gewichtung der Bewertungskriterien

Kriterium	Gewichtung
Ressourcen	23,5 %
(Primär-)energieverbrauch	12,9 %
Betriebsmittelbedarf (Rohstoffe)	9,4 %
Hilfsstoffbedarf	0,7 %
Flächenverbrauch	0,7 %
Gefahrenpotential	43,1 %
Gefahrstoffanteil	9,0 %
Abfallentstehung	20,5 %
Schadstoffeffizienz	13,6 %
Emissionsbegrenzung	33,4 %
Prozessemissionen	20,5 %
Anlagensicherheit	12,9 %

5.2 Quantifizierbare Kenngrößen der Bewertungskriterien

Die ausstehende ökologische Verfahrensauswahl benötigt Verfahrenskennndaten und Einzelbewertungen, um eine möglichst objektive Rangfolge ermitteln zu können. Die Prozessdaten (Verbräuche, Betriebsbedingungen, Durchsätze) entstammen der Konzeptstudie /U 49, U50/ (kursiv).

Tabelle 11: Kennndaten der ausgewählten Aufbereitungsverfahren für die Versenkung

Kenngröße	Einheit	Teller-separator	Ultra-filtration	Flotation	Hydrozyklon
Ressourcen					
Primärenergieverbrauch	kWh/a	970.000	1.280.000	1.280.000	970.000
	kWh/m³	7,5	9,9	9,9	7,5
Betriebsmittelverbrauch Art, Menge	kg/a	0	0	Flockungsmittel, sauer 195.000	0
	kg/m³	0	0	1,5	0
Frischwasserverbrauch, geschätzt	m³/a	< 100	< 100	< 100	< 100
	L/m³	<1	<1	<1	<1
Hilfsstoffbedarf Art, Menge	m³/a	Natronlauge 50	Saurer R. 10 Alkal. R. 40	0	0
	kg/m³	0,38	0,38	0	0
Materialverschleiss	-	hoch	mittel	gering	mittel
Flächenverbrauch	m²	< 500	< 500	< 500	< 500
Gefahrenpotential					
Anteil von kennzeichnungspflicht. Gefahrstoffen an Betriebs- u. Hilfsstoffen	kg/m³	0,38 (100 %)	0,38 (100 %)	0	0
Abfallentstehung		gering	gering	hoch	minimal
Abfälle Art, Menge	Mg/a, m³/a	KW 1,4 (90 %ig) TS 30 (40%) NaOH 50	KW 1,4 (90 %ig) TS 30 (40%) saurer R. 10 alk R. 40	KW 1,4 (90 %ig) TS 30 (40%) FHM 195	KW 1,4 (90 %ig) TS 30 (40%)
Gesamt	kg/m³	0,63	0,63	1,61	0,24

Abtransport- menge abs/a	Mg/a	Ca. 82	Ca. 82	Ca. 225	Ca. 32
Abfallverbleib		KW Verwertung TS Deponie	KW Verwertung TS Deponie	KW Verwertung TS Deponie	teilweise getrennte KW-Entnahme, Deponie
Deponieklasse		Geschätzt III	Geschätzt III	Geschätzt III	Geschätzt III
Schadstoff- verteilung auf x Komparti- mente	%	0,01 % Abfall >99 % Rest-Lawa	0,01 % Abfall > 99 % Rest-Lawa	0,01 % Abfall > 99 % Rest-Lawa	0,01 % Abfall > 99 % Rest-Lawa
Schadstoff- effizienz	%	a.) < 0,5 % b.) KW 80 % afS >95 %	a.) < 0,5 % b.) KW 80 % afS >95 %	a.) < 0,5 % b.) KW 80 % afS >95 %	a.) < 0,5 % b.) KW 80 % afS >95 %
Auswirkung auf Luft/Klima	-	Treibhausgase aus Primär- energie, geschlossenes System	Treibhaus- gase aus Primär- energie, ge- schlossenes System	Treibhaus- gase aus Primär- energie, ge- schlossenes System	Treibhaus- gase aus Primär- energie, ge- schlossenes System
Freisetzungs- gefahr					
Prozessemissi- on		gering	gering	hoch	gering
Anlagensicher- heit		hoch	mittel	hoch	mittel
Volumenanteil Ex-Zone 0,1	%	100	100	100	100
Betriebsdruck	bar	Umgebung	5	Umgebung, Dispersions- rohr ca. 5	10
Betriebstemp- eratur	°C	Eingangs- temperatur	Eingangs- temperatur	max. 40	Eingangs- temperatur

5.3 Ökologische Bewertung

Für die ökologische Verfahrensauswahl der Vorbehandlung des Lagerstättenwassers vor der Versenkung werden die vorgeschlagenen Behandlungskonzepte zur Entfernung von frei abscheidbaren Kohlenwasserstoffen und abfiltrierbaren Stoffen einem Ranking unterzogen. Es wird folgende Bewertungsskala verwendet:

Tabelle 12: **Ökologische Bewertungsskala (5-teilig) für Verfahrensvergleich**

➤ 5: sehr gut, Optimum der Bewertungsskala, höchster Vergleichswert des Parameters
➤ 4: gut, angestrebter Zielwert im Verfahrensvergleich
➤ 3: Durchschnitt, Mittelwert der Bewertungsskala, kein wesentlicher Vor- oder Nachteil gegenüber anderen Verfahren für diesen Parameter
➤ 2: schlecht, gerade noch im Vergleich akzeptabel, klar verbesserungsfähig
➤ 1: ungenügend, schlechtestes Ergebnis, niedrigster Vergleichswert

Die Vergabe der Punkte aus der Bewertungsskala kann grundsätzlich nach drei Ansätzen erfolgen:

- a) die Punktbewertung 1-5 bezieht sich nur auf die zum Vergleich stehenden Verfahren, so dass jeweils der beste Wert des jeweiligen quantifizierten Parameters die höchste Punktzahl „5“ erhält, der schlechteste die „1“ und eine mittlere, durchschnittliche Bewertung die „3“.
- b) Die Punktbewertung bezieht sich auf externe Referenzwerte des jeweiligen Parameters, soweit diese verfügbar sind, und bezieht die eigenen Ergebnisse des betrachteten Verfahrens auf den Min-Max-Wertebereich der Referenzwerte
- c) Eine Kombination aus a) und b).

Die Methode a) bietet den Vorteil, aus einem Satz betrachteter Verfahren, dasjenige mit dem relativ besten ökologischen Bewertungsprofil zu bestimmen. Methode b) liefert eine Einordnung der betrachteten Verfahren gegenüber einem absoluten externen Standard (Referenz). Mangels geeigneter Referenzwerte (z.B.: ab welchem Energieverbrauch sind Verfahren als „schlecht“ oder „gut“ zu bewerten) ist die Variante b) kaum durchführbar oder die Vergleiche werden auf kumulierende Kenngrößen (CO₂-Abdruck) reduziert, die kaum mehr eine Ursachenzuordnung für eine gute oder schlechte Bewertung transparent werden lassen. Eine Kombination schafft ebenso eine erforderliche Differenzierung und macht eine Einzelbetrachtung der „Noten“ erforderlich und die Untersuchung, welcher Parameter den entscheidenden Einfluss ausübt. Im vorliegenden Beispiel eines ökologischen Vergleichs wird möglichst mit Methode a), einer direkten ökologischen Rangfolge der 4 betrachteten Aufbereitungsverfahren untereinander, gearbeitet.

Tabelle 13: **Punktbewertungsschema**

Kriterium	Bewertungsrahmen
Ressourcen	
(Primär-)energieverbrauch	Der mittlere Energieverbrauch liegt bei 1.125.000 kWh/a = 3 Punkte
Betriebsmittelbedarf (Rohstoffe)	Der hohe Flockmittelbedarf lässt die Flotation deutlich negativ (1 Pkt.) gegenüber den anderen Betriebsmittel-freien Verfahren dastehen (5 Pkt)
Hilfsstoffbedarf	Der Hilfsstoffbedarf beim Tellerseparator und der UF ergeben zusammen mit dem hohen Materialverschleiß eine Abwertung gegenüber den anderen Verfahren (1 bzw. 2 Pkte gegenüber 4/5 Punkten)
Flächenverbrauch	Bei den hier benötigten Kleinanlagen < 500 m ² Standfläche ohne Trassenführung (Pipelines) führen die Bewertungen im Rahmen der betrachteten Verfahren zu einem Mittelwert (3 Pkt.)
Gefahrenpotential	
Gefahrstoffanteil	Bei den zugesetzten Hilfsstoffen für Tellerseparator und UF handelt es sich vollständig um (ätzende) Gefahrstoffe, deren Anteil aber selbst bei intensiver Reinigung insgesamt gering bleibt (deshalb in der Punktbewertung „3“); Für die Flotation ergäbe sich hier eine deutlich schlechtere Bewertung als „5“, wenn das Fällungs-/Flockungsmittel ein relevanter Gefahrstoff ist (relevant ist der Gefahrstoff dann, wenn er zu einer Einstufung als gefährlicher Abfall führt, obwohl der entfernte Inhaltsstoff selbst keinen gefährlichen Abfall darstellt; dies ist hier nicht zu erwarten, da die Flockung nur der Entfernung der suspendierten Feststoffe dient und keine Gefahrenanreicherung zu erwarten ist).
Abfallentstehung	Bewertet werden in der Rangfolge die zusätzlich zu den entfernten Inhaltstoffen erzeugten Abfälle. Bei allen Verfahren fallen die KW als geringe Abfallmenge zur Verwertung an: hier bestehen Verbesserungspotentiale in der frühzeitigen Abtrennung über Schwerkraftabscheider bereits an den Bohrstellen (DIN EN 858 !). Bis auf das Flotationsverfahren fallen die suspendierten Feststoffe als entwässerungsfähiger Schlamm mit 40 % TS an; bei der Flotation fällt ein vermehrter Flotatschlamm an, der das Abfallaufkommen je nach Flockungsmittel deutlich erhöht. Bei der UF sind verbrauchte Module beim Abfallaufkommen bzw. beim Aufwand für die Regenerierung zu beachten.
Schadstoffeffizienz	Schadstoffeffizienz und-verteilung sind im vorliegenden Fall für alle Verfahren gleich durchschnittlich zu bewerten („3 Punkte“), da nur afS und KW entfernt werden und keine erhöhte Schadstoffanreicherung durch ein einzelnes Fest/Flüssigtrennverfahren zu erwarten ist

Emissionsbegrenzung	
Prozessemissionen	Alle Verfahren bis auf die Flotation sollen in geschlossener Bauweise betrieben werden; eine gezielte Abluftf Erfassung ist nicht erforderlich. Bei der Behandlung entstehen verfahrensbedingt keine (zusätzlichen) Luftschadstoffe. Die schlechte Emissionsbewertung der Flotation ist auf die unkontrollierte Einbindung gelöster Inhaltsstoffe in das Flotat (BTEX?!) und die Vermehrung des behandelten LaWa um das Flockungsmittel zu sehen.
Anlagensicherheit	Alle Verfahren werden aufgrund der anwesenden KW in exgeschützter Bauweise geplant; eine Gefährdungsanalyse liegt aber nicht vor; die Temperaturen sind sicherheitstechnisch unbedenklich und lassen auch keine unerwünschten Reaktionen erwarten. Die Druckerhöhungen beziehen sich auf die Zuführung des wässrigen Mediums zur Behandlungsanlage und können insoweit nur kleinräumige Freisetzungen bedingen. Die Differenzierung der Punktebewertung erfolgt auch anhand des MSR-Aufwandes.

Unter Verwendung der in Anlage 1 beigefügten Excel-Tabellenverknüpfung erfolgt über die gewichteten Kriterien und zugeordneten Punktwerte aus der Bewertungsskala 1-5 eine Gesamtbewertung, s. nachstehende Tabelle 13.

Tabelle 14: **Gesamtbewertung des ökologischen Verfahrensvergleichs nach Gewichtung**

Gewichtung		Konzept 1 Tellersepara- tor		Konzept 2 Ultrafiltra- tion		Konzept 3 Flotation		Konzept 4 Hydro- zyklon	
BEWERTUNGS- KRITERIEN	% von 100	Punkte	Wert	Punkte	Wert	Punkte	Wert	Punkte	Wert
Ressourcen	24 %								
(Primär-)energieverbrauch	13 %	4	0,52	2	0,26	2	0,26	4	0,52
Betriebsmittelbedarf (Rohstoffe)	9 %	5	0,47	5	0,47	1	0,09	5	0,47
Hilfsstoffbedarf/Ver- schleiss	1 %	1	0,01	2	0,01	5	0,04	4	0,03
Flächenverbrauch	1 %	3	0,02	3	0,02	3	0,02	3	0,02
Gefahrenpotential	43 %								
Gefahrstoffanteil Einsatzstoffe	9 %	3	0,27	3	0,27	5	0,45	5	0,45
Abfallentstehung	21 %	4	0,82	4	0,82	1	0,21	5	1,03
Schadstoffeffizienz	14 %	3	0,41	3	0,41	3	0,41	3	0,41
Emissions- begrenzung	33 %								
Prozessemission	21 %	4	0,82	4	0,82	2	0,41	4	0,82
Anlagensicherheit	13 %	5	0,65	3	0,39	5	0,65	3	0,39
Gesamt	100		3,98		3,47		2,53		4,13
Ranking			2.		3.		4.		1.

Danach ergibt sich folgende Rangfolge der 4 Verfahrenskonzepte vor dem Hintergrund ökologischer Kriterien, zum Vergleich ist die Rangfolge unter technisch-ökonomischen Gesichtspunkten angegeben, vgl. Abschnitt 3

Tabelle 15: Rangfolge Übersicht der 4 Verfahrensvarianten

Konzept-variante	Punktbewertung technisch-ökon.	Ranking technisch-ökon.	Punkt-bewertung ökologisch	Ranking ökologisch
Tellerseparator	3,16	3	3,98	2
Ultrafiltration	3,67	1	3,47	3
Flotation	1,86	4	2,53	4
Hydrozyklon/ Walnusschalen- filter	3,42	2	4,13	1
Gewichtung	• 57 % Sicherheit, Zuverlässigkeit • 31 % Technik • 12 % Kommerzielles		• 43 % Gefahrenpotential • 33 % Emissionsbegrenzung • 24 % Ressourcen	

Die ökologische Bewertung der vier Verfahrenskonzepte zur Aufbereitung des Lagerstättenwassers für die Versenkung ins Rotliegende zeigt ebenso wie die technisch-ökonomische Bewertung einen deutlichen Nachteil für die Flotation. Mit Abstand liegen die anderen Verfahren sowohl technisch-ökonomisch als auch ökologisch vorn. Die Unterschiede dieser drei Verfahren fallen insgesamt gering aus, wobei bei der ökologischen Bewertung der Tellerseparator und der Hydrozyklon nahezu identisch bewertet werden und besser als die Ultrafiltration abschneiden.

Während technisch-ökonomisch durch die Konzeptersteller der Ultrafiltration der Vorzug gegeben wird, sieht die ökologische Bewertung Tellerseparator oder Hydrozyklon im Vorteil, da beide nur geringe Ressourcen verbrauchen und das Gefahrenpotential durch den Verzicht auf Betriebsmittel (z.B. Flockungsmittel und entsprechende Abfälle) auskommen. Die Ultrafiltration verliert demgegenüber etwas durch den Energieverbrauch.

Die ermittelte Bewertungsreihenfolge ist als Vorschlag für die weitere Verfahrensauswahl zu verstehen und erhebt keinen Anspruch auf wissenschaftlich begründete Absolutheit. Die Auswahl wird sich vor allem an den Risiken mangelnder Betriebserfahrung der ausgewählten Verfahren in Bezug auf Lagerstättenwasser orientieren müssen. Auf die Ausschöpfung der Vorbehandlung an den Bohrstellen wird ausdrücklich hingewiesen.

Quellenverzeichnis

- L 44 Rosenwinkel, H.; Weichgrebe, D.; Olsson, O.: Stand der Technik und fortschrittliche Ansätze zur Entsorgung des Flowback, Hannover, Mai 2012
- CD: U 25 Gellermann, R. (NCC GmbH): Gutachten zur Prüfung und Bewertung von Produktionsabwässern in Hinblick auf strahlenschutzfachliche Fragen im Zusammenhang mit der Entsorgung; 12.12.2012
- CD: U 49 Fa. Aquaconsult, Hannover: Kurzreport LaWa Völkersen
- CD: U 50 Fa. Aquaconsult, Hannover: Bericht LaWa Völkersen – Konzeptstudie, Planung für primäre und sekundäre Aufbereitung; 18.07.2013

Zu weiteren Quellen wird auf das Hauptgutachten verwiesen.

Anlage 1: Excel-Tabelle Bewertungsraster

		Gewichtung	Konzept 1 - Tellerseparator		Konzept 2 - Ultrafiltration		Konzept 3 - Flotation		Konzept 4 - Hydrozyklon		Bemerkungen	Gewichtungsberechnung
BEWERTUNGSKRITERIEN		% of 100	Score	Value	Score	Value	Score	Value	Score	Value		
Ressourcen		24%										
(Primär-)energieverbrauch		13%	4	0,52	2	0,26	2	0,26	4	0,52		
Betriebsmittelbedarf (Rohstoffe)		9%	5	0,47	5	0,47	1	0,09	5	0,47		
Hilfsstoffbedarf/Materialverschleiss		1%	1	0,01	2	0,01	5	0,04	4	0,03		
Flächenverbrauch		1%	3	0,02	3	0,02	3	0,02	3	0,02		
Gefahrenpotential		43%		0,00		0,00		0,00		0,00		
Gefahrstoffanteil Einsatzstoffe		9%	3	0,27	3	0,27	5	0,45	5	0,45		
Abfallentsorgung		21%	4	0,82	4	0,82	1	0,21	5	1,03		
Schadstoffeffizienz		14%	3	0,41	3	0,41	3	0,41	3	0,41		
Emissionsbegrenzung		33%		0,00		0,00		0,00		0,00		
Prozessemission		21%	4	0,82	4	0,82	2	0,41	4	0,82		
Anlagensicherheit		13%	5	0,65	3	0,39	5	0,65	3	0,39		
Gesamt		100%		3,98		3,47		2,53		4,13		
Ranking				2.		3.		4.		1.		

		Ressourcen	(Primär-)energieverbrauch	Betriebsmittelbedarf (Rohstoffe)	Hilfsstoffbedarf/Materialverschleiss	Flächenverbrauch	Gefahrenpotential	Gefahrstoffanteil Einsatzstoffe	Abfallentstehung	Schadstoffeffizienz	Emissionsbegrenzung	Prozessemission	Anlagensicherheit		Total Points	Per Cent
BEWERTUNGSKRITERIEN																
Ressourcen																23,5
(Primär-)energieverbrauch				1	10	10		10	0,1	0,1		1	1		33	12,9
Betriebsmittelbedarf (Rohstoffe)			1		10	10		1	1	1		0,1	0,1		24	9,4
Hilfsstoffbedarf/Materialverschleiss			0,1	0,1		1		0,1	0,1	0,1		0,1	0,1		2	0,7
Flächenverbrauch			0,1	0,1	1			0,1	0,1	0,1		0,1	0,1		2	0,7
Gefahrenpotential																43,1
Gefahrstoffanteil Einsatzstoffe			0,1	1	10	10			0,1	1		0,1	1		23	9,0
Abfallentstehung			10	1	10	10		10		1		1	10		53	20,5
Schadstoffeffizienz			10	1	10	10		1	1			1	1		35	13,6
Emissionsbegrenzung																33,4
Prozessemission			1	10	10	10		10	1	1			10		53	20,5
Anlagensicherheit			1	10	10	10		1	0,1	1		0,1			33	12,9
Gesamt															258	100
Ranking																