

Planfeststellungsverfahren zur Stilllegung des Endlagers für radioaktive Abfälle Morsleben

Verfahrensunterlage

Titel: Konzeptplanung der Schachtverschlüsse Bartensleben und Marie des ERA
Morsleben

Autor: Rauche, H., Sitz, P., Lukas, V., Rumphorst, K., Lippmann, G., Wagner, K.,
Bodenstein, J. & Teichert, T.

Erscheinungsjahr: 2004

Unterlagen-Nr.: P 182

Revision: 00

Unterlagenteil:



BfS	Konzeptplanung der Schachtverschlüsse für die Schächte Bartensleben und Marie des ERA Morsleben	
9M/ 223 450 11/GHS/ TF/ 0001/00	Stand: 10.03.2004	Seite 2 von 215

ZUSAMMENFASSUNG

ERCOSPLAN Ingenieurgesellschaft Geotechnik und Bergbau mbH, TU Bergakademie Freiberg, Institut für Bergbau, Kali und Salz Consulting GmbH

Konzeptplanung der Schachtverschlüsse für die Schächte Bartensleben und Marie des ERA Morsleben

Stichworte: ERA Morsleben, Schachtverschlusssystem, Konzeptplanung, Nachweisführung, Sicherheit

Im Auftrag des BfS erarbeitete die ARGE auf der Basis des Leistungsbildes „Objektplanung für Ingenieurbauwerke und Verkehrsanlagen“ des § 55 der HOAI die Konzeptplanung der Schachtverschlussbauwerke für die Schächte Bartensleben und Marie des ERA Morsleben.

Auf der Basis des derzeitigen Kenntnisstandes sowie gültiger Vorschriften und Gesetze wurden für einen Betrachtungszeitraum von 30.000 Jahren und einen durch die Schachtverschlüsse durchtretenden Fluidvolumenstrom von kleiner 2 m³/a als Zielvorgabe die Bauwerksentwürfe für die beiden Schächte des ERA Morsleben konzipiert.

Für die in den Bauwerksentwürfen ausgewiesenen Baustoffe wurden zunächst die Nachweise der Langzeitstabilität geführt. Darauf aufbauend wurden die Nachweise für die Tragfähigkeit und die Gebrauchstauglichkeit der im Konzept entworfenen Schachtverschlussbauwerke erfolgreich erbracht. Abschließend erfolgte eine Wertung in Bezug auf die mit dem Bauwerksentwurf erreichten Sicherheitsniveaus.

BfS	Konzeptplanung der Schachtverschlüsse für die Schächte Bartensleben und Marie des ERA Morsleben	
9M/ 223 450 11/GHS/ TF/ 0001/00	Stand: 10.03.2004	Seite 3 von 215

INHALTSVERZEICHNIS

ZUSAMMENFASSUNG	2
INHALTSVERZEICHNIS	3
ABBILDUNGSVERZEICHNIS	7
TABELLENVERZEICHNIS	10
ANLAGENVERZEICHNIS	12
ABKÜRZUNGEN UND SYMBOLE	13
1 VERANLASSUNG UND AUFGABENSTELLUNG	16
2 METHODIK	19
3 ANALYSE DER GRUNDLAGEN	20
3.1 Stand der Technik von langzeitsicheren Schachtverschlüssen für Grubenbaue im wasserlöslichen Gebirge	21
3.1.1 Historische Entwicklung in Deutschland	22
3.1.1.1 Erste Etappe (1924 bis 1960)	23
3.1.1.2 Zweite Etappe (nach 1960 bis 1985)	24
3.1.1.3 Dritte Etappe (ab 1985)	25
3.1.2 Internationale Endlagerprojekte im Salinar	27
3.1.3 Vergleich von Konstruktionsprinzipien unter besonderer Beachtung der Langzeitfunktion	30
3.1.3.1 Dichtelement	32
3.1.3.2 Widerlager	33
3.1.3.3 Füllsäule	35
3.1.4 Vergleich von Materialien unter besonderer Beachtung der Langzeitbeständigkeit	35
3.1.4.1 Dichtelement	36
3.1.4.2 Widerlagersäule	38
3.1.4.3 Füllsäule	38
3.1.5 Materialauswahl und mögliche Schachtverschlusskonzeptionen	39
3.1.5.1 Homogene Füllsäule	40
3.1.5.2 Geschichtete Füllsäule	41

BfS	Konzeptplanung der Schachtverschlüsse für die Schächte Bartensleben und Marie des ERA Morsleben	
9M/ 223 450 11/GHS/ TF/ 0001/00	Stand: 10.03.2004	Seite 4 von 215

3.1.5.3	Dichtelemente ohne Redundanz	42
3.1.5.4	Dichtelemente mit Redundanz	42
3.1.5.5	Dichtelemente aus diversitärem Material und/oder mit konstruktiver Diversität	44
3.2	Normen und Richtlinien für Sicherheitsbetrachtungen von Ingenieurbauwerken und Rechtsvorschriften für die Verwahrung von Schächten	45
3.2.1	Grenzzustand der Tragfähigkeit	47
3.2.2	Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit	48
3.2.3	Dauerhaftigkeit und Wirksamkeit	48
3.2.4	Sicherheit	49
3.2.5	Richtlinien und Rechtsvorschriften für die Verwahrung von Schächten	49
4	ZIELVORSTELLUNGEN UND RANDBEDINGUNGEN	50
4.1	Geologische, hydrogeologische und bergbauliche Situation an den Schächten Marie und Bartensleben	50
4.1.1	Schacht Bartensleben	52
4.1.1.1	Geologische Situation	52
4.1.1.2	Hydrogeologische Situation	55
4.1.1.3	Geomechanische Situation	58
4.1.1.4	Bergbauliche Situation	60
4.1.2	Schacht Marie	61
4.1.2.1	Geologische Situation	61
4.1.2.2	Hydrogeologische Situation	63
4.1.2.3	Geomechanische Situation	65
4.1.2.4	Bergbauliche Situation	66
4.2	Zielvorgaben und Randbedingungen aus dem Stilllegungskonzept	68
5	SICHERHEITSKONZEPT MIT INTEGRIERTER NACHWEISFÜHRUNG ALS GRUNDLAGE DER PLANUNGSKONZEPTION	71
5.1	Allgemeine Überlegungen zum Sicherheitskonzept und zu den Nachweisführungen für die Schachtverschlusssysteme des ERA Morsleben	71
5.2	Das Sicherheitskonzept mit integrierter Nachweisführung	72
5.2.1	Schutzziele und Anforderungen an das Verschlussbauwerk	74
5.2.2	Gefährdungs- & Einwirkungsanalyse	75
5.2.2.1	Nutzungsplan der Schachtverschlüsse	75

BfS	Konzeptplanung der Schachtverschlüsse für die Schächte Bartensleben und Marie des ERA Morsleben	
9M/ 223 450 11/GHS/ TF/ 0001/00	Stand: 10.03.2004	Seite 5 von 215

5.2.2.2	Vorgehensweise zur Erfassung möglicher Gefährdungen und Einwirkungen	76
5.2.3	Entwicklung von Gefährdungs- bzw. Einwirkungskombinationen	78
5.2.3.1	Mögliche Gefährdungen/ Einwirkungen	78
5.2.3.2	Erarbeitung von Gefährdungsbildern	82
5.2.4	Grundkonzept für die Planung der Schachtverschlussbauwerke des ERA Morsleben und Materialauswahl	84
5.2.4.1	Grundkonzept A der Schachtverschlussbauwerke	87
5.2.4.2	Grundkonzept B der Schachtverschlussbauwerke	88
5.2.4.3	Auswahl geeigneter Materialien	90
6	PLANUNGSKONZEPTION FÜR DEN SCHACHTVERSCHLUSS DER SCHÄCHTE DES ERA MORSLEBEN AUF BASIS DER NACHWEISFÜHRUNGEN ZUR TRAGFÄHIGKEIT, GEBRAUCHSTAUGLICHKEIT SOWIE LANGZEITSTABILITÄT DER SCHACHTVERSCHLUSSMATERIALIEN	94
6.1	Nachweisführungen zur Langzeitstabilität der eingesetzten Schachtverschlussmaterialien	95
6.1.1	Kriterien zur Beurteilung der Langzeitstabilität der Schachtverschlussmaterialien	95
6.1.2	Nachweis der Langzeitstabilität von Bentoniten und Tonen	96
6.1.3	Nachweis der Langzeitstabilität von Asphalten und Bitumen	98
6.1.4	Nachweis der Langzeitstabilität von Schottern, Kiesen und Sanden	101
6.2	Bauwerksentwürfe/Planungskonzeption für die Schachtverschlüsse der Schächte Bartensleben und Marie des ERA Morsleben	103
6.3	Gebirgsmechanische Untersuchungen zum Tragfähigkeits- und Gebrauchstauglichkeitsnachweis	108
6.3.1	Bemessungsziele und Kriterien für die geomechanischen Nachweisführungen	108
6.3.2	Vorgehensweise bei der geomechanischen Modellierung	111
6.3.3	Modellgeometrien und Randbedingungen	113
6.3.4	Numerische Modellierung mit dem Programmsystem FLAC	117
6.3.5	Belastungsszenarien und Berechnungsfälle	120
6.3.6	Darstellung und Auswertung der Berechnungsergebnisse	126
6.3.7	Einschätzung des Sicherheitsniveaus	134
6.4	Geohydraulische Untersuchungen zum Gebrauchstauglichkeitsnachweis	134
6.4.1	Bemessungsziele und Kriterien für die geohydraulische Nachweisführung	134

BfS	Konzeptplanung der Schachtverschlüsse für die Schächte Bartensleben und Marie des ERA Morsleben	
9M/ 223 450 11/GHS/ TF/ 0001/00	Stand: 10.03.2004	Seite 6 von 215

6.4.2	Vorgehensweise	135
6.4.3	Deckgebirgsdichtung	136
6.4.3.1	Dichthorizonte im Deckgebirge und hydraulische Kennwerte	136
6.4.3.2	Dichtmaterialauswahl und hydraulische Kennwerte	140
6.4.3.3	Geohydraulische Modellrechnungen	145
6.4.3.4	Einschätzung des Sicherheitsniveaus	152
6.4.4	Durch- bzw. Umströmung der Asphalt-dichtelemente	154
6.4.4.1	Angreifende Wässer und saline Lösungen	154
6.4.4.2	Gebirgstemperaturen	154
6.4.4.3	Materialauswahl Asphalt/Bitumen	156
6.4.4.4	Bemessung der Asphalt-dichtungen	160
6.4.4.5	Einschätzung des Sicherheitsniveaus	172
6.4.5	Durchfluss durch das Gesamtsystem	174
6.4.6	Aussagen zu Asphaltverlusten	175
6.4.6.1	Zusammenstellung von Daten und Richtwerten aus der Praxis	175
6.4.6.2	Eindringen von Asphalt in permeable Gebirgsbereiche	178
6.4.6.3	Sedimentationsverhalten der Asphaltfüller	179
6.4.6.4	Einschätzung des Sicherheitsniveaus	179
6.5	Zusammenfassende ingenieurtechnische Einschätzung	180
7	BAUTECHNISCHE HINWEISE UND ERLÄUTERUNGEN ZUR QUALITÄTSSICHERUNG	183
7.1	Vorbereitende Maßnahmen	183
7.2	Erforderliche Maßnahmen zur Qualitätssicherung	184
7.3	Einbau der unteren Widerlagersäule	185
7.4	Einbau der kombinierten Widerlager-Dichtelemente DE 2 und 3	186
7.5	Einbau des asphalt-dichten Kerns	187
7.6	Einbau des Dichtelementes DE 1	188
7.7	Einbau der oberen Widerlagersäule	189
7.8	Abdeckplatte	189
	QUELLENVERZEICHNIS	190

BfS	Konzeptplanung der Schachtverschlüsse für die Schächte Bartensleben und Marie des ERA Morsleben	
9M/ 223 450 11/GHS/ TF/ 0001/00	Stand: 10.03.2004	Seite 7 von 215

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1	: Prinzip eines Schachtverschlusses durch Teilverfüllung mit gebirgsverbundenen Pfropfen (1. Etappe)	24
Abbildung 2	: Konstruktionsvarianten der Voll- und Teilverfüllung	32
Abbildung 3	: Gesamtvolumenstrom als Summe verschiedener Teilströme	33
Abbildung 4	: Konstruktionsvarianten für Widerlager nach [12]	34
Abbildung 5	: Homogene Füllsäule	41
Abbildung 6	: Geschichtete Füllsäule	41
Abbildung 7	: Dichtelemente ohne Redundanz	43
Abbildung 8	: Dichtelement mit Redundanz	43
Abbildung 9	: Diversitäre Dichtsysteme	45
Abbildung 10	: Übersicht über die lokalen geologischen Einheiten nach [53] und die Lage der Grubengebäude Marie und Bartensleben	52
Abbildung 11	: Schematische Darstellung des vorgeschlagenen Sicherheitskonzeptes mit integrierter Nachweisführung	73
Abbildung 12	: Nutzungsplan der Schachtverschlüsse des ERA Morsleben	76
Abbildung 13	: Prinzipdarstellung zur Erfassung aller möglichen Gefährdungen/Einwirkungen	78
Abbildung 14	: Matrix der Gefährdungsbilder	83
Abbildung 15	: Grundkonzept A für den Aufbau der Schachtverschlusssysteme des ERA Morsleben	87
Abbildung 16	: Grundkonzept B für den Aufbau der Schachtverschlusssysteme des ERA Morsleben	89
Abbildung 17	: Grundkonzept A - Zuordnung möglicher Schachtverschlussmaterialien zu den Schachtverschlusselementen	92
Abbildung 18	: Grundkonzept B - Zuordnung möglicher Schachtverschlussmaterialien zu den Schachtverschlusselementen	93
Abbildung 19	: Geometrie und Randbedingungen des Gesamtmodells	115

BfS	Konzeptplanung der Schachtverschlüsse für die Schächte Bartensleben und Marie des ERA Morsleben	
9M/ 223 450 11/GHS/ TF/ 0001/00	Stand: 10.03.2004	Seite 8 von 215

Abbildung 20 : Modellgeometrie des Teilmodells für den Bereich des kombinierten Widerlager-Dichtelementes DE 2	116
Abbildung 21 : Geometrie und Randbedingungen für ein trapezförmiges Füllort	116
Abbildung 22 : Numerische Modellierung des Gesamtmodells Schacht Marie in FLAC	117
Abbildung 23 : Numerische Modellierung des Teilmodells des kombinierten Widerlager-Dichtelementes DE 2 in FLAC (Vernetzung)	118
Abbildung 24 : Numerische Modellierung eines trapezförmigen Füllortes in FLAC	119
Abbildung 25 : Prinzipskizze der Lastangriffsflächen des Fluiddruckes von oben und unten	121
Abbildung 26 : Schacht Marie – Lage der potentiellen Dichthorizonte und deren hydraulische Kennwerte – schematische Darstellung	137
Abbildung 27 : Schacht Bartensleben – Lage der potentiellen Dichthorizonte und deren hydraulische Kennwerte – schematische Darstellung	139
Abbildung 28 : Zusammenhang zwischen Quelldruck und Bentonittrockendichte gegenüber Wasser nach [113]	142
Abbildung 29 : Schematische Darstellung des Modellaufbaus für den Schacht Marie	147
Abbildung 30 : Vertikalschnitt, Darcy-Geschwindigkeit in z-Richtung (m/d) und Stromliniennetz, Schacht Marie	148
Abbildung 31 : Vertikalschnitt, Darcy-Geschwindigkeit in x- bzw. y-Richtung (m/d) und Stromliniennetz, Schacht Marie	149
Abbildung 32 : Schematische Darstellung des Modellaufbaus für den Schacht Bartensleben	150
Abbildung 33 : Vertikalschnitt, Darcy-Geschwindigkeit in z-Richtung (m/d) und Stromliniennetz, Schacht Bartensleben	151
Abbildung 34 : Vertikalschnitt, Darcy-Geschwindigkeit in x, bzw. y-Richtung (m/d) und Stromliniennetz, Schacht Bartensleben	152
Abbildung 35 : Geothermische Karte Norddeutschlands; Temperaturverteilung in 500 m Teufe [120]	155
Abbildung 36 : Dynamische Viskositäten von Bitumen B 200 und B 80 in Abhängigkeit von der Temperatur nach [12]	158

BfS	Konzeptplanung der Schachtverschlüsse für die Schächte Bartensleben und Marie des ERA Morsleben	
9M/ 223 450 11/GHS/ TF/ 0001/00	Stand: 10.03.2004	Seite 9 von 215

Abbildung 37 : Prinzipskizze zur Permeabilitätserhöhung durch Änderung des Spannungszustandes bei Ansatz eines ebenen, isotropen Grundspannungszustandes im Schacht	162
Abbildung 38 : Volumenstrom durch die aufgelockerten Gebirgsbereiche um das kombinierte Widerlager-Dichtelement DE 3 und der dazugehörige Sicherheitskoeffizient aufgetragen über die Länge des Dichtelementes	169
Abbildung 39 : Volumenstrom durch die aufgelockerten Gebirgsbereiche um das kombinierte Widerlager-Dichtelement DE 2 und der dazugehörige Sicherheitskoeffizient aufgetragen über die Länge des Dichtelementes	171
Abbildung 40 : Nachfüllmengen an Asphalt in Gleitschächten nach [128] (Nachfüllmengen [m ³] sind auf 1.000 m ² Mantelfläche umgerechnet)	176

TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1	: Einsatzbereiche und Eigenschaften von Dichtmaterialien	37
Tabelle 2	: Entwicklung der Schachtanlagen „Bartensleben“ und „Marie“	51
Tabelle 3	: Geologisches Profil Schacht Bartensleben nach [5]	53
Tabelle 4	: Erfasste Zutritte im Schacht Bartensleben nach [49]	56
Tabelle 5	: Kennwerte zur Hydrogeologie Schacht Bartensleben aus [5], [49]	57
Tabelle 6	: Geomechanische Kennwerte-Grundspannungszustand aus [5]	58
Tabelle 7	: Geomechanische Kennwerte-Elastizitätsmoduli aus [52]	59
Tabelle 8	: Geomechanische Kennwerte- Scherparameter und Festigkeitsangaben aus [52]	60
Tabelle 9	: Homogenbereiche Schacht Marie aus [5]	62
Tabelle 10	: Erfasste Zutritte im Schacht Marie nach [50]	63
Tabelle 11	: Kennwerte zur Hydrogeologie Schacht Marie aus [5]	64
Tabelle 12	: Geomechanische Kennwerte-Grundspannungszustand aus [52]	65
Tabelle 13	: Geomechanische Kennwerte-Elastizitätsmoduli aus [52]	66
Tabelle 14	: Geomechanische Kennwerte-Scherparameter und Festigkeitsangaben aus [52]	66
Tabelle 15	: Katalog abgeleiteter Konstruktionsprinzipien	86
Tabelle 16	: Degradationsverluste von Bitumen/Asphalten im Nachweiszeitraum unter Berücksichtigung aerober und anaerober Verhältnisse bei Angriffsflächen von 100 m ²	100
Tabelle 17	: Bauwerksentwürfe Schächte Marie und Bartensleben	104
Tabelle 18	: Berechnungsfälle Sensitivitätsanalyse	126
Tabelle 19	: Schacht Marie - Hydraulische Leitfähigkeit des Deckgebirges unterhalb des letzten Zuflusses [5], [50]	138
Tabelle 20	: Schacht Bartensleben - Hydraulische Leitfähigkeit des Deckgebirges unterhalb des letzten Zuflusses [5], [49]	139

BfS	Konzeptplanung der Schachtverschlüsse für die Schächte Bartensleben und Marie des ERA Morsleben	
9M/ 223 450 11/GHS/ TF/ 0001/00	Stand: 10.03.2004	Seite 11 von 215

Tabelle 21 : Gebirgsdrücke aus [5] und berechnete minimale Tangentialspannung als Fracdruck-Kriterium	144
Tabelle 22 : Kennwerte des Dichtmaterials (Calcigel-Granulat 0 – 10 mm) für das Dichtelement DE 1	145
Tabelle 23 : Dynamische Viskositäten für Bitumen B 80 und B 200 [12], [95]	157
Tabelle 24 : Zusammenfassung der Eingangsgrößen	164
Tabelle 25 : Berechnungsergebnisse zur effektiven hydraulischen Leitfähigkeit – bezogen auf „Q-Lauge“ (IP 21-Lösung)	166
Tabelle 26 : Berechnungsergebnisse zur effektiven hydraulischen Leitfähigkeit – bezogen auf Steinsalzlösung	170
Tabelle 27 : Projektierte Dichtelementlängen und berechnete Volumenströme	171
Tabelle 28 : Benötigte Bitumen-/Asphaltvolumina für die kombinierten Widerlager-Dichtelemente	172

BfS	Konzeptplanung der Schachtverschlüsse für die Schächte Bartensleben und Marie des ERA Morsleben	
9M/ 223 450 11/GHS/ TF/ 0001/00	Stand: 10.03.2004	Seite 12 von 215

ANLAGENVERZEICHNIS

		<i>mit Seiten</i>
Anlage 1	Das Verschlusskonzept der WIPP-Site	1
Anlage 2	Darstellung der geplanten übertägigen Situation der Schachtanlage Marie	1
Anlage 3	Darstellung der geplanten übertägigen Situation der Schachtanlage Bartensleben	1
Anlage 4	Schachtbefahrungsprotokoll vom 30.05.2001	4
Anlage 5	Geologisches Profil des Schachtes Bartensleben	1
Anlage 6	Geologisches Profil des Schachtes Marie	1
Anlage 7	Bauwerksentwurf Schacht Marie	1
Anlage 8	Bauwerksentwurf Schacht Bartensleben	1

Seitenzahl der Anlagen: 11

Seitenzahl des Berichtes: 204

***Gesamtseitenzahl:* 215**

ABKÜRZUNGEN UND SYMBOLE

a	Jahr (Zeiteinheit)
a	Parameter aus linear-logarithmischen Ansatz
ALZ	Auflockerungszone
b	Parameter aus linear-logarithmischen Ansatz
BBergG	Bundesberggesetz
BfS	Bundesamt für Strahlenschutz
cm ³	Kubikzentimeter
\tilde{c}_v	Volumenanteil des Füllers
d	Tag
dA(r)	Flächeninkrement der Auflockerungszone
E	E-Modul
E _{Hutgestein}	E – Modul des Gebirges (Hutgestein)
E _{Salinar}	E – Modul des Gebirges (Salinar)
E _{Schotter}	E – Modul Schotter/Asphalt
g	Gramm (Masseinheit)
g	Erdbeschleunigung
GE 1	Bezeichnung für Last- und Berechnungsfall (siehe Anlage 3)
GLF 1	Analog
GLF 2	Analog
GLF 6	Analog
GOK	Geländeoberkante
H	Höhe der Wassersäule, Druckhöhe
H _F	Höhe der Flüssigkeitssäule, Druckhöhe
k	Permeabilität
k _{Dil}	Verhältniszahl der Oktaederschubspannung an der Dilatanzgrenze zur vorhandenen Oktaederschubspannung
k _f	hydraulische Leitfähigkeit
k _{fgeff}	effektive hydraulische Leitfähigkeit in der Auflockerungszone
k _g	hydraulische Leitfähigkeit des jeweiligen Gebirgsbereiches
kg	Kilogramm

$k_g(r_d)$	Permeabilität der ALZ am Ausbruchsrund
$k_g(r_g)$	Permeabilität der ALZ im ungestörten Steinsalz
$k_{\tau K}$	Bewertungskoeffizient für die maximal zulässigen Schubspannungen in der Kontaktfuge (Haftreibung)
L	Länge der Dichtung
L_{erf}	erforderliche Länge des Dichtelementes
LF 1 ... 6	Bezeichnung der Last- und Berechnungsfälle 1, ..., 6 (siehe Anlage 3)
m	Meter
m^2	Quadratmeter
m^3	Kubikmeter
m_{Bitumen}	Masse Bitumen
$m_{\text{Füller}}$	Masse des Füllstoffes
MPa	Megapascal
p	Flüssigkeitsdruck
Pa	Pascal
p_{Asphalt}	aus dem Eigengewicht des Asphalts resultierende Druckbelastung
p_{Fo}	Fluiddruck von oben
p_{Fu}	Fluiddruck von unten
p_Q	Quelldruck
p_{Qk}	maximal möglicher Quelldruck
r_d	Radius der Querschnittsabdichtung
r_g	Radius der Auflockerungszone
s	Sekunde
SAAS	Staatliche Amt für Atomsicherheit und Strahlenschutz Berlin
u.U.	Unter Umständen
V_{Bitumen}	Bitumenvolumen
$V_{\text{Füller}}$	Füllstoffvolumen
\dot{V}_{Grenz}	Grenzvolumenstrom
°	Grad
°C	Grad Celsius
γ	Teilsicherheitsfaktor
Δp	Druckbelastung

η_{Asphalt}	dynamische Viskosität des Asphalts
η_{Bitumen}	dynamische Viskosität des Bitumens
η_{F}	dynamische Viskosität der Flüssigkeit
η_{L}	dynamische Viskosität der Lösung („Lauge“)
μm	Mikrometer
ρ_{Asphalt}	Dichte Asphalt
ρ_{Bitumen}	Dichte Bitumen
ρ_{F}	Flüssigkeitsdichte
$\rho_{\text{Füller}}$	Dichte Füllstoff
ρ_{G}	Deckgebirgsdichte
ρ_{L}	Dichte der „Lauge“/ Lösung
ρ_{tr}	Bentonittrockendichte
σ_{N2}	kleinste Hauptnormalspannung (analog σ_3) in der in den numerischen Simulationen mit FLAC betrachteten Ebene (Vertikalschnitt)
σ_{t}	Tangentialspannung
σ_{Z}	einaxiale Zugfestigkeit
σ_3	kleinste Hauptnormalspannung (siehe Erläuterungen zu Formel (6))
Φ	Winkel der inneren Reibung
Φ_{Kontakt}	Kontaktreibung
Φ_{Schotter}	Festigkeitsparameter Schotter/Asphalt

BfS	Konzeptplanung der Schachtverschlüsse für die Schächte Bartensleben und Marie des ERA Morsleben	
9M/ 223 450 11/GHS/ TF/ 0001/00	Stand: 10.03.2004	Seite 16 von 215

1 Veranlassung und Aufgabenstellung

Der schädigende Einfluss von radioaktiven bzw. chemisch-toxischen Abfällen auf die Biosphäre des Menschen soll durch die Endlagerung dieser Toxika im Wirtsgestein Salz langfristig wirksam verhindert werden. Ende der 60er Jahre des letzten Jahrhunderts wurden in der ehemaligen Deutschen Demokratischen Republik durch Bergwerke erschlossene Salzlagerstätten auf ihre Eignung als Endlager für niedrig- und mittelradioaktive Abfälle untersucht. Nach vorlaufenden Standortuntersuchungen und –beurteilungen wurde das Salzbergwerk Bartensleben, auf Grundlage der 70-jährigen Bergbautätigkeit im Allertal, 1970 von dem Kernkraftwerksbetreiber, *Kombinat Kernkraftwerke „Bruno Leuschner“* Greifswald, übernommen. Die Anlage wurde nach einem gestuften Genehmigungsverfahren errichtet, bei dem das *Kombinat Kernkraftwerke „Bruno Leuschner“* Antragsteller und als Genehmigungsbehörden das Staatliche Amt für Atomsicherheit und Strahlenschutz Berlin (SAAS), die Bergbehörde Staßfurt, das Staatliche Amt für Technische Überwachung, die Staatliche Bauaufsicht, Brandschutzkontrollorgane und der Rat des Bezirkes tätig waren. Der Zeitrahmen für die Errichtung und den Betrieb des Endlagers ergibt sich aus folgend genannten Zustimmungen [1]:

- 1971 Vorläufige Zustimmung zum Standort,
- 1972 Zustimmung zum Standort,
- 1974 Zustimmung zur Errichtung der ersten Anlage (1. Baustufe),
- 1978 Freigabe zur Aufnahme des aktiven großtechnischen Versuchsbetriebes,
- 1981 1. Zustimmung zum Dauerbetrieb (auf 5 Jahre begrenzt),
- 1986 2. Zustimmung zum Dauerbetrieb (zeitlich nicht begrenzt).

Seit dem 01.07.1990 gilt für das Beitrittsgebiet das Atomgesetz (AtG) der Bundesrepublik Deutschland. Danach hat der Staat Anlagen zur Endlagerung radioaktiver Abfälle zu errichten und zu betreiben. Die Dauergenehmigung des ERA Morsleben vom 24.04.1986 ging mit der neuen Gesetzeslage aufgrund von Fortgeltungs- und Übergangsanordnung durch das Umweltschutzgesetz (URG) auf das SAAS über. Im URG ist auch festgelegt, dass bestehende atom- und strahlenschutzrechtliche Genehmigungen, Erlaubnisse und Zulassungen für Kernkraft-

BfS	Konzeptplanung der Schachtverschlüsse für die Schächte Bartensleben und Marie des ERA Morsleben	
9M/ 223 450 11/GHS/ TF/ 0001/00	Stand: 10.03.2004	Seite 17 von 215

werke längstens fünf Jahre und Tätigkeiten (wozu auch das ERA Morsleben gehört) längstens zehn Jahre (d.h. bis zum 30.06.2000) Fortgelten.

Mit dem Beitritt der DDR zur Bundesrepublik Deutschland am 03.10.1990 ist das Bundesamt für Strahlenschutz (BfS) Rechtsnachfolgerin des SAAS geworden, das die Betriebsführung des ERA Morsleben am 07.11.1990 auf die DBE mbH in Peine übertragen hat [2].

Auf Weisung des BfS auf Grund eines Beschlusses des Oberverwaltungsgerichtes Magdeburg wurde am 25. September 1998 die Einlagerung von radioaktiven Abfällen ausgesetzt. Das Bergwerk wird seit diesem Zeitpunkt offengehalten und überwacht.

Am 21. Mai 1999 gab das BfS bekannt, dass die Einlagerung radioaktiver Abfälle im ERA Morsleben nicht wieder aufgenommen wird. Das gemeinsame Ziel des BfS und des Umweltministeriums des Landes Sachsen-Anhalt ist seitdem die Durchführung eines Planfeststellungsverfahrens zur Stilllegung des ERA Morsleben. In diesem Zusammenhang wurde von verschiedenen Beteiligten (z.B. der GRS) ein Stilllegungskonzept [3] mit unterschiedlichen Stilllegungsmaßnahmen für das ERA Morsleben erarbeitet. Bei einer für das Erreichen der Verwahrungsziele des ERA Morsleben erforderlichen Stilllegungsmaßnahme handelt es sich um die Errichtung von Schachtverschlussbauwerken für die Schächte Marie und Bartensleben.

Die Notwendigkeit von Schachtverschlüssen und die allgemeinen Anforderungen an ihre Konstruktionsprinzipien leiten sich aus sachlichen Zwängen ab, die durch entsprechende Rechtsnormen in den verschiedenen bergbautreibenden Ländern unterschiedlich geregelt sind. In Deutschland gilt nach §55, Absatz 2, Nr. 1 des Bundesberggesetzes [4], dass „... der Schutz Dritter vor den durch den Betrieb verursachten Gefahren für Leben und Gesundheit auch nach der Einstellung des Betriebes ... sichergestellt sein müssen.“.

Der damit verbundenen Vorsorgepflicht gegenüber Mensch und Natur ist i.A. vor Eintritt in die Nachbetriebsphase Folge zu leisten, was in Deutschland gem. BBergG § 55 im Rahmen der Zulassung des Abschlussbetriebsplanes rechtskräftig festgeschrieben wird.

An **Schachtverschlüsse im wasserlöslichen Gebirge** werden besondere Anforderungen gestellt. Diese resultieren aus den Eigenschaften der Salzgesteine, insbesondere

- ihrer Löslichkeit gegenüber wässrigen Lösungen

BfS	Konzeptplanung der Schachtverschlüsse für die Schächte Bartensleben und Marie des ERA Morsleben	
9M/ 223 450 11/GHS/ TF/ 0001/00	Stand: 10.03.2004	Seite 18 von 215

und

- ihrem rheologischen Verhalten, d.h. ihrem zeitabhängigen Spannungs-Verformungsverhalten

sowie den daraus resultierenden lösekinetischen und/oder mechanischen Interaktionen mit dem postsalinaren Deckgebirge.

Daraus folgt als wesentlichste Anforderung für Schachtverschlüsse im Salinar das Fernhalten wässriger Lösungen aus dem Deckgebirge vom lösefähigen salinaren Gebirge. Eine Verhinderung von Zuflüssen wird i.a. durch den Einbau von Dichtungen in geeignete Dichthorizonte unterhalb des letzten Zuflussbereiches erreicht. Die Aufgabe der Lagestabilisierung von Dichtelementen zur Gewährleistung ihrer Funktionstüchtigkeit übernehmen Widerlager und/oder Füllsäulen. Über die abdichtende Funktion hinaus gewährleisten Schachtverschlüsse die Sicherung der Schächte gegen Verbruch. Schachtverschlüsse im Salinar haben demnach dichtende und statische Aufgaben zu erfüllen.

Auf Grund der Endlagerung von radioaktiven Abfällen leiten sich für den Verschluss der Schächte von Endlagern zusätzliche Anforderungen ab. Sie zielen auf eine Verhinderung schädlicher Auswirkungen des im salinaren Grubenraum gelagerten radioaktiven Abfalls auf die Biosphäre. Für einen Verschluss eines Endlagers bedeutet diese Forderung, dass die Einkapselung von radioaktiven Abfällen dauerhaft und ohne Nachsorge gewährleistet werden muss. Dementsprechend verfolgt das Verschlusskonzept das Schutzziel, Mensch und Umwelt vor einer möglichen Schädigung durch eingelagerte Abfälle langfristig zu schützen. Dies wird in den Sicherheitskriterien für die Endlagerung radioaktiver Abfälle in einem Bergwerk wie folgt konkretisiert [71]:

“Nach Beendigung der Betriebsphase muss das gesamte Endlager sicher gegen die Biosphäre abgeschlossen werden. Auch nach der Stilllegung dürfen Radionuklide, die als Folge von nicht auszuschließenden Transportvorgängen aus einem verschlossenen Endlager in die Biosphäre gelangen können, nicht zu Individualdosen führen, welche die Werte des §45¹ der Strahlenschutzverordnung (StrlSchV) überschreiten“.

¹ §47 in der Fassung von 2001

BfS	Konzeptplanung der Schachtverschlüsse für die Schächte Bartensleben und Marie des ERA Morsleben	
9M/ 223 450 11/GHS/ TF/ 0001/00	Stand: 10.03.2004	Seite 19 von 215

Die wesentlichen Merkmale eines Endlagerschachtverschlusses stellen die erforderliche Auslegung der Konstruktion gegenüber Medienaustritten aus dem Grubengebäude und die Funktionstüchtigkeit des Gesamtsystems über sehr lange Zeiträume dar. Im Vergleich zu herkömmlichen Schachtverschlüssen bestehen auf Grund der von radioaktiven Stoffen ausgehenden Gefahren erhöhte Anforderungen bezüglich der Dichtheit des Verschlusses.

2 Methodik

Die Erarbeitung der Planungskonzeption für die Schachtverschlüsse des ERA Morsleben (Konzeptplanung) lehnte sich inhaltlich an die Honorarordnung für Architekten und Ingenieure der HOAI [6] an. Nach HOAI § 55 Leistungsbild Objektplanung für Ingenieurbauwerke und Verkehrsanlagen kann eine Konzeptplanung der Leistungsphase 2 – der Vorplanung – gleichgesetzt werden.

Da es sich bei den zu planenden Schachtverschlüssen um ingenieurtechnische Bauwerke handelte, war die Voraussetzung für die Anwendung des genannten Paragraphen gegeben. Die Leistungsphase 2 des § 55 der HOAI beinhaltet folgende Grundleistungen:

- **Analyse der Grundlagen,**
- **Abstimmen der Zielvorstellungen auf die Randbedingungen,** die insbesondere durch Raumordnung, Landesplanung, Bauleitplanung, Rahmenplanung sowie örtliche und überörtliche Fachplanungen vorgegeben sind,
- **Untersuchen von Lösungsmöglichkeiten mit ihren Einflüssen auf bauliche und konstruktive Gestaltung, Zweckmäßigkeit, Wirtschaftlichkeit** unter Beachtung der Umweltverträglichkeit,
- Beschaffen und Auswerten amtlicher Karten,
- **Erarbeiten eines Planungskonzepts** einschließlich Untersuchung der alternativen Lösungsmöglichkeiten nach gleichen Anforderungen **mit zeichnerischer Darstellung und Bewertung unter Einarbeitung der Beiträge anderer an der Planung fachlich Beteiligter,**
- **Klären und Erläutern der wesentlichen fachspezifischen Zusammenhänge, Vorgänge und Bedingungen,**

BfS	Konzeptplanung der Schachtverschlüsse für die Schächte Bartensleben und Marie des ERA Morsleben	
9M/ 223 450 11/GHS/ TF/ 0001/00	Stand: 10.03.2004	Seite 20 von 215

- Vorverhandlungen mit Behörden und anderen an der Planung fachlich Beteiligten über die Genehmigungsfähigkeit, gegebenenfalls über die Bezuschussung und Kostenbeteiligung,
- Mitwirken beim Erläutern des Planungskonzepts gegenüber Bürgern und politischen Gremien,
- Überarbeiten des Planungskonzepts nach Bedenken und Anregungen,
- Bereitstellen von Unterlagen als Auszüge aus dem Vorentwurf zur Verwendung für ein Raumordnungsverfahren,
- Kostenschätzung,
- **Zusammenstellen aller Vorplanungsergebnisse.**

Die hervorgehobenen Textpassagen bildeten entsprechend ihrer Reihenfolge in der Aufzählung die Bearbeitungsschwerpunkte des vorliegenden Berichts.

3 Analyse der Grundlagen

In diesem Kapitel erfolgt entsprechend Kapitel 2 zum einen die vergleichende Analyse bisher geplanter und gebauter Schachtverschlusssysteme im Salinar. Die Schachtverschlüsse wurden unter den Gesichtspunkten der Entwicklung bzw. dem gegenwärtigen Stand der Technik von Schachtverschlusskonstruktionen und der dazu eingesetzten Materialien betrachtet. Dabei wurde besondere Aufmerksamkeit auf das Langzeitverhalten der Schachtverschlüsse gelegt.

Zum anderen wurden (i) die geltenden Rechtsvorschriften, welche für das Verfüllen von Schächten existieren und (ii) die Normen und Richtlinien für Sicherheitsbetrachtungen von Ingenieurbauwerken erfasst. Diese bildeten die Grundlage für die zu planenden Schachtverschlussbauwerke.

BfS	Konzeptplanung der Schachtverschlüsse für die Schächte Bartensleben und Marie des ERA Morsleben	
9M/ 223 450 11/GHS/ TF/ 0001/00	Stand: 10.03.2004	Seite 21 von 215

3.1 Stand der Technik von langzeitsicheren Schachtverschlüssen für Grubenbaue im wasserlöslichen Gebirge

Im Sinne der zuvor formulierten Aufgabenstellung wurden nachfolgend die im internationalen sowie im nationalen Raum vorliegenden Erfahrungen mit Verschlussbauwerken im salinaren Gebirge analysiert. Zielführend erschien es dabei, die umfangreichen Erfahrungen der Kali- und Steinsalzindustrie bei der Verwahrung von Schächten heranzuziehen. Im Hinblick auf die spezifischen Anforderungen an Schachtverschlüsse eines Endlagers für radioaktive Abfälle bildeten diese Erfahrungstatsachen aus mehr als 150 jähriger Geschichte des Kali- & Salzbergbaus die wesentlichste Grundlage, waren aber hinsichtlich der Anforderungen (hohe Dichtheit, auch aus dem Grubengebäude einwirkende Flüssigkeitsbelastung) und der zeitlich sehr langen Nachbetriebsphase von Endlagern nur eingeschränkt übertragbar. Hinsichtlich Dichtheit und Gebrauchsdauer waren und sind Verschlussbauwerke von Untertagedeponien toxischer Abfälle (UTD) eher vergleichbar. Weiter eingeschränkt galt dies auch für die Verschlüsse von Bergwerken, in denen bergbaufremde Abfälle für Versatzaufgaben verwertet werden. Im Folgenden wurden daher auch die - verglichen mit der Geschichte des Kalibergbaus - noch relativ jungen Erfahrungen mit geplanten Verschlussbauwerken von Untertagedeponien einbezogen, soweit es sich um Wirtsgesteine salinärer Genese handelt.

Im Sinne eines internationalen Vergleichs mussten bei einer Betrachtung von Schachtverschlüssen im wasserlöslichen Gebirge zunächst die führenden kali- und steinsalzproduzierenden Nationen aufgeführt werden. Führende Kalidüngemittelhersteller aus bergbaulicher Produktion sind, neben Deutschland, Kanada und den Staaten der GUS, die USA und Frankreich. Bergmännische Steinsalzgewinnung erfolgt darüber hinaus in anderen Ländern Europas (z.B. Polen, Rumänien, Slowenien, Österreich, Spanien), Asiens, Afrikas und Südamerikas. Veröffentlichungen zu geplanten und/oder realisierten Schachtverschlüssen, die zusätzlich den hier zur Rede stehenden Terminus der *Langzeitsicherheit* erfüllten, lagen nicht oder nur im Zusammenhang mit der Nachnutzung von Grubenhohlräumen für Deponiezwecke vor [7], [8], [9].

BfS	Konzeptplanung der Schachtverschlüsse für die Schächte Bartensleben und Marie des ERA Morsleben	
9M/ 223 450 11/GHS/ TF/ 0001/00	Stand: 10.03.2004	Seite 22 von 215

Aus langfristigen Kooperationsbeziehungen zwischen der deutschen Kaliindustrie und den anderen Produzenten waren die grundlegenden Konzepte zur Verwahrung der Schächte in anderen Ländern den Verfassern bekannt, was letztlich folgende Einschätzung gestattete:

Deutschland als eine der führenden Nationen des Kali- und Steinsalzbergbaus nimmt zwangsläufig auch auf dem Sektor der Verwahrung von Schächten eine gewichtige Position ein. Dies ist insbesondere durch den frühen Beginn des Kalibergbaus in Deutschland (ca. 150 Jahre Kalisalzbergbau), die damit verbundene *Vorreiterrolle* sowie die aus ökonomischen Erwägungen (*Reichskaligesetz*) bereits früh eingeleitete Stilllegung einzelner deutscher Kalibergwerke bedingt. Dieser Umstand spiegelt sich zwangsläufig auch bei der Diskussion des internationalen Kenntnisstandes wider.

Der nachfolgenden Diskussion zum heutigen Stand der Technik bei der Herstellung von Schachtverschlusssystemen lagen Erfahrungen von über 200 konzipierten und geplanten und über 100 durchgeführten Schachtverschlüssen im wasserlöslichen Gebirge, maßgeblich aus Deutschland, zugrunde. Die den Verfassern bekannten Konzeptionen anderer Kali- und Steinsalzproduzenten bzw. zu Verschlussbauwerken von Untertagedeponien, stellten mehrheitlich Adaptionen bereits früher in Deutschland geplanter Bauwerke dar, verdienten hier daher keine explizite Erläuterung, flossen aber dennoch in die vergleichende Betrachtung ebenso ein.

3.1.1 Historische Entwicklung in Deutschland

Zunächst sollte die historische Entwicklung von Schachtverschlusssystemen aufgezeigt werden, wie sie sich in Deutschland in den vergangenen 80 Jahren abgezeichnet hatte. Dabei wurden der Wandel in der Zielstellung von Schachtverschlüssen im Salzbergbau und die neuen Aufgaben in Folge der Nachnutzung der Hohlräume als Untertagedeponie bzw. Endlager sowie die damit verbundenen Veränderungen der Konstruktionsprinzipien erläutert.

Eine Gliederung der Entwicklung nach den unterschiedlichen Zielrichtungen der Schachtverschlüsse lässt drei Etappen erkennen:

BfS	Konzeptplanung der Schachtverschlüsse für die Schächte Bartensleben und Marie des ERA Morsleben	
9M/ 223 450 11/GHS/ TF/ 0001/00	Stand: 10.03.2004	Seite 23 von 215

3.1.1.1 *Erste Etappe (1924 bis 1960)*

In den 20er Jahren des letzten Jahrhunderts erfolgte die Stilllegung von Schachtanlagen als Folge der Quotenregelung (Reichskaligesetz), der Zusammenlegung von Grubenfeldern, der Erschöpfung der Lagerstättenvorräte bzw. aus anderen wirtschaftlichen Gründen. Für die Sicherung der Schächte stand zunächst der Gedanke einer einfachen Stabilisierung der Schachtsäule und einer Abdichtung gegen Zuflüsse aus dem Deckgebirge im Vordergrund, wobei zwei Möglichkeiten zur Anwendung kamen:

- die Teilverfüllung
- und
- die Vollverfüllung.

Bei der **Teilverfüllung** wurden Pfpfen am Übergang des wasserdichten Ausbaus zum trockenen Gebirge, am Übergang vom Buntsandstein zum Salinar bzw. am Übergang vom Deckgebirge zum Salinar eingebaut. Bis 1960 dienten diese Bauwerke zum Lastabtrag der angreifenden Kräfte in das Gebirge und zur Abdichtung der Schachtröhre gegen Süßwasserzuflüsse zum wasserlöslichen Gebirge. Um eine erhöhte Dichtwirkung der Schachtverschlüsse zu erreichen, wurden die Pfpfen teilweise mit zusätzlichen Dichtungen kombiniert. Zur Umsetzung der statischen Funktion wurden die Pfpfen gebirgsverbunden und in verschiedenen Geometrien hergestellt (Abbildung 1). Die Auslegung der Pfpfen für den Lastabtrag erfolgte auf der Grundlage von überschlägigen Berechnungen (vereinfachte, häufig nicht zutreffende Schub- und Biegespannungsnachweise).

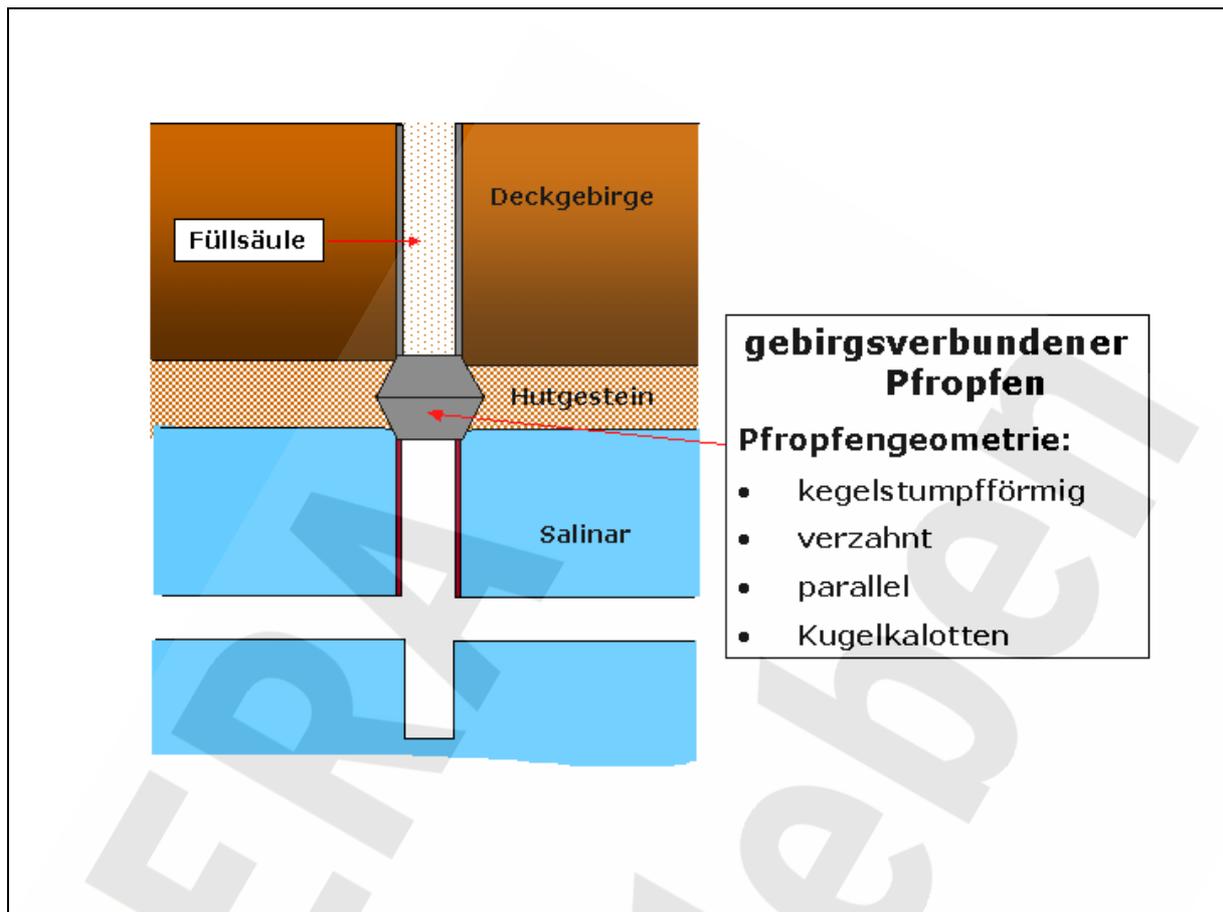


Abbildung 1 : Prinzip eines Schachtverschlusses durch Teilverfüllung mit gebirgsverbundenen Pfropfen (1. Etappe)

Als Füllsäulenmaterialien wurden Salz, Sand, Kies oder Berge (z.B. Abteufmaterial aus dem Deckgebirgsabschnitt) verwendet. Unzureichende Kenntnisse bei der Herstellung von Verfüllsäulen bzw. über ihr Setzungsverhalten führten häufig zum Versagen [10], z.B. durch Auslaufen der Lockermassen an den Füllrörtern.

3.1.1.2 Zweite Etappe (nach 1960 bis 1985)

Die Nutzung von ehemaligen Salzbergwerken als Rohöl- oder Gasspeicher setzte vermehrt ab etwa 1970 ein und stellte zwangsläufig höhere Anforderungen an die Schachtverschlusssysteme. Die Abdichtung der Schächte musste nunmehr **sowohl** gegen Wasserzuflüsse aus dem Deckgebirge – wie herkömmlich – in das Salinar **als auch** gegen Medienaustritte aus dem Grubengebäude in die Biosphäre erfolgen. Durch diese Entwicklung wurden die Forschungen auf dem Gebiet der Schachtverwahrungen

BfS	Konzeptplanung der Schachtverschlüsse für die Schächte Bartensleben und Marie des ERA Morsleben	
9M/ 223 450 11/GHS/ TF/ 0001/00	Stand: 10.03.2004	Seite 25 von 215

unter dieser Zielstellung intensiviert. Die gewonnenen Erkenntnisse wurden in Vorschriften zusammengefasst [11], laufend aktualisiert und bildeten fortan die Grundlage für die Projektierung weiterer Schachtverschlüsse [12]. Beispiele für die erfolgreiche Umsetzung und die Funktionstüchtigkeit dieser Schachtverschlusssysteme sind der Gasspeicher Burggraf-Bernsdorf [13] und der Rohölspeicher Wilhelmine-Carlsglück [14]. Beide Untergrundspeicher sind seit etwa 30 Jahren erfolgreich im Betrieb.

Hinsichtlich der Konstruktionsprinzipien waren die wesentlichen Merkmale dieser Etappe

- die funktionale Trennung statischer und dichtender Elemente (Widerlager und Dichtelement),
 - der Einsatz von gleitfähigen Widerlagern,
 - der Einsatz von Bitumen/Asphalten als Dichtmaterial
- und
- die beginnende Anwendung numerischer Rechenprogramme zur Dimensionierung der Bauwerke.

3.1.1.3 Dritte Etappe (ab 1985)

Die immer umfangreichere wirtschaftliche Nachnutzung von vorhandenen Grubenräumen im Salinar (z.B. als Untertagedeponien) und insbesondere die geplante Endlagerung radioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Formationen führten zu erheblich höheren Anforderungen an Schachtverschlusssysteme. Dadurch vorangetrieben wurden in den letzten Jahren mehrere Forschungsprojekte initiiert, deren wesentlichste Neuerung ein besseres Verständnis der Wechselwirkung von Bauwerk und Gebirge war. Dies wurde besonders auf den Gebieten der Materialforschung [15], [16] sowie der konzeptionellen Entwicklung von Schacht- und Streckenverschlüssen [7], [17] deutlich. Bei der Beurteilung der Sicherheit dieser Bauwerke wurden erstmals Langzeitaspekte betrachtet und standortbezogene Konzepte entworfen, die alle für das Bauwerk wesentlichen Randbedingungen berücksichtigten.

BfS	Konzeptplanung der Schachtverschlüsse für die Schächte Bartensleben und Marie des ERA Morsleben	
9M/ 223 450 11/GHS/ TF/ 0001/00	Stand: 10.03.2004	Seite 26 von 215

In dieser dritten Etappe erweiterte sich das Methodeninventar um:

- Langzeitanalysen [18],
- halbtechnische und In-Situ-Großversuche [17], [19],
- Numerische Modellierung mechanischer und hydraulischer Prozesse [20],
- Erkennen der Bedeutung der aufgelockerten (ausbruchsnahen) Bereiche [20],
- Entwicklung von Bemessungsmethoden für die Dichtelemente (hydraulisch-geometrische Anforderungen) [19]

und um

- Untersuchungen von Dichtmaterialien unter dem Einfluss salinärer Lösungen [21], [22], [24].

Der **heutige Stand der Technik** lässt sich in folgender Weise zusammenfassen:

Als grundlegendes Konzept für Schachtverschlüsse kommen seit 1985 bei der Vollverfüllung vorwiegend geschichtete Verfüllsäulen zur Anwendung. Diese bestehen aus setzungsstabilen Füllsäulen (statische Aufgabe) und Doppel- oder Mehrfachdichtungen (dichtende Aufgabe). Die Füllsäulen bestehen im Salzgebirge hauptsächlich aus Schotter. Als Dichtmaterialien werden seit dieser Zeit z.B. Bitumen/Asphalte, Tone/Bentonite und unterschiedliche Mineralgemische eingesetzt.

Konzeptionell wurden

- die Nachweise der Langzeitbeständigkeit der eingesetzten Materialien durch Betrachtungen zu natürlichen und historischen Analoga und/oder durch Auswertung des Standes zu thermodynamischen Modellrechnungen ausgelegt, wobei beide Arten der Nachweisführung gleichberechtigt sind,
- die Verschlussbauwerke derart geplant, dass möglichst ein zeitabhängiges Anwachsen des Sicherheitsniveaus des Gesamtsystems durch Materialeinsatz und/oder entsprechende konstruktive Bauweise bewirkt wird.

Festzustellen waren dabei zwei Tendenzen, einmal zur Trennung von statischen und dichten Elementen und zum anderen zu einfachen, robusten Gesamtkonstruktionen.

BfS	Konzeptplanung der Schachtverschlüsse für die Schächte Bartensleben und Marie des ERA Morsleben	
9M/ 223 450 11/GHS/ TF/ 0001/00	Stand: 10.03.2004	Seite 27 von 215

Diese Ansätze und Forderungen konnten aber erst dann in Konzepten, Planungen und Ausführungen ihren Niederschlag finden, als folgende drei Voraussetzungen erfüllt waren:

- Auswertung der vorliegenden Erfahrungen,
- Laborative und halbtechnische Untersuchungen der langzeitbeständigen Materialien,
- Verfahren zur Bestimmung der Permeabilität im ausbruchsnahen Gebirgsbereich.

3.1.2 Internationale Endlagerprojekte im Salinar

Endlagerprojekte im Salzgebirge wurden in verschiedenen Nationen in Erwägung gezogen (z. B. Deutschland, Russland, Spanien, Frankreich, USA). Derzeit ist allein das *Waste Isolation Pilot Plant* (WIPP Site) nahe Carlsbad/New Mexico (USA) im Salinargebirge in Betrieb.

Im Rahmen des Genehmigungsverfahrens für dieses Projekt wurden auch Konzeptionen für den Verschluss der Schächte entworfen und mehrfach überarbeitet, die zu großen Teilen auch publiziert sind.

Nach Auswertung vorliegender Literaturquellen [25], [26], [27], [28], [29] zum *Waste Isolation Pilot Plant*-Projekt, war eine deutliche konzeptionelle Änderung der zur Anwendung kommenden Strategie zwischen ca. 1984 und 1995 zu verzeichnen. Die etwa Mitte der 80iger Jahre vorgeschlagenen Varianten, konzentrierten sich auf Salzgrus als langzeitbeständiges Dichtmaterial, dem auf Grund zunehmender Kompaktion durch die Schachtstoßkonvergenz eine zeitlich verzögerte Dichtwirkung zugeschrieben wurde. Aus diesem Grunde war er mit kurzzeitig wirksamen Dichtelementen zu kombinieren. Neben den durchaus positiv zu bewertenden Eigenschaften eines arteigenen und damit unter salinaren Bedingungen korrosionsstabilen Materials, traten aber auch eine Reihe komplexer Problemstellungen auf. Insbesondere die Frage des Kompaktionsverhaltens des Salzgruses wurde dabei in zahlreichen Arbeiten untersucht [27], [28]. Die Unsicherheit, die sich in Modellvorstellungen und Parameteransätzen zu dieser Thematik, die eine außerordentliche Interaktion u.a. zwischen dem Verhalten des umgebenden Gebirges (Konvergenzverhalten), des aus der Verfüllsäule resultierenden Überlagerungsdruckes, dem Materialverhalten des Salzgruses sowie geochemischen Prozessen darstellte, dürfte wohl den Anlass zur Überarbeitung des ursprünglichen Entwurfs [25], [29] gegeben haben. Im überarbeiteten Konzept liegt der Schwerpunkt auf kompaktier-

BfS	Konzeptplanung der Schachtverschlüsse für die Schächte Bartensleben und Marie des ERA Morsleben	
9M/ 223 450 11/GHS/ TF/ 0001/00	Stand: 10.03.2004	Seite 28 von 215

ten Bentonitmaterialien als Hauptdichtelement mit Langzeitfunktion. Nach diesem Konzept soll der Bentonit den als zusätzliches Element integrierten Salzgrus langfristig vor Flüssigkeitszutritten schützen, so dass seine vollständige Kompaktion erreicht wird und er damit seine Dichtfunktion erfüllen kann. Dem heutigen Konzept zur Verwahrung der Schächte der WIPP liegt ein diversitäres System von langzeitbeständigen Dichtelementen und Materialien zugrunde. Nachfolgend soll das derzeit vorliegende Verschlusskonzept (Anlage 1) ausführlich beschrieben werden:

Das Schachtverschlusssystem für das *Waste Isolation Pilot Plant*-Projekt basiert auf einer geschichtet aufgebauten Vollverfüllsäule [25]. Der Verschluss ist so konzipiert, dass sowohl die Freisetzung von Stoffen aus dem Endlager als auch das Eindringen von Wässern und Lösungen in das Endlager begrenzt werden. Dabei wird auf ein Mehrfachkomponentensystem zurückgegriffen, dessen einzelne Elemente zu verschiedenen Zeiten wirksam sind.

Folgende Materialien kommen zum Einsatz:

- Süßwasserbeton,
- Salzwasserbeton, Solebeton,
- kompaktierter Salzgrus,
- kompaktierter Bentonit,
- Asphalt,
- Zementmaterialien.

Die Komponenten K1 bis K3 (siehe Anlage 1) werden als Auffüllgut genutzt. **Das maßgebliche Dichtungssystem** beginnt mit Komponente K4, einer kompaktierten Bentonitsäule die auf einem Basisbetonpfropfen K5 lagert. Da sich dieser Betonpfropfen noch oberhalb des Salzspiegels befindet, wird er aus Süßwasserbeton aufgebaut. Alle darunter befindlichen Betonpfropfen werden aus Solebeton aufgebaut. K4 und K5 fungieren als separates Dichtungssystem mit Lang- und Kurzzeitfunktion zur Trennung der verschiedenen wasserführenden Horizonte und zur Volumenstrombegrenzung des in den Schacht einströmenden Grundwassers von oben.

BfS	Konzeptplanung der Schachtverschlüsse für die Schächte Bartensleben und Marie des ERA Morsleben	
9M/ 223 450 11/GHS/ TF/ 0001/00	Stand: 10.03.2004	Seite 29 von 215

Das zweite Dichtungssystem kann in einen oberen und unteren Teil getrennt werden. Zunächst soll der obere Teil beschrieben werden: Er besteht aus einer auf einem Betonpfropfen K7 ruhenden Asphaltsäule K6, die die Aufgaben einer zeitlich begrenzten Barriere erfüllt und Flüssigkeitsvolumenströme aus dem Deckgebirge bzw. aus der Kontaktzone zwischen Deckgebirge und Salinar verhindert. Der Betonpfropfen selbst ist als zweifaches, doppelkegelstumpfförmiges Widerlager mit zwischengeschaltetem „Waterstop“ (einer Gussasphaltschicht) ausgebildet und besteht aus Solebeton. Daran schließt sich die zum oberen Teil gehörende Langzeitbarriere an, die als kompaktierte Bentonitsäule K8 ausgeführt ist und ebenfalls auf einem Betonpfropfen K9 - bauartgleich wie K7 - aufsitzt.

Diese Bentonitsäule dient zur Begrenzung des Volumenstroms von Salzlösungen und Gasen, die hauptsächlich von unten zuströmen.

Der untere Teil des zweiten Dichtungssystems ist in folgender Weise konzipiert: Das untere Teilsystem schließt unmittelbar an den mittleren Widerlagerpfropfen an und besteht aus kompaktiertem Salzgrus K10, der auf einem dritten Betonpfropfen K11, bauartgleich wie K7 und K9, aufliegt. Unterhalb des Pfropfens schließt sich dann wieder eine Füllsäule aus kompaktiertem Bentonit K12 an, die auf dem unteren Abschlussbauwerk der auslaufsicheren Füllortverfüllung K13 aufsitzt. Dabei ist interessant, dass dieses untere Bentonitpaket aus Gründen der Sofortwirksamkeit feucht eingebaut werden soll. Sowohl die Bentonitsäule als auch der darüber befindliche Solebetonpfropfen übernehmen kurz- und langfristig die Aufgabe Gas- und Flüssigkeitszutritte in die als Langzeitbarriere ausgelegte Salzgrusschicht zu verhindern. Nach erfolgter Kompaktion des Salzgruses übernimmt dieser ebenfalls Langzeitsicherheitsaufgaben, was dann zu einem zusätzlich erhöhten Sicherheitsniveau führt.

Grundsätzlich werden für den Schachtverschluss im *Waste Isolation Pilot Plant* redundante Systeme eingesetzt, was ebenso auch für Verschlussysteme von Endlagern in anderen Wirtsgesteinen diskutiert wird. Im *Waste Isolation Pilot Plant* liegt der Schwerpunkt auf der kompaktierten Bentonitdichtung, der für den gesamten Schachtverschluss sowohl hinsichtlich der Langzeitfunktion als auch hinsichtlich der hydraulischen Dichtwirkung selbst die maßgebliche Bedeutung beigemessen wird. Für Beton wird im *Waste Isolation Pilot Plant* nur eine Lebensdauer von ca. 100 Jahren angesetzt. Für Asphalte wurden zunächst einige Hundert, in den überarbeiteten Konzepten 10.000 Jahre Lebensdauer angesetzt. Beide stellen unangemes-

BfS	Konzeptplanung der Schachtverschlüsse für die Schächte Bartensleben und Marie des ERA Morsleben	
9M/ 223 450 11/GHS/ TF/ 0001/00	Stand: 10.03.2004	Seite 30 von 215

sen kurze Zeitmaße dar, die aber wegen der maßgeblichen Bentonitdichtung und der mit dem Salzgrus verbundenen Redundanz **nicht** zu einer Verminderung an Sicherheit führen. Der größte Unsicherheitsfaktor besteht - nach Auffassung der Betreiber - derzeit noch in der zeitabhängigen Entwicklung von Dichte und Permeabilität des Salzgruses.

Bei der Sicherheitsbeurteilung wird darüber hinaus versucht, weitere Unsicherheiten, die aus der Einschätzung der zukünftigen geologischen/hydrologischen Veränderungen, den beanspruchten Zonen an der Schachtkontur (Auflockerungsbereiche) und aus der Einschätzung der Langzeiteigenschaften der eingesetzten Materialien resultieren, durch folgende Maßnahmen zu begegnen:

- Nutzung der gesamten Schachtlänge zur Abdichtung,
- Beachtung der aufgelockerten Gebirgsbereiche bei der Bemessung/Konstruktion,
- Einsatz einer Vielzahl von Komponenten (konstruktive Diversität),
- Einsatz einer Vielzahl von Materialien (Diversität der Materialien).

3.1.3 Vergleich von Konstruktionsprinzipien unter besonderer Beachtung der Langzeitfunktion

Nachfolgend wurden die identifizierten Konstruktionsprinzipien und in einem folgenden Abschnitt auch die identifizierten Materialien verglichen und hinsichtlich ihrer Anwendbarkeit auf die Schachtverschlüsse des ERA Morsleben geprüft. Bevor dies erfolgte, wurden einige allgemeine Bemerkungen zu Möglichkeiten und Grenzen der Übertragung von Konstruktionsprinzip bzw. Materialauswahl konkreter Schachtverschlüsse auf andere Anwendungsfälle vorangestellt.

Für die Herstellung von Schachtverschlusssystemen existieren spezifische Richtlinien bzw. Vorschriften. Sie basieren auf dem gegenwärtigen Stand der Technik und können als Anhaltspunkte für zu konzipierende Schachtverschlüsse dienen, sind aber im Einzelnen objektbezogen auf die spezifischen Randbedingungen anzupassen. Eine Adaption vorhandener Verschlussmodelle konnte daher nur im Sinne einer Übertragung und Anpassung von Elementen möglich sein.

BfS	Konzeptplanung der Schachtverschlüsse für die Schächte Bartensleben und Marie des ERA Morsleben	
9M/ 223 450 11/GHS/ TF/ 0001/00	Stand: 10.03.2004	Seite 31 von 215

Werden mögliche Konstruktionsprinzipien betrachtet, so sind grundsätzlich zwei Varianten zu unterscheiden (vgl. Abbildung 2):

Variante 1: Schachtvollverfüllung

Variante 2: Schachtteilverfüllung

Beide Varianten können prinzipiell aus den gleichen Einzelementen aufgebaut werden:

- Dichtelemente (hydraulische Funktion)
- Widerlager (statische Funktion)

und

- Füllsäulen (statische und zeitabhängig auch hydraulische Funktion).

Die in der Regel bei Salinarschächten einzusetzende Schachtvollverfüllung kann dabei aus **einem** homogenen Material oder geschichtet (Verfüllsäule mit integrierten Dichtelementen) aufgebaut sein. Falls die Vollverfüllung eines Schachtes nicht möglich ist, kann dieser mittels einer Teilverfüllung gesichert werden. Widerlager übernehmen in diesem Fall neben dem Lastabtrag auch die Lagestabilisierung der Dichtungen. In der TA Abfall [30] ist für Untertagedeponien generell die Vollverfüllung vorgeschrieben. Nachfolgend werden die Einzelemente detailliert beschrieben.

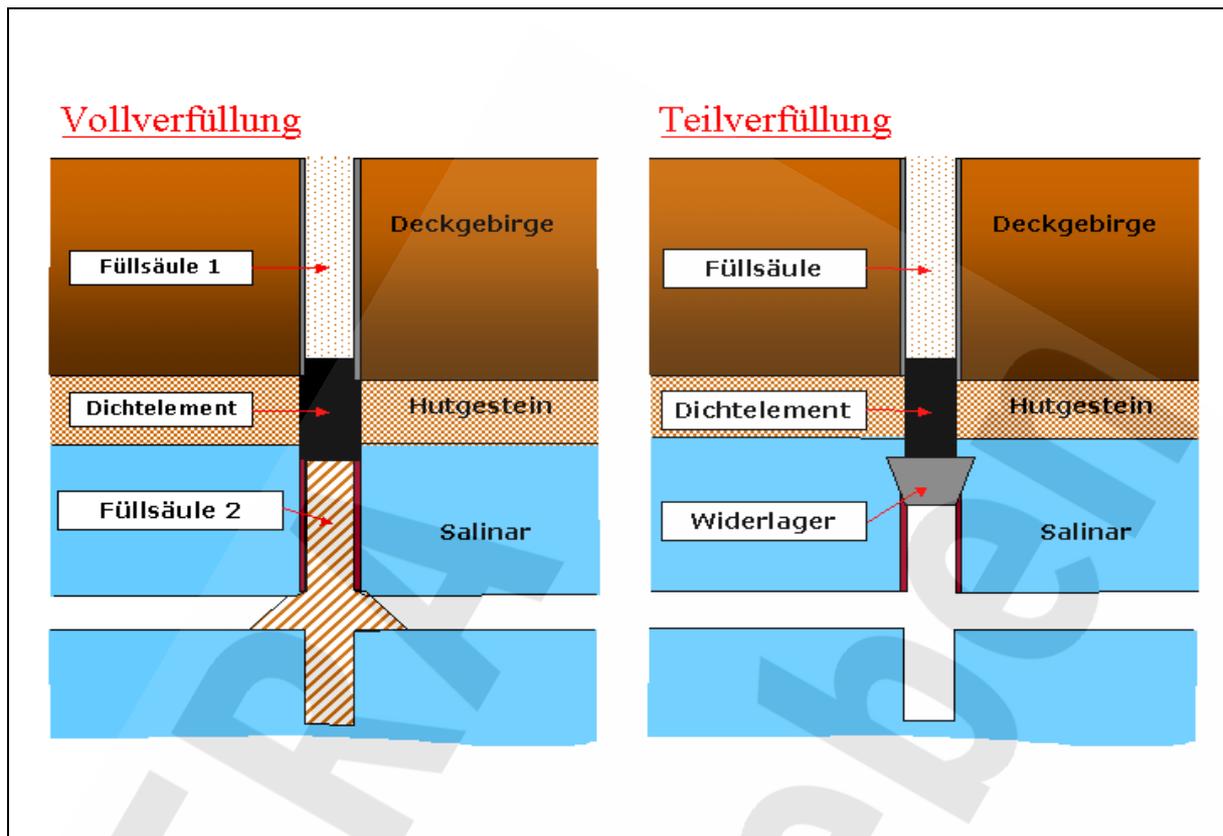


Abbildung 2 : Konstruktionsvarianten der Voll- und Teilverfüllung

3.1.3.1 Dichtelement

Unter Dichtelementen werden bei Schachtverschlüssen diejenigen Bauteile verstanden, die aufgrund ihrer physikalisch/chemischen Eigenschaften eine ausreichende Dichtwirkung gegenüber angreifenden Fluiden gewährleisten bzw. als technisch dicht bezeichnet werden können. Das Kriterium für das Dichtverhalten ist der Gesamtvolumenstrom (vgl. Abbildung 3).

Die Aufgaben von Dichtelementen sind die Abdichtung von Querschnittsflächen und die Abdichtung der konturnahen Gebirgsbereiche einschließlich der Kontaktzone zwischen Dichtung und dem angrenzenden Gebirge. Für die Bemessung eines Dichtelementes sind neben dem Fluiddruck nicht nur die Dichtungsgeometrie und die hydraulische Leitfähigkeit des eingesetzten Materials, sondern auch die hydraulischen Parameter und die Geometrie des ausbruchsnahen aufgelockerten Gebirgsbereiches maßgebend. Die Wirksamkeit (Güte) eines Dichtelementes kann als **Parallelschaltung** folgender Einzelvolumenströme angesehen werden [23] (Abbildung 3):

- Teilvolumenstrom durch das Dichtmaterial (a),
 - Teilvolumenstrom durch die Kontaktzone zwischen Dichtmaterial – Gebirge (b)
- und
- Teilvolumenstrom durch den ausbruchsnahen Gebirgsbereich (c).

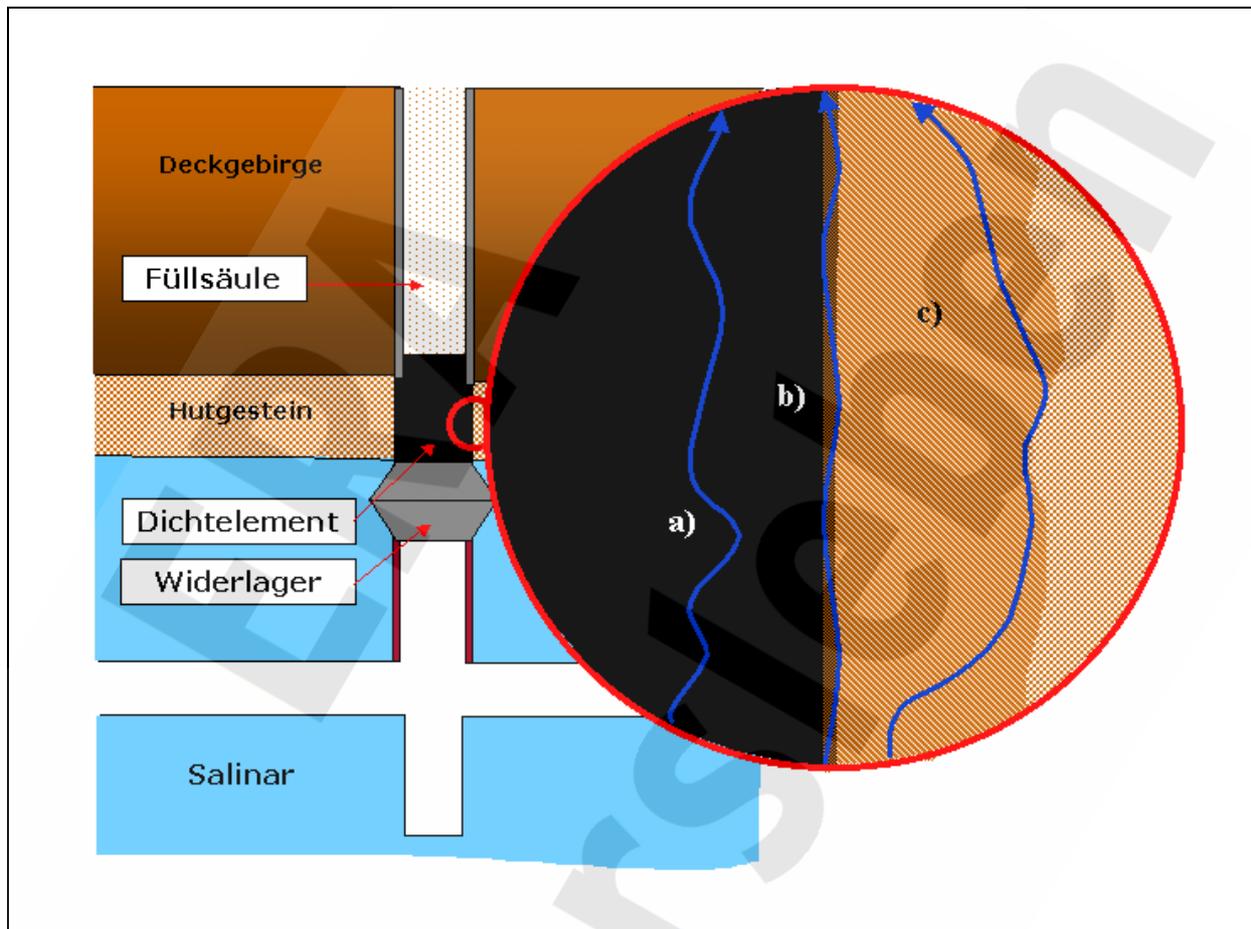


Abbildung 3 : Gesamtvolumenstrom als Summe verschiedener Teilströme

3.1.3.2 Widerlager

Unter einem statischen Widerlager wird das Bauteil eines Schachtverschlusssystemes verstanden, welches zur Aufnahme und zur Einleitung der aufgebrachtten Kräfte in das Gebirge dient. Bei Teilverfüllungen erfüllen Widerlager die tragende und stützende Funktion. Außerdem fixieren sie die Dichtelemente in ihrer Lage, was die Voraussetzung für die Funktionsfähigkeit der Dichtungen darstellt.

Widerlager können als gebirgsverbundene oder als gleitfähige Konstruktionen ausgeführt werden [7], [10], [31]. Die Gleitfähigkeit kann durch Stoßbeschichtung wie z. B. mit Bitumen, Kunstharzen, Kunststofffolien, Latexanstrichen erreicht werden.

Die Widerlager können in vier Grundkonstruktionen eingeteilt werden [12]:

- parallele Widerlager,
 - kegelstumpfförmige Widerlager,
 - verzahnte Widerlager
- und
- Kugelkalotten.

In Abbildung 4 sind die Konstruktionsprinzipien dargestellt, wobei festzustellen ist, dass mit Ausnahme der parallelen Widerlager, auch Mehrfachkombinationen der aufgeführten Einzelkomponenten zur Anwendung kommen können.

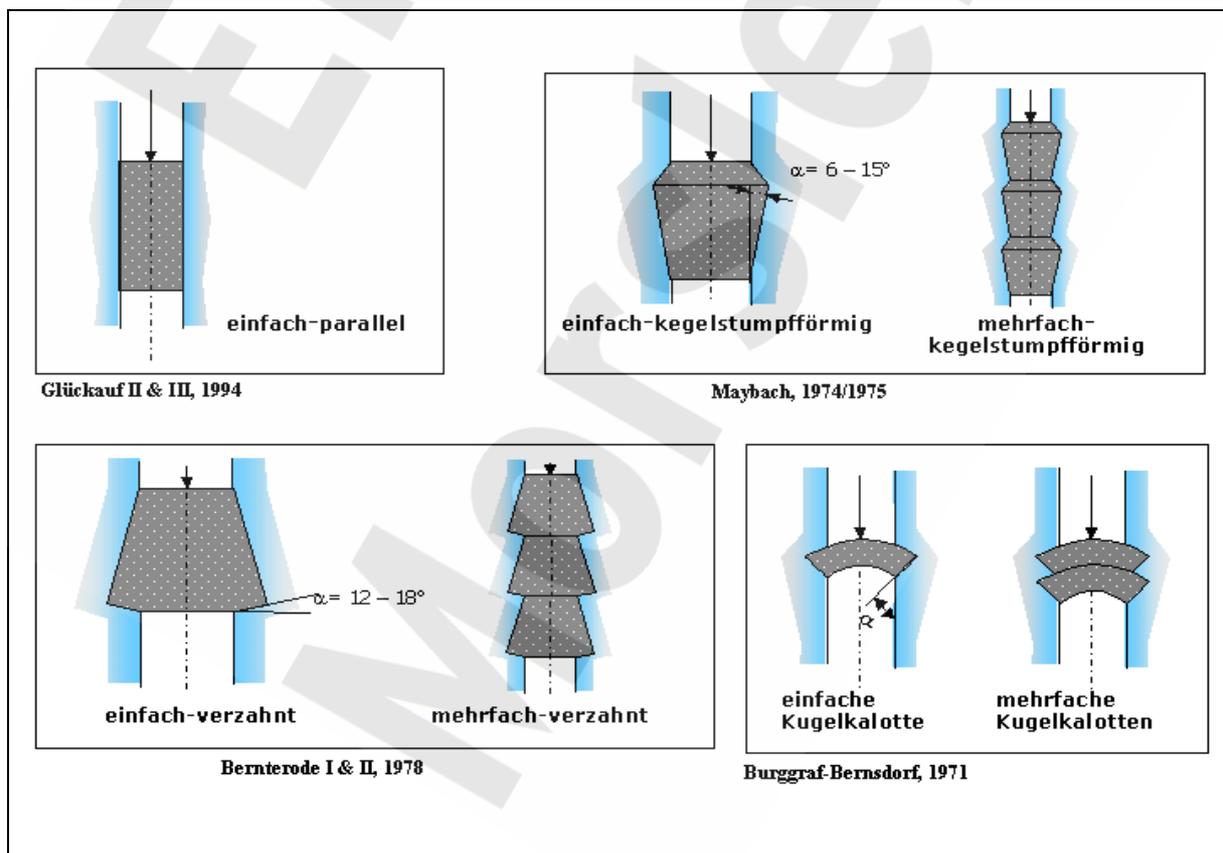


Abbildung 4 : Konstruktionsvarianten für Widerlager nach [12]

BfS	Konzeptplanung der Schachtverschlüsse für die Schächte Bartensleben und Marie des ERA Morsleben	
9M/ 223 450 11/GHS/ TF/ 0001/00	Stand: 10.03.2004	Seite 35 von 215

3.1.3.3 Füllsäule

Die Anforderungen an Füllsäulen sind abhängig von ihrer Lage im Verschlussystem. Sie erfüllen prinzipiell die Stabilisierung des Ausbruchsbereichs und können zusätzlich auch einen Lastabtrag gewährleisten [10].

Die Füllsäule, welche nur zur Stabilisierung des Ausbruchsbereiches dient, ist oberhalb der obersten Dichtung angeordnet. An Füllsäulen, welche die Funktion des Lastabtrages erfüllen, werden wesentlich höhere Anforderungen gestellt. Sie müssen nicht nur aus langzeitbeständigen Materialien bestehen, sondern außerdem setzungsstabil sein und den Lastabtrag aufgebrachtener Kräfte in das Gebirge gewährleisten. Die Sicherung der Füllörter gegen das Auslaufen der Füllsäule erfolgt durch verschiedene konstruktive Maßnahmen [32], wobei die Materialeigenschaften der Füllsäule einen wesentlichen Einfluss ausüben. Konstruktive Maßnahmen zur Sicherung in Strecken und Füllortbereichen sind:

- Vorschüttungen vor der Füllortböschung
- und
- Abflachen der Konturen im Übergangsbereich Schacht-Strecke.

3.1.4 Vergleich von Materialien unter besonderer Beachtung der Langzeitbeständigkeit

Zur Umsetzung der Aufgaben der jeweiligen Schachtverschlüsselemente werden verschiedene Materialien eingesetzt. Sie unterscheiden sich in ihren spezifischen Eigenschaften, die durch den mineralogischen Phasenbestand, die chemische Zusammensetzung und das Gefüge bestimmt werden.

Im Hinblick auf die Anwendbarkeit als Dichtungs- und/oder Verfüllbaustoffe sind insbesondere die mechanischen Eigenschaften und hydraulischen Parameter sowie ihre physikalische/chemische Stabilität unter dem Einfluss von Salzlösungen und unter dem Langzeitaspekt von Bedeutung. Nachfolgend werden für die einzelnen konstruktiven Elemente die bisher eingesetzten bzw. geplanten Materialien aufgeführt und ihre wichtigsten Eigenschaften beschrieben. Interessant erscheint diesbezüglich auch die im WIPP-Projekt vorgenommene Gruppierung in kurzzeitig, langfristig und dauerhaft wirkende Dichtmaterialien [25].

BfS	Konzeptplanung der Schachtverschlüsse für die Schächte Bartensleben und Marie des ERA Morsleben	
9M/ 223 450 11/GHS/ TF/ 0001/00	Stand: 10.03.2004	Seite 36 von 215

3.1.4.1 Dichtelement

Unter Beachtung der Langzeitbeständigkeit der einzusetzenden Materialien beschränkte sich die Auswahl auf:

- Bitumen und Asphalte,
 - Tone/ Bentonite,
 - Mineralgemische
- und
- Salzgrus/Salzhaufwerk.

Bitumen, Asphalte, Tone, Bentonite und Mineralgemische stellen sofort wirksame, d.h. mit dem Einbau im Bauwerk funktionstüchtige Materialien dar, die ihr Eigenschaftsspektrum unter dem Langzeitaspekt jedoch verändern. Salzgrus und Salzhaufwerk bilden erst nach zeitabhängig erfolgter Kompaktion die erforderlichen Dichteigenschaften aus, weshalb ihre funktionale oder bestimmungsgemäße Wirkung erst nach einer Vorlaufzeit eintritt.

In Tabelle 1 sind die Aufgaben und die Eigenschaften für Asphalte/Bitumen, Mineralgemische, Tone/Bentonite und Salzgrus aufgeführt. Übergreifend ist zu bemerken, dass die aufgeführten Eigenschaften stets unter der Berücksichtigung der angreifenden Fluida (Wasser, NaCl-Lösung, IP21-Lösung „Q-Lauge“) zu bewerten sind.

Tabelle 1 : Einsatzbereiche und Eigenschaften von Dichtmaterialien

Dichtmaterial	Aufgaben	Eigenschaften	Quelle
Bitumen Asphalte Gussasphalte Asphaltbeton	<ul style="list-style-type: none"> - Querschnittsabdichtung - Stoßbeschichtungsmaterial - Abdichtung von konturnahen Gebirgsbereichen - Korrosionsschutz 	<ul style="list-style-type: none"> - wasserunlöslich - Wasserundurchlässigkeit - chemische Beständigkeit - keine wesentliche biologische Degradation - viskoses und/oder elastisches Materialverhalten - Newton'sches Fluid 	[10] [15] [32] [33]
Tone/Bentonite	<ul style="list-style-type: none"> - Querschnittsabdichtung 	<ul style="list-style-type: none"> - Quellfähigkeit bei Wasseraufnahme <ul style="list-style-type: none"> · Quelldruck (Lastabtrag) · nachträgliche Verdichtung · Selbstheilung von Rissen - sehr geringe hydraulische Leitfähigkeit - hohes Sorptionsvermögen 	[24] [29] [32] [34] [35]
Mineralgemische	<ul style="list-style-type: none"> - Querschnittsabdichtung - Füllsäule mit Dichtaufgaben 	<ul style="list-style-type: none"> - hohe Lagerungsdichte durch Schlupfkornprinzip - geringe hydraulische Leitfähigkeit - erosionsstabil - chemische Resistenz - erhöhte Trag- und Scherfestigkeit 	[36] [37]
Salzgrus/Salzhaufwerk	<ul style="list-style-type: none"> - Querschnittsabdichtung - Füllsäule mit statischer und dichtender Aufgabe (zeitverzögert) 	<ul style="list-style-type: none"> - Unsicherheit hinsichtlich des Kompaktionsverhaltens - hohe hydraulische Leitfähigkeit vor Kompaktion - niedrige hydraulische Leitfähigkeit nach Kompaktion - gute mechanische Eigenschaften Trag- und Scherfestigkeit nach erfolgter Kompaktion - Kompaktionsverhalten ist in Abhängigkeit von Fluidzutritt zu betrachten (keine Kompaktion bei Porendruck) - kein Sorptionsvermögen - chemische Beständigkeit gegenüber Salzlösungen 	[27] [28]

BfS	Konzeptplanung der Schachtverschlüsse für die Schächte Bartensleben und Marie des ERA Morsleben	
9M/ 223 450 11/GHS/ TF/ 0001/00	Stand: 10.03.2004	Seite 38 von 215

3.1.4.2 **Widerlagersäule**

Zum Bau von Widerlagern werden kohäsive Materialien eingesetzt. Im Einzelnen sind dies

- Betone der Betonklassen B10, B15, B25 oder B35,
- Solebeton,
- Salzbeton

und

- Magnesiabeton.

Auch Mauerwerk kann als Trockenmauerwerk oder mit Mörtelfugen als Widerlager ausgeführt werden, wobei herkömmliche Mauerwerkssteine (z.B. gebrannte Klinker) oder Mauerwerksverbände aus langzeitbeständigem Naturstein zum Einsatz kommen können. Widerlager aus Mauerwerk sind ebenso wie Widerlager aus Beton setzungsstabil, tragen die aufgenommenen Belastungen in das umgebende Gebirge ab und sichern somit die Lagestabilität der Dichtelemente.

3.1.4.3 **Füllsäule**

Bei der Diskussion von Materialien, die zum Aufbau der Füllsäule genutzt werden, muss zwischen den unterschiedlichen Teilfunktionen der Füllsäule unterschieden werden.

An das Material von Füllsäulen, die nur zur Stabilisierung des Ausbruchsbereichs dienen, werden außer der Langzeitbeständigkeit keine weiteren spezifischen Anforderungen gestellt.

Materialien für Füllsäulen, die zusätzlich auch **statische Aufgaben zu erfüllen haben**, erfordern gesonderte Nachweise, wie z.B. Langzeitbeständigkeit der Materialien, Setzungsstabilität und Auslaufsicherheit im Füllortbereich.

Grundsätzlich eignen sich folgende Materialien zum Aufbau einer setzungsstabilen Füllsäule in einem langzeitsicheren Schachtverschluss im Salinar:

- Schotter, Kiese, Sande mit/ohne Zusatz von Bentoniten, Tonen (Mineralgemische)

und

- Salzgrus/Salzhaufwerk (nach ausreichender Kompaktion).

BfS	Konzeptplanung der Schachtverschlüsse für die Schächte Bartensleben und Marie des ERA Morsleben	
9M/ 223 450 11/GHS/ TF/ 0001/00	Stand: 10.03.2004	Seite 39 von 215

Diese Füllsäulen müssen die Stabilität des Gesamtsystems gewährleisten.

Die Setzungsstabilität der Füllsäule wird durch die Wahl z.B. eines geeigneten Kornspektrums [38] und/oder eine hinreichende Vorverdichtung gewährleistet. Die mit der Zeit auflaufenden Gebirgskonvergenzen erhöhen die Setzungsstabilität der Füllsäule.

3.1.5 Materialauswahl und mögliche Schachtverschlusskonzeptionen

Für die Materialauswahl ist das Kriterium der Langzeitstabilität der einzusetzenden Materialien entscheidend.

Die Langzeitstabilität im geforderten Nachweiszeitraum (30.000 Jahre) und darüber hinaus muss für Bitumen/Asphalte, Tone/Bentonite, Mineralgemische, Schotter, Splitt, Sande, Kiese, Salzhauwerk sowie Salzgrus nachgewiesen werden. Die Nachweise der Langzeitstabilität der genannten Schachtverschlussbaustoffe können durch

- Literaturrecherchen und deren Auswertung hinsichtlich der mineralogisch-chemischen Modellierung für die in Frage kommenden Schachtverschlussbaustoffe,
- natürliche geologische Analoga

und

- historische Analoga

erfolgen.

Unter Analoga werden Systeme in der Natur verstanden, in denen über historische oder geologische Zeiträume physikalische und chemische Prozesse ablaufen oder abgelaufen sind, wie sie ähnlich in den betrachteten Systemen (z.B. Schachtverschlüssen) zu erwarten sind.

Basierend auf der Auswahl geeigneter Schachtverschlussmaterialien und unter Berücksichtigung der aus den Vergleichen abgeleiteten Konstruktionsprinzipien konnten nachfolgend fünf mögliche Schachtverschlusskonzeptionen als Basis für die weiteren Planungen für die Schachtverschlüsse des ERA Morsleben aufgezeigt werden.

Unter Maßgabe der in Kapitel 3.1.3 identifizierten Konstruktionsprinzipien lassen sich auf Grundlage des heutigen Kenntnisstandes eine Reihe einfacher Grundvarianten ableiten, die den Randbedingungen im ERA Morsleben angepasst sind. Diese Grundvarianten stellen mehr

BfS	Konzeptplanung der Schachtverschlüsse für die Schächte Bartensleben und Marie des ERA Morsleben	
9M/ 223 450 11/GHS/ TF/ 0001/00	Stand: 10.03.2004	Seite 40 von 215

oder weniger Einzelsysteme dar, die im Sinne einer Optimierung zumindest teilweise auch kombinierbar sind.

Alle Grundvarianten bauen auf folgenden Voraussetzungen auf:

- Vollverfüllung,
- Einsatz langzeitstabiler Materialien,
- Rauben der Einbauten,
- Berauben aufgelockerter Gebirgsbereiche in ausgewählten Schachtabschnitten,
- Stabilisierung der Verfüllsäule, insbesondere in den Füllortbereichen zur Erreichung einer Auslaufsicherheit.

3.1.5.1 Homogene Füllsäule

Eine mögliche Konstruktionsvariante für den Schachtverschluss war die durchgehende homogene Füllsäule (vgl. Abbildung 5). Diese besteht aus einem langzeitbeständigen Material, das eine hydraulische Leitfähigkeit aufweist, die das Erfüllen vorgegebener Grenzwerte hinsichtlich eines eindringenden bzw. austretenden Volumenstromes garantiert. Die Füllsäule muss durch geeignete konstruktive Maßnahmen im Füllortbereich und durch entsprechende Materialauswahl gegen Auslaufen gesichert werden. Die Setzungsstabilität kann in dieser Variante als zusätzliches Kriterium formuliert werden, ist aber nicht zwingend erforderlich. Ein wesentlicher Vorteil dieses Konzeptes ist die Beschränkung auf ein einzusetzendes Material, das sowohl die theoretische Beschreibung (Stoffgesetze und Parameter) als auch die Einbautechnologie vereinfacht. Als nachteilig kann sich die Beschränkung auf ein einzusetzendes Material erweisen, wenn dieses als System komplett versagt. Ein entscheidender wirtschaftlicher Nachteil ist eine in weiten Teilen des Schachtes resultierende Überdimensionierung.

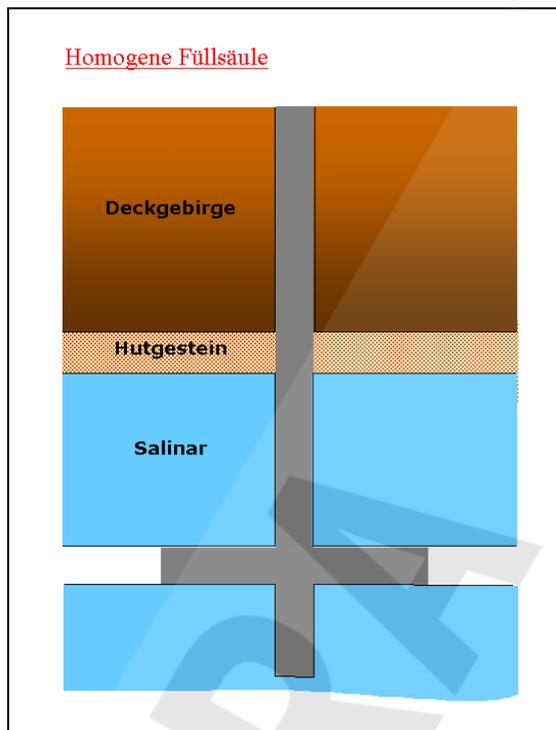


Abbildung 5 : Homogene Füllsäule

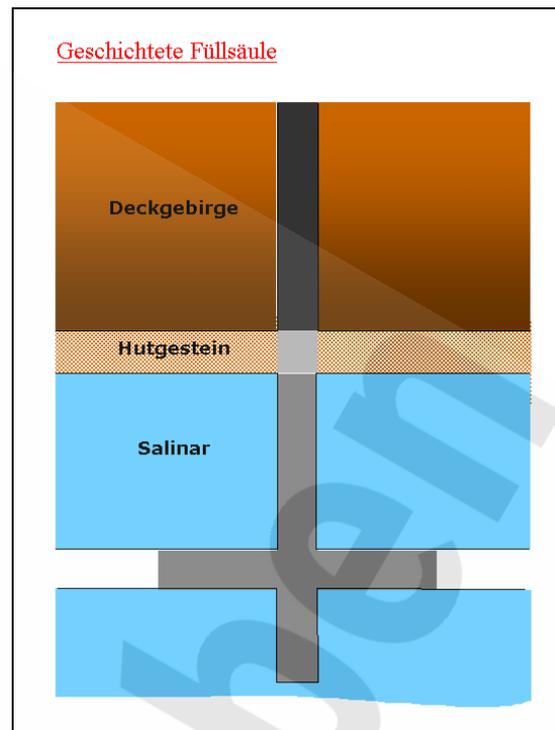


Abbildung 6 : Geschichtete Füllsäule

3.1.5.2 **Geschichtete Füllsäule**

Als eine weitere Variante konnte die Konstruktion einer geschichteten Füllsäule abgeleitet werden. Die einzusetzenden Verschlussmaterialien werden entsprechend den mechanischen und hydraulischen Eigenschaften des Gebirges ausgewählt (vgl. Abbildung 6). Sie müssen die Anforderungen der ausreichenden Dichtwirkung gegenüber angreifenden Fluiden, der Langzeitbeständigkeit und der Setzungsstabilität erfüllen. Wie im ersten Fall muss auch hier die Füllsäule gegen das Auslaufen gesichert werden. Vorteil dieser Variante ist die bessere Anpassung der Füllsäuleneigenschaften an die Gebirgseigenschaften (hydraulische Leitfähigkeit, mechanische Parameter) im jeweiligen Teilbereich und damit eine verbesserte Wirtschaftlichkeit gegenüber der ungeschichteten Füllsäule. Nachteilig wirkt sich die Vielzahl der Materialien bei der Nachweisführung und beim Einbau aus.

BfS	Konzeptplanung der Schachtverschlüsse für die Schächte Bartensleben und Marie des ERA Morsleben	
9M/ 223 450 11/GHS/ TF/ 0001/00	Stand: 10.03.2004	Seite 42 von 215

3.1.5.3 Dichtelemente ohne Redundanz

Bei dieser Konstruktionsvariante werden zwei Dichtelemente so angeordnet (vgl. Abbildung 7), dass sie, unabhängig voneinander auf die Lastfälle **aufsteigende Laugen aus dem Grubengebäude** bzw. **Zutritt von Deckgebirgwässern** ausgelegt, ihre speziell zugeordnete Aufgabe im Gesamtsystem erfüllen. Zum Abtrag der Lasten dient eine setzungsstabile, aus langzeitbeständigen Materialien bestehende und gegen das Auslaufen gesicherte Füllsäule. Zwischen den beiden Dichtelementen befindet sich ebenfalls eine setzungsstabile, langzeitbeständige Füllsäule. Sie dient zur Fixierung der oberen Dichtung und zum Abtrag der über das untere Dichtelement eingetragenen Lasten.

Vorteil ist in diesem Fall die Trennung der Dichtelemente gegen Deckgebirgwässer und gegen aufsteigende Fluide sowie die Anpassung der Dichtelementeigenschaften an das umgebende Gebirge, einschließlich der Kontaktfuge zwischen Dichtung und umgebendem Gebirge und an die ausbruchsnahen, aufgelockerten Gebirgszone. Nachteilig erscheint die Tatsache, dass bei Versagen eines Teilsystems das jeweilig andere System nicht die zusätzlich entstehenden Aufgaben übernehmen kann und somit eine Redundanz im Gesamtsystem fehlt.

3.1.5.4 Dichtelemente mit Redundanz

Im Gegensatz zur vorangegangenen Variante wird jede oder aber nur eine der beiden Dichtungen gegen die beiden Lastfälle einen nur von oben und einen nur von unten wirkenden Flüssigkeitsdruck ausgelegt. Zusätzlicher Vorteil dieser Variante (vgl. Abbildung 8) gegenüber der voran diskutierten ist die zusätzliche Redundanz. Gegenüber von unten wirksamen Fluiden sind all diese Vorteile in vollem Umfang gegeben, für zusätzliche Deckgebirgslösungen hingegen erst durch zusätzliche Maßnahmen erreichbar.

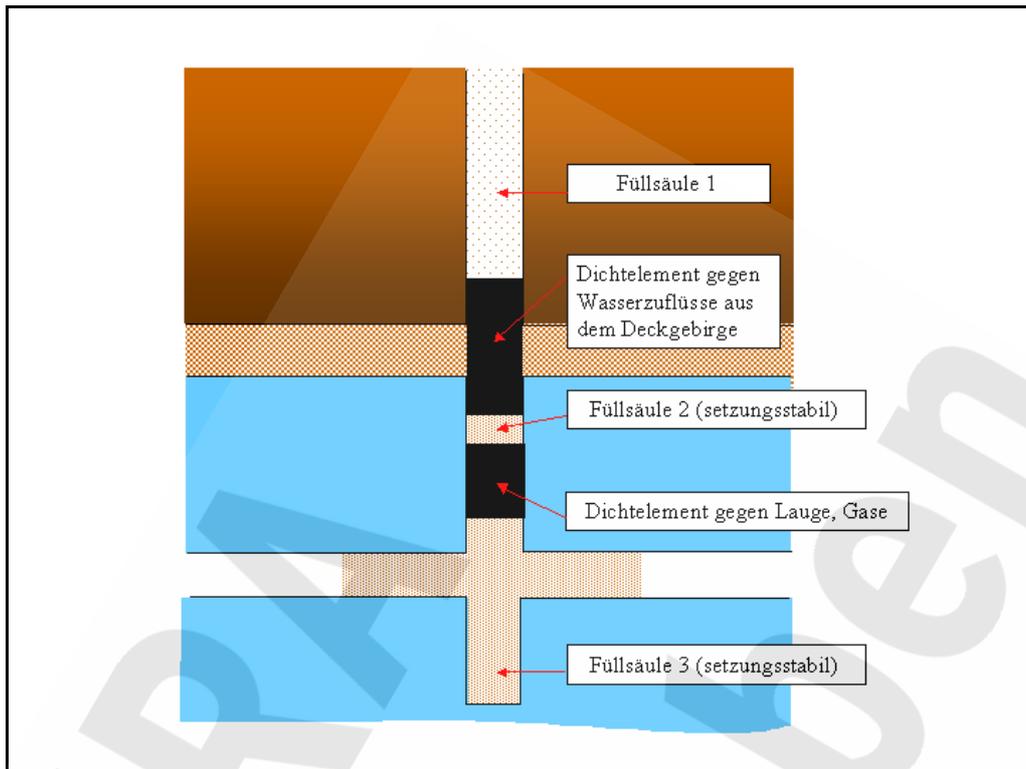


Abbildung 7 : Dichtelemente ohne Redundanz

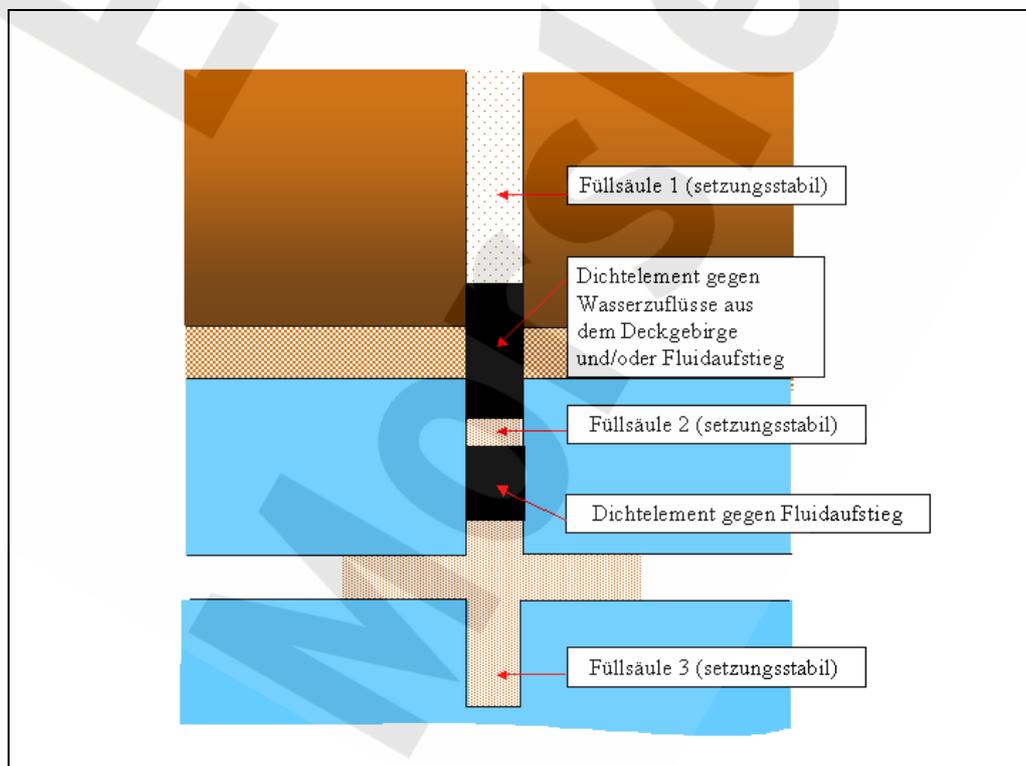


Abbildung 8 : Dichtelement mit Redundanz

BfS	Konzeptplanung der Schachtverschlüsse für die Schächte Bartensleben und Marie des ERA Morsleben	
9M/ 223 450 11/GHS/ TF/ 0001/00	Stand: 10.03.2004	Seite 44 von 215

3.1.5.5 Dichtelemente aus diversitärem Material und/oder mit konstruktiver Diversität

Die Eigenschaft diversitärer Systeme ist, dass Bauelemente mit gleicher Funktion unterschiedlich aufgebaut sind bzw. auf verschiedenartigen Wirkprinzipien beruhen. Dadurch soll eine *qualitative* Redundanz in den Wirkungsweisen erreicht werden, die in Kombination mit *quantitativer* Redundanz größtmögliche Sicherheit garantieren kann. In Abbildung 9 ist eine Möglichkeit eines hinsichtlich des Materialeinsatzes diversitären Dichtsystems dargestellt. Bei diesem Dichtsystem bestehen die obere und die untere Dichtung aus Bentonit-Material. Beide Dichtungen sind wie im Abschnitt 3.1.5.4 beschrieben, für beide mögliche Lastfälle ausgelegt. Das Gesamtsystem weist damit eine entsprechende Redundanz auf. Zwischen beiden Dichtungen befindet sich eine Schotterfüllsäule, in die Asphalt eingebracht wird. Mit dem Asphalt kommt ein weiteres Material zum Einsatz, das eine eigenständige und vom Bentonit-dichtelement unabhängige Dichtfunktion ausübt. Auf diese Weise werden dem Gesamtsystem neben Redundanz auch diversitäre Eigenschaften verliehen, was zu einer Erhöhung des Sicherheitsniveaus führt.

Neben dieser, durch unterschiedlichen Materialeinsatz erzeugten Diversität ist auch die Verbindung unterschiedlicher Konstruktionsprinzipien für das Dichtungselement, d.h. eine konstruktive Diversität grundsätzlich denkbar.

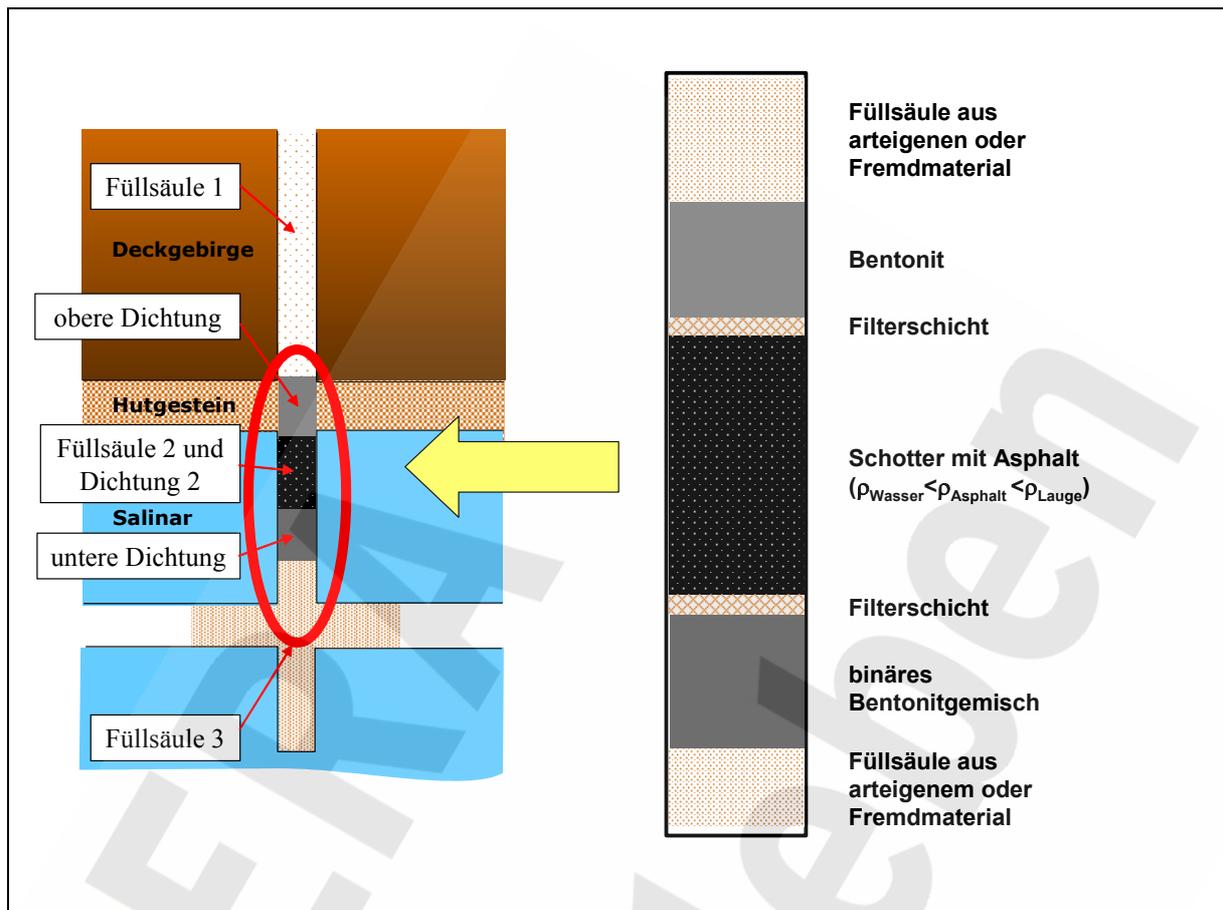


Abbildung 9 : Diversitäre Dichtsysteme

3.2 Normen und Richtlinien für Sicherheitsbetrachtungen von Ingenieurbauwerken und Rechtsvorschriften für die Verwahrung von Schächten

Um hinsichtlich der Sicherheitsanalyse eindeutige und nachvollziehbare Aussagen formulieren zu können, erschien es wesentlich, grundlegende Begriffe inhaltlich festzulegen. Ziel war es dabei, ein schlüssiges und transparentes Konzept zur konzeptionellen Planung eines langzeitsicheren Schachtverschlussbauwerkes vorzulegen. Bei der inhaltlichen Festlegung einzelner Termini wurde auf grundlegende Normen und Richtlinien zurückgegriffen, wie sie bei Sicherheitsanalysen von Bauwerken i.a. in Deutschland bzw. der Schweiz Anwendung finden. Am Beginn dieses, zur Begriffsbestimmung erforderlichen Abschnittes, sollen die einbezogenen Normen und Richtlinien aufgeführt und in ihrer Verwendbarkeit für die hier zur Rede stehenden Sicherheitsbetrachtungen kommentiert werden.

BfS	Konzeptplanung der Schachtverschlüsse für die Schächte Bartensleben und Marie des ERA Morsleben	
9M/ 223 450 11/GHS/ TF/ 0001/00	Stand: 10.03.2004	Seite 46 von 215

Die Beurteilung der Sicherheit von untertägigen Verschlussbauwerken, insbesondere bei Endlagern für radioaktive Abfälle, erfordert eine standortbezogene Vorgehensweise. Dies resultiert aus einer zweifachen Wirkung des Gebirges, das sowohl als lasterzeugendes als auch als lastabtragendes Element in ein Modell zu integrieren ist und sich demzufolge mit dem Bauwerk in komplexer Wechselwirkung befindet. Eine entscheidende Aufgabe stellt die Einschätzung des Sicherheitsniveaus über sehr lange Zeiträume dar, in denen geologisch/geomechanische und chemisch/physikalische Prozesse ablaufen und zu veränderten Eingangsgrößen bzw. Zuständen des Bauwerkes führen können. Auf Grund spezifischer Standortbedingungen können alle in der einschlägigen Literatur verfügbaren Sicherheitsanalysen und -konzepte nur in einem übertragenen Sinne angewendet werden, weshalb Verallgemeinerungen bzw. zweckdienliche Adaptionen dieser vorhandenen Konzepte erforderlich sind. Das vorliegende Sicherheits- und Nachweiskonzept lehnt sich demzufolge an die allgemeingültigen und verbindlichen Normen an, wobei grundsätzlich ein größerer Ermessensspielraum für die Anwender als sinnvoll erachtet wird:

- SIA 160 [41],
- SIA 260 [42],
- DIN V ENV 1991-1 [43],
- DIN V ENV 1997-1 [44],
- DIN V ENV 1998-1 [45],
- DIN 1054-100 [46]

und

- TA Abfall [30].

Aus den allgemeinen Normen (DIN, ENV) wurden für das zu erstellende Sicherheits- und Nachweiskonzept relevante Begriffe erfasst und einheitlich definiert. Zur Ermittlung von Konstruktionsvarianten für die Schachtverschlusssysteme wurde aus den Regelwerken des Schweizer Ingenieur- und Architekten-Vereins das Konzept der Gefährdungsbilder übernommen. Die Südharzrichtlinie [32] sowie die Richtlinien der Oberbergämter [39], [40] wurden für Dimensionierungsvorschläge, Materialvorschriften bzw. für den Nachweis der

BfS	Konzeptplanung der Schachtverschlüsse für die Schächte Bartensleben und Marie des ERA Morsleben	
9M/ 223 450 11/GHS/ TF/ 0001/00	Stand: 10.03.2004	Seite 47 von 215

Eignung setzungsstabiler Füllgüter beachtet. Die Forderung der Schachtvollverfüllung wurde aus der TA Abfall abgeleitet.

Eingangs soll der Begriff **Sicherheitskonzept** in einem übergreifenden Sinne erläutert werden. Ein Sicherheitskonzept umfasst die gesamte Vorgehensweise zur Lösung der im Kapitel 5 detaillierter erläuterten Teilaufgaben des Sicherheits- und Nachweiskonzeptes:

- Formulierung der Anforderungen,
- Analyse der Gefahren und Einwirkungen (integrierte Langzeitbetrachtung),
- Ableitung von Leitgefahren und Gefährdungsbildern,
- Bauwerksentwurf durch festzulegende Konstruktionsprinzipien und Materialauswahl,
- Nachweis der Langzeitstabilität der Materialien,
- Nachweis der Tragfähigkeit über einen Zeitraum von 30.000 Jahren,
- Nachweis der Gebrauchstauglichkeit über einen Zeitraum von 30.000 Jahren,
- Bewertung der Ergebnisse durch Vergleich mit vorgegebenen Grenzkriterien ggf. Veränderung des Bauwerks (Material/Geometrie)

und

- Beurteilung des erreichten Sicherheitsniveaus.

3.2.1 Grenzzustand der Tragfähigkeit

Unter dem Terminus **Grenzzustand der Tragfähigkeit** werden jene Zustände verstanden, die im Zusammenhang mit dem Einsturz oder anderen Formen des Tragwerksversagens stehen. Sie entsprechen im Bauwesen i.a. dem größten Tragwiderstand des Tragwerkes oder des/der tragenden Bauteils/e [43].

Der Nachweis der Tragfähigkeit muss folglich schlüssig zeigen, dass die Beanspruchung des Systems Bauwerk/Gebirge, betrachtet über einen Zeitraum von 30.000 Jahren, nicht zu dessen Versagen führt. In aller Regel erfolgt er als deterministischer Nachweis.

BfS	Konzeptplanung der Schachtverschlüsse für die Schächte Bartensleben und Marie des ERA Morsleben	
9M/ 223 450 11/GHS/ TF/ 0001/00	Stand: 10.03.2004	Seite 48 von 215

3.2.2 **Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit**

Der **Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit** kennzeichnet Zustände, bei deren Überschreitung die festgelegten Bedingungen für die Gebrauchstauglichkeit einer Konstruktion oder des/der tragenden Bauteils/e nicht mehr erfüllt sind [43]. Dabei ist es unerheblich, in welcher Weise bzw. durch welche Einwirkungen es zur Überschreitung der Grenzwerte kommt. In aller Regel setzt Gebrauchstauglichkeit die Tragfähigkeit der Gesamtkonstruktion voraus. Der Nachweis der Gebrauchstauglichkeit muss schlüssig zeigen, dass bei bestimmungsgemäßem Gebrauch bzw. bei zweckentsprechender Nutzung des Bauwerkes eine Über- bzw. Unterschreitung von vorgegebenen bzw. festgelegten Grenzwerten innerhalb des vorgegebenen Bemessungszeitraumes von 30.000 Jahren ausgeschlossen werden kann. Er baut im Allgemeinen auf dem Nachweis der Tragfähigkeit auf. Als Kriterium für die Beurteilung der Gebrauchstauglichkeit wurde ein nicht zu überschreitender Volumenstrom durch das System von 2 m³/a vorgegeben. Die Dichtheit als Kriterium spielt insofern eine untergeordnete Rolle, da die Bemessung der Dichtelemente unter Berücksichtigung der aufgelockerten, permeablen Gebirgsbereiche auf den o.a. Grenzvolumenstrom von 2 m³/a ausgerichtet ist.

3.2.3 **Dauerhaftigkeit und Wirksamkeit**

Der Eurocode 1 fordert im Hinblick auf die **Dauerhaftigkeit** eines Bauwerkes dessen Abstimmung auf seine Umwelt, so dass es während der geplanten Nutzungsdauer bei angemessenem Instandhaltungsaufwand gebrauchsfähig bleibt [43].

Unter Beachtung der bei den hier in Rede stehenden Schachtverschlüssen geltenden Randbedingungen muss der Begriff Dauerhaftigkeit abweichend vom Eurocode 1 definiert werden. Die Dauerhaftigkeit umfasst demnach die Auslegung des Bauwerkes gegen sämtliche in einer extrem langen Nutzungsdauer (über 30.000 Jahre) auftretenden Einwirkungen/Gefährdungen und damit sowohl den Erhalt der Tragfähigkeit als auch der Gebrauchstauglichkeit. Mit der Einführung des zusätzlichen Nachweises der Langzeitstabilität der Materialien wird den hohen Anforderungen, die hier aus der geplanten Nutzungsdauer von über 30.000 Jahren resultieren, Rechnung getragen. Ebenfalls abweichend vom Eurocode 1 wird, in Anlehnung an den Grundsatz in [30], kein Instandhaltungsaufwand in Betracht gezogen.

BfS	Konzeptplanung der Schachtverschlüsse für die Schächte Bartensleben und Marie des ERA Morsleben	
9M/ 223 450 11/GHS/ TF/ 0001/00	Stand: 10.03.2004	Seite 49 von 215

Der Begriff der **Wirksamkeit** einer Barriere beschreibt deren Fähigkeit, die vorgegebenen Grenzkriterien der Gebrauchstauglichkeit einzuhalten. Die Wirksamkeit geht verloren, wenn die Tragfähigkeit und/oder Grenzkriterien der Gebrauchstauglichkeit überschritten werden.

3.2.4 Sicherheit

Sicherheit gegenüber einer Gefährdung besteht dann, wenn diese Gefährdung durch geeignete Maßnahmen unter Kontrolle gehalten oder auf ein akzeptierbar kleines Maß beschränkt wird. Eine absolute Sicherheit kann nicht erreicht werden [43].

Die Sicherheit muss sowohl gegen den Grenzzustand der Tragfähigkeit, als auch gegen den Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit nachgewiesen werden. Im Sinn eines hinreichenden Sicherheitskriteriums setzt Gebrauchstauglichkeit dabei stets Tragfähigkeit als notwendige Bedingung voraus. Beide Nachweise werden hinsichtlich ihres Sicherheitsniveaus als gleichrangig behandelt, da es beim Überschreiten der Grenzkriterien der Gebrauchstauglichkeit ebenso zu einer „Gefahr für Leib und Leben“ kommen kann, wie beim Überschreiten der Tragfähigkeit [43].

3.2.5 Richtlinien und Rechtsvorschriften für die Verwahrung von Schächten

Nachfolgend sind eine Reihe von Vorschriften und Richtlinien aufgelistet, die für das Verfüllen von Schächten existieren und folglich Eingang in die Konzeptentwicklung finden sollten:

- **Richtlinie für das Verfüllen und Abdecken von Tagesschächten** des Oberbergamtes Clausthal-Zellerfeld [39],
- **Richtlinie für das Verfüllen und Abdecken von Tagesschächten** des LOBA Nordrhein Westfalen [40],
- **TA Abfall** [30],
- **Gebirgsmechanische und geotechnische Empfehlungen und Grundsätze zur sicheren Verwahrung von Tagesschächten des Salzbergbaus im Südharz-Kalirevier** vom Institut für Gebirgsmechanik GmbH, Leipzig, [32]

BfS	Konzeptplanung der Schachtverschlüsse für die Schächte Bartensleben und Marie des ERA Morsleben	
9M/ 223 450 11/GHS/ TF/ 0001/00	Stand: 10.03.2004	Seite 50 von 215

- die **Empfehlungen des Arbeitskreises SALZMECHANIK** der Deutschen Gesellschaft für Erd- und Grundbau e.V. zur Geotechnik der Untertagedeponierung von besonders überwachungsbedürftigen Abfällen im Salzgebirge – Ablagerung in Bergwerken [47],
- die TGL 11 388/02 **Bauten unter Tage, Projektierung und Ausführung von Schutzbauten gegen Standwasser** [11]

und

- in den Sicherheitskriterien für die Endlagerung radioaktiver Abfälle in einem Bergwerk [48].

4 Zielvorstellungen und Randbedingungen

Entsprechend der in Kapitel 2 beschriebenen Vorgehensweise zur Erarbeitung der Konzeptplanung für die Schachtverschlussbauwerke des ERA Morsleben wurden nachfolgend zunächst die bergtechnischen, geologischen, hydrologischen und geotechnischen Randbedingungen für die Schächte des ERA Morsleben zusammenfassend dargestellt und diskutiert. Dies erfolgte mit dem Ziel, die aus dem Vergleich identifizierten Konstruktionsprinzipien bzw. die eingesetzten Materialien in ihrer Anwendbarkeit für Endlager im Salzgebirge und ganz besonders am Standort des ERA Morsleben beurteilen zu können.

4.1 Geologische, hydrogeologische und bergbauliche Situation an den Schächten Marie und Bartensleben

Zu dem ERA Morsleben gehören die Schachtanlagen „Bartensleben“ und „Marie“. Zwischen beiden genannten Schachtanlagen bestehen sechs Verbindungen, welche teilweise als Fluchtwege bzw. für die Wetterführung genutzt werden. In Tabelle 2 ist die historische Entwicklung der Schachtanlagen „Bartensleben“ und „Marie“ dargestellt. Das aufgefahrene Hohlraumvolumen beider Schachtanlagen beträgt insgesamt 8,7 Mio. m³ [3].

Tabelle 2 : Entwicklung der Schachtanlagen „Bartensleben“ und „Marie“

SCHACHT „BARTENSLEBEN“		SCHACHT „MARIE“	
1910 – 1912	Schachtteufung	1897 – 1898	Schachtteufung
1913 – 1955	Förderung von Kalisalzen	1900 – 1924	Förderung von Kalisalzen
1944 – 1945	Rüstungsproduktion	1937 – 1945	Rüstungsproduktion
1918 – 1969	Förderung von Steinsalz	1946 – 1951	Kali- und Steinsalzförderung
1971 – 1998	Einlagerungsbetrieb	1959 – 1984	Geflügelmast
		1987 – 1990	Einlagerung von Härtereisalz
		1991 – 1994	Verbringung von Salzhauwerk
		1996	Auslagerung von Härtereisalz

Die Schachtanlage Bartensleben-Marie liegt in der Salzstruktur der Allertalzone. Die Salzstruktur erstreckt sich von Wolfsburg im Nordwesten bis Seehausen im Südosten über etwa 50 km und ist 1,5 km bis 2 km breit. Sie wird im Südwesten von der Lappwaldscholle und im Nordosten von der Weferlinger Triasplatte begrenzt. Die Lage des Grubengebäudes und die geologischen Struktureinheiten sind in Abbildung 10 dargestellt.

Die Tagesanlagen sowie die Lage der Schächte Marie und Bartensleben sind in Anlage 2 und Anlage 3 dargestellt.

Die nachfolgenden Aussagen zur Geologie, Hydrogeologie und zur Gebirgsmechanik basieren im Wesentlichen auf den in [49] und [50] ermittelten und den in den Schachtprofilen zu den Schächten Marie und Bartensleben in [5] zusammengefassten Informationen und Kennwerten. Weitere Informationen wurden aus den Schachtgutachten [51], [52] sowie aus dem in Anlage 4 dokumentierten Schachtbefahrungsprotokoll vom 30.05.2001 und aus Berichten zur Geologie des Allertales [53] gewonnen.

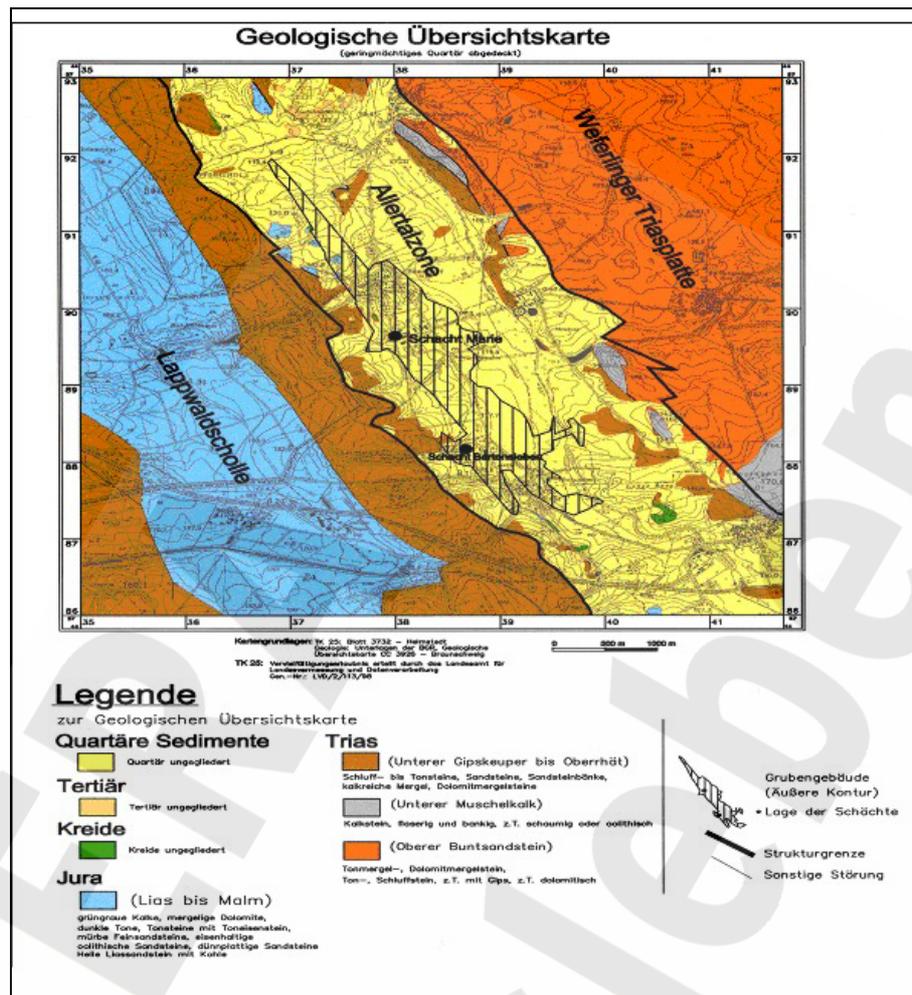


Abbildung 10: Übersicht über die lokalen geologischen Einheiten nach [53] und die Lage der Grubengebäude Marie und Bartensleben

4.1.1 Schacht Bartensleben

4.1.1.1 Geologische Situation

Die Angaben zur Geologie beziehen sich auf das in [49] und [5] zusammengefasste Datenmaterial. Ein ausführliches Schachtprofil mit den aus [5] gewonnenen Daten enthält Anlage 5. Um die weiteren Ausführungen zu verkürzen, enthält Tabelle 3 das geologische Profil des Schachtes Bartensleben mit den Kurzbeschreibungen der anstehenden Gesteine.

Tabelle 3 : Geologisches Profil Schacht Bartensleben nach [5]

Homogenbereich	Teufe ab [m]	Kurzbezeichnung	
		Lithologie	Stratigraphie
1	0,0	Schluffe und Tone	Quartär, Oberkeuper
2	8,0	Schluffstein, tonig	Oberkeuper
3	35,0	Schluffstein, tonig	Steinmergelkeuper
4	42,0	Schluffstein, tonig	
5	69,0	Tonstein und Schluffstein	oberer Gipskeuper
6	145,0	Tonstein, schluffig	
7	177,0	Feinsandsteinstörung	Schilfsandstein
8	177,2	Feinsandstein	
9	186,0	Schluffstein, feinsandig, Schluffstein, tonig	
10	237,0	Tonstein, schluffig	unterer Gipskeuper
11	254,0	Gipsstein	Hutgestein
12	273,5	Salinar	Zechstein

Das Deckgebirge des Schachtes Bartensleben besteht aus Gesteinen des Keuper, welche von gering mächtigen (2 m) quartären und oberkeuper-zeitlichen Schluff- und Tonsedimenten überlagert sind. Darunter lagert bis 35 m unter GOK geklüfteter und teilweise breccierter Schluffstein. Am Übergang zum Steinmergelkeuper ist eine ca. 0,5 m mächtige Störungszone ausgebildet, in der schichtparallele Scherflächen auftreten. Danach ist der Steinmergelkeuper bis in 69 m Teufe aufgeschlossen, der im oberen Bereich (bis 42 m) stark geklüftet und mit eingeschalteten steif-plastischen Bereichen vorliegt. Anschließend folgt bis 69 m Teufe ein ebenfalls stark geklüfteter Schluffstein, der durch lagenweise Dolomithorizonte gekennzeichnet ist. Das Einfallen dieser Schicht wächst mit zunehmender Teufe. An diese Gesteinsfolge schließt sich der obere Gipskeuper bis 177 m unter GOK an. Dieser setzt sich bis in 145 m Teufe aus Ton- und Schluffstein zusammen, in denen Gipslagen und Bereiche mit höheren

BfS	Konzeptplanung der Schachtverschlüsse für die Schächte Bartensleben und Marie des ERA Morsleben	
9M/ 223 450 11/GHS/ TF/ 0001/00	Stand: 10.03.2004	Seite 54 von 215

Dolomitgehalten eingeschaltet sind. Der darunter bis in 177 m Teufe anschließende Horizont ist im Gegensatz zum darüber liegenden Teil durch eine verstärkte Gipsneubildung auf steilstehenden Schichten gekennzeichnet. Zwischen 177,0 und 177,2 m wurde eine aus stark entfestigtem Feinsandstein bestehende Störungszone aufgeschlossen, die eine erhöhte Wasserführung zeigt. Bis 237 m unter GOK folgen die Gesteine des Schilfsandsteins, zu denen auch die o.g. Störungszone gehört. Diese Schicht wird bis in 186 m Teufe aus einem geklüfteten, fest bis mürben, schluffigen Feinsand bzw. feinsandigen Schluffstein gebildet, an die sich bis 237 m Teufe feinsandiger und toniger Schluffstein anschließt. Unter dieser Schichtabfolge folgt bis 254 m ein schluffiger, dolomitischer Tonstein, der stärkere Beanspruchung und teilweise Gipseinlagen aufweist. Das anschließend aufgeschlossene Hutgestein besitzt eine Mächtigkeit von ca. 19,5 m und reicht bis zum Salzspiegel in 273,5 m Teufe. Das Hutgestein besteht überwiegend aus feinkristallinem Gipsstein mit untergeordneten Anhydritlagen. Im Bereich des Salinars schließt der Schacht Bartensleben im Teufenbereich zwischen 273,5 m bis 305 m unter GOK eine Wechsellagerung bestehend aus Tonmittel- bis Schwadensalz, Rotem Salzton, Tonmittel- bis Schwadensalz, Rosensalz der Aller-Folge und Tonmittel- bis Schwadensalz auf. Darunter folgt bis 317 m unter GOK das Anhydritmittelsalz und bis 325 m unter GOK das Bank-/ Bändersalz. Aus den sich anschließenden Gesteinen der Staßfurt-Folge sind die Bereiche von 325 bis 340 m unter GOK, 371 bis 380 m unter GOK (Kaliflöze), sowie die Bereiche von 451 bis 453 m unter GOK und von 457 bis 460 m unter GOK (Hartsalze) besonders zu beachten.

Die Kali- und Hartsalze werden auf Grund ihrer höheren Löslichkeit bei der Festlegung möglicher Dichthorizonte ausgeschlossen bzw. finden rechnerisch keine Beachtung bei der Dimensionierung der Dichtelemente. Die steil einfallenden Anhydritschichten sind in Folge ihrer zu vermutenden Klüftigkeit als mögliche Wegsamkeiten bei der Platzierung der Dichtelemente ebenfalls zu beachten. Für eine Dichtung gegen Zuflüsse aus dem Deckgebirge eignen sich grundsätzlich die Ton- und Schluffsteinhorizonte im Bereich von 186 m bis 237 m und die darunter anschließenden Tonsteinbereiche sowie der geringmächtig ausgebildete Hutgesteinskomplex. Auch im Deckgebirge sind die verhältnismäßig steile Schichtung und der starke Störungsgrad im geologischen Aufbau bezüglich der Festlegung der Dichtbereiche zu beachten. Für eine exakte Festlegung müssen die hydrogeologischen Verhältnisse und die hydraulischen Parameter der Homogenbereiche berücksichtigt werden.

BfS	Konzeptplanung der Schachtverschlüsse für die Schächte Bartensleben und Marie des ERA Morsleben	
9M/ 223 450 11/GHS/ TF/ 0001/00	Stand: 10.03.2004	Seite 55 von 215

4.1.1.2 Hydrogeologische Situation

Die Angaben zur Hydrogeologie beziehen sich auf das in [5] und [49] zusammengefasste Datenmaterial. Die Ergebnisse zu Permeabilitätsmessungen im ungestörten Steinsalzgebirge sowie in schachtnahen Auflockerungszonen des Schachtes Marie wurden in einer Dissertation [54] zusammengefasst. Wie aus [5] hervorgeht, befinden sich die Schachtröhren des ERA Morsleben am Übergang des vom Lappwald kommenden und zur Allerniederung führenden Grundwasserstromes. Die steil stehenden Jura-Schichten am westlichen Rande des Kreidetroges werden als abflusshemmend in Richtung Aller betrachtet, so dass innerhalb der Jura-Schollen ein steilerer Gradient vermutet wird [5]. Für die konzeptionelle Planung der Schachtverschlüsse ist neben der weiträumigen Einordnung in hydrogeologische Systeme auch die direkt am jeweiligen Schacht vorgefundene Situation zu beurteilen. Dazu liegen ebenfalls Angaben vor, die nachfolgend zusammengefasst aufgeführt werden. Aus [5] und aus den Beobachtungen der Schachtbefahrung vom 30.05.2001 (Anlage 4) geht hervor, dass an zahlreichen Stellen des Schachtmauerwerkes im Schacht Bartensleben durchdringende Wasser und Nassstellen zu verzeichnen sind. Dabei liegen die Zutrittsstellen ausschließlich im Deckgebirge. In [49] ist eine Aufstellung der über insgesamt 11 Traufenrinnen gefassten und einem Pumpenbecken zugeführten Wassermengen enthalten. Die Lage der Traufenrinnen lassen dabei Rückschlüsse auf mögliche Wasserzutrittsstellen zu. In Tabelle 4 sind die Zutrittsstellen den geologischen Horizonten zugeordnet. Aus den in [49] angegebenen Wassermengen die in den jeweiligen Traufenrinnen gefasst wurden, kann der stärkste Zutritt deutlich der Schilfsandsteinzone im Teufenbereich der 10. Traufenrinne und speziell der Austrittsstelle 1.1 bei 178 m Teufe (vgl. Tabelle 4) zugeordnet werden. Dieser Zufluss wird zugleich als letzter Zutritt aus dem Deckgebirge betrachtet. Da in den vom Schacht Bartensleben durchteuften Salinarbereichen keine Zutritte auftreten [49], muss der für den Schachtverschluss zu beachtende höchstgelegene Zutritt aus dem Grubengebäude der ersten angeschlossenen Sohle bei 386,75 m Teufe (-253-m-Sohle) zugewiesen werden.

Tabelle 4 : Erfasste Zutritte im Schacht Bartensleben nach [49]

Geologische Einheit	Teufe ab	Bezeichnung
	[m]	
Unterer Oberkeuper (Schluffstein, tonig)	11	1. Traufenrinne
	19	2. Traufenrinne
	23	3. Traufenrinne
	34	4. Traufenrinne
Steinmergelkeuper (Schluffstein, tonig)	53	5. Traufenrinne
Oberer Gipskeuper (Tonstein/Schluffstein)	72	6. Traufenrinne
	145	7. Traufenrinne
Schilfsandstein (Feinsandstein, Schluffstein)	178	Austrittsstelle 1.1
	180	8. Traufenrinne
	200	9. Traufenrinne
	201	Austrittsstellen 1.2/1.3
	215	10. Traufenrinne
	216	Austrittsstelle 1.4
	232	11. Traufenrinne

Neben den erfassten Zutritten in die Schachtröhre sind die hydraulischen Eigenschaften des umgebenden Gebirges von Bedeutung. Dazu sind in [5] die hydraulischen Leitfähigkeiten zu den jeweiligen Homogenbereichen angegeben, die in Tabelle 5 zusammengefasst sind. Weiterhin enthält die Tabelle 5 die ebenfalls in [5] angegebenen Porositätswerte.

Die zusätzlich aufgeführte Dichteverteilung der zutretenden Wässer wird in [5] als Indiz für eine ausschließlich horizontal verlaufende Wasserwegsamkeit auch im Schachtnahbereich interpretiert und daraus auf eine unbedeutende Auflockerungszone geschlossen. In [49] wird die Entwicklung der Gesamtzulaufmengen seit dem Jahr 1949 dargestellt und ein abfallender Trend bis 1998 festgestellt.

Tabelle 5 : Kennwerte zur Hydrogeologie Schacht Bartensleben aus [5], [49]

Homogenbereich	Teufe ab	Grundwasserdichte	Porosität	Porosität max.	Porosität min.	Hydraulische Leitfähigkeit k(eff.)
	[m]	[g/cm ³]	[%]	[%]	[%]	[m/s]
1	0,0	1,009	10	20	5	-
2	8,0	1,005	6	15	2	3,0 * 10 ⁻⁰⁷
3	35,0	1,014	-	-	-	2,0 * 10 ⁻⁰⁸
4	42,0	1,046	6	10	1	2,2 * 10 ⁻⁰⁸
5	69,0	1,024	4	8	1	1,0 * 10 ^{-10 1)}
6	145,0	1,022	4	5	1	1,2 * 10 ⁻¹¹
7	177,0	1,026	-	-	-	4,1 * 10 ⁻⁰⁸
8	177,2	1,031	15	23	5	5,0 * 10 ⁻⁰⁹
9	186,0	1,038	7	20	1	3,6 * 10 ⁻¹⁰
10	237,0	1,083	5	15	1	1,0 * 10 ^{-10 1)}
11	254,0	1,114	2 ²⁾	4 ²⁾	1 ²⁾	5,0 * 10 ⁻¹³
			12 ³⁾	25 ³⁾	5 ³⁾	
12	273,5	-	0	0	0	2,0 * 10 ⁻¹⁴

¹⁾ Schätzwert aus [49], ²⁾ für Residualgebirge, ³⁾ für Roten Salzton

In Auswertung der in Tabelle 5 vorliegenden hydraulischen Leitfähigkeiten und unter Beachtung der Zutrittsstellen, wurden für das Deckgebirge der ab 186 m vorliegende feinsandige bis tonige Schluffstein, der schluffige Tonstein und das ab 254 m anstehende Hutgestein als Dichthorizonte für ein Dichtelement gegen zuzitzende Deckgebirgswässer festgelegt. Als Grundsatz bei der Auswahl der Dichtbereiche kann neben einer ausreichend geringen Permeabilität die Reduzierung des auf die Dichtung wirkenden Druckgradienten angeführt werden. Somit ist das Dichtelement unmittelbar (bei geeigneten Schichten) unterhalb des letzten Zuflusses zu platzieren.

Für eine Salinardichtung wurden die Steinsalzbereiche von 340 m bis 371 m und die in Wechsellagerung mit Tonstein vorliegenden Steinsalzbereiche von 273,5 m bis 305 m ausgewählt. Als weiterer Dichthorizont kann der Steinsalz-Tonstein Anhydritbereich von 305 m bis 325 m in Betracht gezogen werden. Dabei ist besonders die mögliche Klüftigkeit des Anhydrites bei einer Bemusterung der Dichthorizonte zu beachten. Die evtl. in die Dichtung einzubeziehenden Kaliflözbereiche werden bei der Dimensionierung der Dichtelemente auf Grund der

höheren Löslichkeit der Kalisalze nicht berücksichtigt. Die Eignung sämtlicher Dichtbereiche ist auch für die Salinarbereiche z.B. durch eine Bestätigung (Neuvermessung bei Aufschluss) der in den Profilen angegebenen Mächtigkeiten und durch Messungen nachzuweisen.

4.1.1.3 Geomechanische Situation

Die Angaben zur Geomechanik beziehen sich auf das in [5] und [52] zusammengefasste Datenmaterial.

Bei der Beschreibung der geomechanischen Situation im Bereich des Schachtes Bartensleben ist zwischen Deckgebirge und Salinar zu unterscheiden. Die geomechanisch relevanten Kennwerte sind in den Tabellen 6, 7 und 8 angegeben. In der Tabelle 6 sind die Dichten bzw. Überlagerungsdichten und der quantifizierte Grundspannungszustand aufgelistet. In Tabelle 7 sind die zu jedem Homogenbereich zugeordneten Elastizitätsmoduln zusammengefasst. Scher- und Festigkeitsangaben enthält Tabelle 8.

Tabelle 6 : Geomechanische Kennwerte-Grundspannungszustand aus [5]

Homogenbereich	Teufe ab [m]	Gesteinsdichte [g/cm ³]	Überlagerungsdichte [g/cm ³]	Gebirgsspannung vertikal max. [MPa]	Gebirgsspannung horizontal max. [MPa]	Gebirgsspannung horizontal min. [MPa]	Seiten-druckzahl [/]
1	0,0	2,1	2,1	0,16	0,16	0,16	1,0
2	8,0	2,2-2,3	2,2	0,77	1,15	0,92	1,2
3	35,0	-	-	-	-	-	-
4	42,0	2,4	2,3	1,60	2,70	1,90	1,4
5	69,0	2,4	2,3	3,34	5,67	4,00	1,4
6	145,0	2,4	2,3	4,07	6,92	4,89	1,4
7	177,0	-	-	-	-	-	-
8	177,2	2,3	2,3	4,27	7,27	5,13	1,3
9	186,0	2,3	2,3	-	-	-	-
10	237,0	2,4	2,3	5,84	8,18	7,01	1,2
11	254,0	2,3 bis 2,8	2,3	6,29	14,47	8,81	1,7
12	273,5	-	-	11,80	-	-	-

Bei Betrachtung der in [5] angegebenen Kennwerte (vgl. Tabelle 6) zum vorliegenden Grundspannungszustand fällt die Unterteilung der Dichten der einzelnen Homogenbereiche in Gesteins- und Überlagerungsdichten auf. Die angegebenen Spannungswerte sind als über die Homogenbereiche linear anwachsende Funktion zu verstehen, deren Maximalwert an den Schichtenden angegeben wird. Die fehlenden Angaben zu einzelnen Homogenbereichen sind auf fehlende Messungen in den entsprechenden Bereichen zurückzuführen. Für das Salinargebirge wird lediglich eine Vertikalspannung angegeben. Das Spannungsfeld im Salinargebirge ist auf Grund der viskosen Materialeigenschaften als isotrop anzusehen.

Tabelle 7 : Geomechanische Kennwerte-Elastizitätsmoduli aus [52]

Homogenbereich	Teufe ab	E-Modul	E-Modul max	E-Modul min
	[m]	[MPa]	[MPa]	[MPa]
1	0,0	-	-	-
2	8,0	-	-	-
3	35,0	-	-	-
4	42,0	414	844	169
5	69,0	3.233	9.890	793
6	145,0	3.233	9.890	793
7	177,0	-	-	-
8	177,2	-	-	-
9	186,0	-	37	34
10	237,0	448	608	300
11	254,0	14.011	-	-
12	273,5	27.500	30.000	25.000

Die in Tabelle 7 angegebenen Elastizitätsmoduln bewegen sich bei Vernachlässigung der unwahrscheinlichen und unvollständigen (ohne Mittelwertangabe) Angaben für den Homogenbereich 9 (Schluffstein, feinsandig/Schluffstein, tonig) zwischen 414 MPa (Homogenbereich 4) bis 27.000 MPa (Homogenbereich 12).

Tabelle 8 : Geomechanische Kennwerte- Scherparameter und Festigkeitsangaben aus [52]

Homogenbereich	Teufe ab	Kohäsion	Reibungswinkel	Druckfestigkeit einaxial max.	Druckfestigkeit einaxial min.
	[m]	[MPa]	[°]	[MPa]	[MPa]
1	0,0	-	-	-	-
2	8,0	-	-	-	-
3	35,0	-	-	-	-
4	42,0	0,2	11,9	0,49	0,3
5	69,0	0,43	28,3	15,95	3,8
6	145,0	0,43	28,3	15,95	3,8
7	177,0	-	-	-	-
8	177,2	-	-	-	-
9	186,0	0,07	18,6	0,23	0,15
10	237,0	0,45	6,6	1,58	0,65
11	254,0	3,18	43,9	24,2	20,2
12,0	273,5	-	-	25	20

4.1.1.4 Bergbauliche Situation

Für die Beurteilung der bergtechnischen Situation wurden neben den vom Auftraggeber zur Verfügung gestellten Unterlagen [5], [49], [52] auch auf den in Anlage 4 dokumentierten Befahrungsbericht und auf [51] zurückgegriffen, in dem ältere Befahrungsprotokolle ausführlich beschrieben und ausgewertet wurden. Der Schacht Bartensleben wird als einziehender Schacht genutzt. Er wurde in Bohr- und Sprengarbeit im Zeitraum 1910 – 1912 bis auf 526 m [5] abgeteuft und steht vollständig in Mauerwerksausbau. Die Oberkante des Schachtkopfes liegt bei + 133,8 m NN.

Am Schacht Bartensleben sind 4 Hauptsohlen angeschlagen:

- 1. Sohle 386,75 m (-253 m NN) [5], [55], [56],
- 2. Sohle 424,75 m (-291 m NN) [5], [55], [57],
- 3. Sohle 465,75 m (-332 m NN) [5], [55], [58],

BfS	Konzeptplanung der Schachtverschlüsse für die Schächte Bartensleben und Marie des ERA Morsleben	
9M/ 223 450 11/GHS/ TF/ 0001/00	Stand: 10.03.2004	Seite 61 von 215

- 4. Sohle 505,75 m (-372 m NN) [5], [55], [60],

Zwischen der 3. und 4. Sohle ist eine Zwischensohle bei 493,75 m (-365 m NN, [5], [55], [59]) angeschlagen. Der lichte Schachtdurchmesser des Schachtes Bartensleben beträgt über die gesamte Schachtteufe 5,25 m. Für die Ausbaustärken liegen in [52] je nach Teufenlage unterschiedliche Angaben vor. Auch [51] gibt teufenabhängige Ausbaustärken zwischen 37,5 cm und 62,5 cm an. In den nachfolgenden Betrachtungen wird von einer konstanten Ausbaustärke von 62,5 cm (2½ Steine) und entsprechend von einem lichten Ausbruchquerschnitt von 6,50 m ausgegangen. Der Zustand des Ausbaus wurde ausführlich in [52] begutachtet. Gefährdungen, die aus dem Ausbauzustand resultieren, wurden dabei nicht festgestellt. Auch während der Schachtbefahrung am 30.05.2001 (vgl. Anlage 4) konnten keine Mängel festgestellt werden. Durch die regelmäßig laufenden Betriebsüberwachungen ist sichergestellt, dass die vorliegende Situation realistisch beurteilt wurde. In [5] wurde in Auswertung vorliegender Berichte zu Abtast- und Injektionsmaßnahmen festgestellt, dass die bei früheren Befahrungen festgestellten Prozesse als Initial der Zerstörungen des Schachtmauerwerkes zur Ruhe gekommen sind. Auch im Vergleich mit älteren Gutachten [51] kann Übereinstimmung festgestellt werden. So wurde in [51] nach ausführlicher Auswertung von Befahrungsberichten für den Schacht Bartensleben die geologisch-hydrogeologische Situation als sehr günstig eingeschätzt und dies durch die den Salinarbereich gut abdichtenden Schichten und die fehlende Wasserzirkulation über größere Bereiche begründet. In Folge dieser günstigen Verhältnisse konnte auch auf einen sonst im Kalibergbau üblichen wasserdichten Ausbau (gusseiserne Tübbingsäule, Stahlblechzylinder, bzw. nachträglich erforderliche Vorbausäule) verzichtet werden.

4.1.2 Schacht Marie

4.1.2.1 Geologische Situation

Die Angaben zu den geologischen Verhältnissen basieren auf [5]. In [5] sind die Ergebnisse aus [50] zusammengefasst. Demnach gliedert sich das 268,8 m mächtige Deckgebirge über dem Salinargebirge am Schacht Marie in drei Homogenbereiche, deren anstehende Gesteine als Kurzbeschreibung in Tabelle 9 aufgeführt sind. In Anlage 6 ist das geologische Schachtprofil ausführlich dargestellt.

Tabelle 9 : Homogenbereiche Schacht Marie aus [5]

Homogenbereich	Teufe ab [m]	Kurzbezeichnung	
		Lithologie	Stratigraphie
1	0,0	Schluffe und Sande	Quartär
2	8,0	Schluffe/Tone bzw. Schluff-/Tonsteine	Dogger
3	176,0	Gipsstein	Hutgestein
4	268,8	Salinar	Zechstein

Die oberste Schicht des Deckgebirges am Schacht Marie wird durch 8 m mächtige quartäre Ablagerungen aus Schluffen und Sanden gebildet. Darauf folgen bis in 176 m Teufe Schluff- und Tonsteine des Doggers. In diese durch tektonische Vorgänge brecciierten Gesteine des Jura sind Linsen und Bänke von Dolomit eingelagert. An den Dogger schließt das 92,8 m mächtige Hutgestein bis zum Salzspiegel in 268,8 m Teufe an. Im Salinar schließt der Schacht Marie im Teufenbereich zwischen 268,8 m und 271,0 m Teufe zunächst das jüngere Steinsalz der Leinefolge auf. Ab 271,0 m schließt sich bis 276,0 m das Kaliflöz Staßfurt mit einem eingelagerten Anhydritmittel an. Danach wurde wiederum eine Schicht des jüngeren Steinsalzes der Leinefolge mit einer Mächtigkeit von ca. 16 m angetroffen, bevor erneut das 3 m mächtige Kaliflöz Staßfurt angefahren wurde. Ab einer Teufe von 295 m wurde bis in die Endteufe des Schachtes bei 522 m Teufe ausschließlich älteres Steinsalz der Staßfurtfolge aufgeschlossen. Der gesamte Salinarbereich wird in [5] als ein komplexer Homogenbereich (Homogenbereich 4) behandelt.

Als möglicher Dichthorizont wurde im Deckgebirge das Hutgestein festgelegt. Aber auch die unteren Bereiche des darüber liegenden Doggers (Schluffe/Tone bzw. Schluff-/Tonsteine) wurden für untergeordnete Dichtaufgaben als geeignet befunden bzw. können in die Dichtung einbezogen werden, um den am Dichtelement wirkenden hydraulischen Gradienten zu minimieren. Im Salinar beschränken die sehr salzspiegelnahen Kaliflöze mögliche Dichthorizonte im Steinsalz. Das Einfallen der Kaliflöze ist im Hinblick auf mögliche Wegsamkeiten zu beachten.

4.1.2.2 Hydrogeologische Situation

Die hydrogeologische Situation am Schacht Marie wurde in [50] untersucht. Die Ergebnisse wurden in [5] zusammengefasst. Die Ergebnisse zu Permeabilitätsmessungen im ungestörten Gebirge sowie in schachtnahen Auflockerungszonen des Steinsalzes wurden in einer Dissertation [54] zusammengefasst. Als weitere Informationsquelle steht der Bericht über eine Schachtbefahrung am 30.05.2001, der in Anlage 4 aufgeführt ist, zur Verfügung. In [50] erfolgt eine detaillierte Auswertung der Zuflüsse die in insgesamt acht Traufenrinnen und 3 Austrittsstellen im Bereich des Deckgebirges gefasst werden. In [50] wurden dabei neben den Traufenrinnen weitere Zutrittsstellen in die Auswertungen einbezogen. In Tabelle 10 sind die Zutrittsstellen den geologischen Horizonten zugeordnet.

Tabelle 10 : Erfasste Zutritte im Schacht Marie nach [50]

Geologische Einheit	Teufe [m unter GOK]	Bezeichnung
DOGGER (Schluffe/Tone bzw. Schluff- /Tonsteine)	10	1. Traufenrinne
	23	2. Traufenrinne
	39	3. Traufenrinne
	55	4. Traufenrinne
	76	5. Traufenrinne
	78	3. Austrittsstelle
	103	6. Traufenrinne
	129	5. Austrittsstelle
	140	6. Austrittsstelle
	148	7. Traufenrinne
	160	8. Traufenrinne
SALINAR	281	8. Austrittsstelle

Aus der in [50] erfolgten Aufspaltung der mittleren Zulaufmengen auf die jeweiligen Traufenrinnen und Austrittsstellen geht eindeutig als Hauptzutrittsstelle der Zutritt bei 129 m Teufe mit einem Volumenstrom von ca. 10 l/min hervor. Abgesehen von einer Nassstelle bei 281 m Teufe (Salinarbereich) liegen ab der Hauptzutrittsstelle keine weiteren Zuflüsse vor. Auf Grund äußerst geringer Zutrittsmengen bei 281 m Teufe, kann diese Nassstelle vernachlässigt

werden [50]. Des Weiteren geht aus [50] hervor, dass während der Abteufarbeiten keinerlei Zutritte in diesem Teufenbereich registriert wurden. Der Zutritt bei 129 m Teufe gilt somit als letzter Zutritt aus dem Deckgebirge. Da im Salinarbereich des Schachtes Marie, abgesehen von der o.g. Nassstelle bei 281 m keine weiteren Zutritte bekannt sind, ist die erste an den Schacht angeschlossene Sohle bei 352,53 m Teufe die letzte bzw. höchstgelegene Zutrittsstelle aus dem Grubengebäude. Die oberhalb liegende 310-m-Sohle mit Anschluss an die Korkenzieherwendel besitzt keine direkte Verbindung zum übrigen Grubengebäude [61], [62]. In Tabelle 11 sind die hydraulischen Leitfähigkeiten und Porositäten, wie sie in [5] angegeben werden, aufgeführt.

Tabelle 11 : Kennwerte zur Hydrogeologie Schacht Marie aus [5]

Homogenbereich	Teufe ab	Grundwas-serdichte	Porosität Mittelwert	Porosität max.	Porosität min.	Hydraulische Leitfähigkeit k(eff.)
	[m]	[g/cm ³]	[%]	[%]	[%]	[m/s]
1	0,0	1,000	25	30	10	-
2	8,0	1,001	8	20	2	2,1 * 10 ⁻⁹
3	176,0	1,078	3	5	1	4,5 * 10 ⁻¹¹
4	271,0	-	0	0	0	2,0 * 10 ⁻¹⁴

Aus Tabelle 11 ist ersichtlich, dass der mit einer hydraulischen Leitfähigkeit von $k = 4,5 \cdot 10^{-11} \text{ m/s}$ angegebene Hutgesteinskomplex, der eine Mächtigkeit von 95 m aufweist, einen guten und ausreichend mächtigen Dichthorizont gegen Zuflüsse aus dem Deckgebirge darstellt. Bei der Nachweisführung ist u.U. der über dem Hutgestein liegende Dogger-Horizont bis zur letzten Zutrittstelle bei 129 m Teufe in die Dichtungsbereiche einzubeziehen, um die hydraulische Belastung auf das Dichtelement zu minimieren. Für die im Salinar einzubringende Dichtung gegen den Aufstieg salinärer Lösungen aus dem Grubengebäude ist die Lage der im Schacht angefahrenen Kaliflözhorizonte zu beachten. Auf Grund der erhöhten Löslichkeit von Kalisalzen werden diese Bereiche als Dichtbereiche ausgeschlossen bzw. bleiben bei der Dimensionierung der Dichtelementgeometrie unberücksichtigt. Die vorliegenden Steinsalzbereiche zwischen der 310-m-Sohle und 353-m-Sohle eignen sich als Dichthorizont für eine Salinardichtung.

4.1.2.3 Geomechanische Situation

Die Angaben zur Geomechanik beziehen sich auf das in [5] und [52] zusammengefasste Datenmaterial. Bei der Beschreibung der geomechanischen Situation im Bereich des Schachtes Marie ist zwischen Deckgebirge und Salinar zu unterscheiden. Die geomechanischen relevanten Kennwerte sind in den Tabellen 12, 13 und 14 angegeben. In der Tabelle 12 sind die Dichten bzw. Überlagerungsdichten und der quantifizierte Grundspannungszustand aufgelistet. In Tabelle 13 sind die zu jedem Homogenbereich zugeordneten Elastizitätsmoduln zusammengefasst. Scher- und Festigkeitsangaben enthält Tabelle 14.

Tabelle 12 : Geomechanische Kennwerte-Grundspannungszustand aus [52]

Homogenbereich	Teufe ab	Gesteinsdichte	Überlagerungsdichte	Gebirgsspannung vertikal max.	Gebirgsspannung horizontal max.	Gebirgsspannung horizontal min.	Seiten-druckzahl
	[m]	[g/cm ³]	[g/cm ³]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[/]
1	0,0	1,7	1,6	0,16	0,16	0,16	1,00
2	8,0	2,2 bis 2,6	1,8 bis 2,4	4,20	10,10	6,30	1,60
3	176,0	2,3 bis 2,8	2,3	6,50	20,60	11,60	1,80
4	271,0	-	-	12,00	-	-	-

Bei Betrachtung der in [5] angegebenen Kennwerte (vgl. Tabelle 12) zum vorliegenden Grundspannungszustand fällt die Unterteilung der Dichten der einzelnen Homogenbereiche in Gesteins- und Überlagerungsdichten auf. Die angegebenen Spannungswerte sind als über die Homogenbereiche linear anwachsende Funktion zu verstehen, deren Maximalwert an den Schichtenden angegeben wird. Die fehlenden Angaben zu einzelnen Homogenbereichen sind auf fehlende Messungen in den entsprechenden Bereichen zurückzuführen. Für das Salinargebirge wird lediglich eine Vertikalspannung angegeben. Das Spannungsfeld im Salinargebirge ist auf Grund der viskosen Materialeigenschaften als isotrop anzusehen. Die in Tabelle 13 angegebenen Elastizitätsmoduln bewegen sich zwischen 560 MPa (Homogenbereich 2) bis 27.500 MPa (Homogenbereich 4).

Tabelle 13 : Geomechanische Kennwerte-Elastizitätsmoduli aus [52]

Homogenbereich	Teufe ab	E-Modul	E-Modul max.	E-Modul min.
	[m]	[MPa]	[MPa]	[MPa]
1	0,0	-	-	-
2	8,0	560	1.400	320
3	176,0	14.000	11.700	16.900
4	271,0	27.500	30.000	25.000

Tabelle 14 : Geomechanische Kennwerte-Scherparameter und Festigkeitsangaben aus [52]

Homogenbereich	Teufe ab	Kohäsion	Reibungswinkel	Druckfestigkeit einaxial max	Druckfestigkeit einaxial min	Druckfestigkeit triaxial max	Druckfestigkeit triaxial min
	[m]	[MPa]	[°]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]
1	0,0	-	-	-	-	-	-
2	8,0	1,0*	17,2*	3,3	1,0	8,3	1,5
3	176,0	3,2	43,9	24,2	20,2	54,6	42,8
4	271,0	-	-	25,0	20,0	-	-

* Mittelwert

4.1.2.4 Bergbauliche Situation

Für die Beurteilung der bergtechnischen Situation wurde neben den vom Auftraggeber zur Verfügung gestellten Unterlagen [5], [52] in erster Linie auf den in Anlage 4 dokumentierten Befahrungsbericht und auf [51] zurückgegriffen, in dem ältere Befahrungsprotokolle ausführlich ausgewertet sind.

Der Schacht Marie wird als ausziehender Schacht genutzt. Er wurde in Bohr- und Sprengarbeit im Zeitraum 1897 – 1898 bis 370 m Teufe und in einer 2. Phase (1907 - 1909) bis auf 522 m geteuft und steht bis in ca. 400 m Teufe in einem Mauerwerksausbau. Ab ca. 400 m steht der Schacht ohne Ausbau. Es wird angenommen und in [51] begründet, dass auch der untere Schachtabschnitt ursprünglich ausgebaut war. Bei der Befahrung am 30.05.2001 (vgl. Anlage 4) konnte die Oberfläche des durch den abgerissenen Ausbau entstandenen Schüttkegels ab ca. 450 m Teufe beobachtet werden (vgl. Anlage 4). Zum Zeitpunkt des

BfS	Konzeptplanung der Schachtverschlüsse für die Schächte Bartensleben und Marie des ERA Morsleben	
9M/ 223 450 11/GHS/ TF/ 0001/00	Stand: 10.03.2004	Seite 67 von 215

Ausbauabrisses liegen keine Angaben vor. Der Schacht Marie steht bis ca. 500 m Teufe unter Lösung. Die bei der Befahrung (Anlage 4) angegebenen Flüssigkeitsmengen (20.000 bis 30.000 m³) resultieren aus Wetterlösungen, Spritzwässern in Folge der früher im Grubenbereich Marie durchgeführten Hühnermast und aus den Zutritten über das Schachtmauerwerk. Die Oberkante des Schachtkopfes liegt bei +129,1 m NN [5].

Am Schacht Marie sind 2 Hauptsohlen angeschlagen:

- 1. Sohle 360,00 m (-231 m NN) [5], [63], [64]
- 2. Sohle 500,00 m (-372 m NN) [5], [63], [65].

Ein zusätzlicher Zugang zum Schacht befindet sich in 310 m (-185 m NN, [5], [63]) Teufe. Diese Zwischensohle diente dem salzspiegelnahen Abbau in der *Korkenzieherwendel*. Dieser Grubenbau wurde schachtaufwärts ab der 310-m-Sohle bis ca. 20 m unterhalb des Salzspiegels (268,80 m) um den Schacht Marie gewandelt aufgefahren. Dieser Abbau besitzt keine direkte Verbindung zum übrigen Grubengebäude. Zusätzlich befinden sich Zwischensohlen bei ca. 353 m Teufe (-225 m NN, [63], [66]) und bei 397 m (-253 m NN, [5], [67]) Teufe. Der lichte Schachtdurchmesser des Schachtes Marie beträgt über die gesamte Schachtteufe 5,25 m. Für die Ausbaustärken liegen in [52] je nach Teufenlage unterschiedliche Angaben vor.

Auch [51] gibt teufenabhängig Ausbaustärken zwischen 37,5 cm und 62,5 cm an. In den nachfolgenden Betrachtungen wird von einer konstanten Ausbaustärke von 62,5 cm (2 ½ Steine) und entsprechend von einem lichten Ausbruchquerschnitt von 6,50 m ausgegangen. Der Zustand des Ausbaus wurde ausführlich in [52] begutachtet. Gefährdungen, die aus dem Ausbauzustand resultieren, wurden dabei nicht festgestellt. Auch während der Schachtbefahrung am 30.05.2001 (vgl. Anlage 4) konnten keine Mängel festgestellt werden. Durch die regelmäßig laufenden Betriebsüberwachungen ist sichergestellt, dass die vorliegende Situation realistisch beurteilt wurde und erhalten bleibt. In [5] wurde in Auswertung vorliegender Berichte zu Abtast- und Injektionsmaßnahmen festgestellt, dass die bei älteren Befahrungen festgestellten Prozesse als Initial der Zerstörungen des Schachtmauerwerkes zur Ruhe gekommen sind. Auch im Vergleich mit älteren Gutachten [51] kann Übereinstimmung festgestellt werden. So wurde in [51] nach ausführlicher Auswertung der Abteufberichte für den Schacht Marie die geologisch-hydrogeologische Situation als sehr günstig eingeschätzt

BfS	Konzeptplanung der Schachtverschlüsse für die Schächte Bartensleben und Marie des ERA Morsleben	
9M/ 223 450 11/GHS/ TF/ 0001/00	Stand: 10.03.2004	Seite 68 von 215

und dies durch die den Salinarbereich gut abdichtenden Schichten und die fehlende Wasserzirkulation über größere Bereiche begründet. In Folge dieser günstigen Verhältnisse konnte auch beim Schacht Marie auf einen sonst im Kalibergbau üblichen wasserdichten Ausbau (gusseiserne Tübbingsäule, Stahlblechzylinder, bzw. nachträglich erforderliche Vorbausäule) verzichtet werden. Für die konzeptionelle Planung des Schachtverschlusses Marie sind im Vergleich zum Schacht Bartensleben die nachfolgend zusammengefassten, zusätzlichen Randbedingungen zu beachten:

- Salzspiegelnahe Abbau in der *Korkenzieherwendel*,
- Abgerissener und verstürzter Schachtausbau im Schachtsumpf,
- Anstehende Lauge ab 500 m Teufe (2. Sohle).

Wesentliche Unterschiede zwischen beiden Schachtröhren sind vor allem hinsichtlich des Deckgebirges zu bemerken. Während das Salinar im Bereich des Schachtes Marie von einem relativ einfach strukturierten, aus drei Homogenbereichen (Quartär, Dogger, Hutgestein) bestehenden postsalinaren Gebirge überdeckt wird, werden die den Salinarbereich des Schachtes Bartensleben überlagernden Schichten (Quartär, Keuper, Hut) durch eine entfestigte und wasserführende Feinsandzone unterbrochen. Bezüglich der Mächtigkeiten der einzelnen Homogenbereiche ist die unterschiedliche Ausprägung des Hutgesteins auffällig. Das Hutgestein im Bereich des Schachtes Marie ist ca. 94 m mächtig. Dagegen im Bereich des Schachtes Bartensleben nur ca. 20 m.

4.2 Zielvorgaben und Randbedingungen aus dem Stilllegungskonzept

Die Zielvorgaben für die Nachweisführung leiteten sich aus dem Stilllegungskonzept des ERA Morsleben ab. Eine dafür erstellte Szenarienanalyse unterscheidet zwischen der ungestörten Entwicklung des Endlagers und einer als Folge des Ersaufens gestörten Entwicklung des Endlagers.

Daraus leiten sich Stilllegungsmaßnahmen für das ERA Morsleben ab, die

- die weitgehende Hohlraumverfüllung des Grubengebäudes,
- die Errichtung von Abdichtungen in Strecken

BfS	Konzeptplanung der Schachtverschlüsse für die Schächte Bartensleben und Marie des ERA Morsleben	
9M/ 223 450 11/GHS/ TF/ 0001/00	Stand: 10.03.2004	Seite 69 von 215

sowie

- die Errichtung von Schachtverschlussbauwerken

umfassen [3], wobei die Abdichtungsbauwerke wesentliche Bedeutung für das Erreichen der Verwahrungsziele besitzen.

An das Abdichtungssystem der Schächte (Schachtverschlusssysteme) werden zwei spezifische Anforderungen gestellt, die einmal

- eine Abdichtung der Schächte gegenüber **Zutritten von Lösungen aus dem Deckgebirge** in das Grubengebäude

sowie zum anderen auch

- eine Abdichtung der Schächte gegenüber dem **Auspressen von Lösungen aus dem Grubengebäude** infolge auflaufender Konvergenz bzw. Gasbildung in die Biosphäre

umfassen.

Der für eine Abdichtung zu berücksichtigende Gesamtvolumenstrom setzt sich aus folgenden Teilvolumenströmen zusammen (vgl. Abbildung 3):

- dem Volumenstrom durch das Dichtelement,
- dem Volumenstrom durch die Kontaktzone zwischen Dichtelement und Gebirge

und

- dem Volumenstrom durch den aufgelockerten ausbruchsnahen Gebirgsbereich.

Im ingenieurtechnischen Sinne wird *Dichtheit* des Schachtverschlusssystems durch einen Grenzvolumenstrom $< 2 \text{ m}^3/\text{a}^2$ definiert, wodurch das Gebrauchstauglichkeitskriterium für die Schachtverschlussbauwerke festgelegt ist. Die Gebrauchstauglichkeit muss für einen Betrachtungszeitraum von 30.000 Jahren erfüllt sein, woraus sich der minimale Zeitraum für die Nachweisführung ableitet.

Aus dem Stilllegungskonzept [3] folgt ferner, dass im Falle von Wasserzuflüssen aus dem Deckgebirge in das Grubengebäude zunächst ungesättigte Lösungen mit den anstehenden Gesteinen in Wechselwirkung treten, was Lösungsprozesse im Grubengebäude sowohl an

² Dieser Grenzvolumenstrom dient als abgeschätzter Bemessungswert und entspricht nicht dem späteren tatsächlichen Zutritt, der wesentlich geringer sein wird.

BfS	Konzeptplanung der Schachtverschlüsse für die Schächte Bartensleben und Marie des ERA Morsleben	
9M/ 223 450 11/GHS/ TF/ 0001/00	Stand: 10.03.2004	Seite 70 von 215

den anstehenden Steinsalzen als auch an den aufgeschlossenen Kalisalzen erwarten lässt. Als Folge der Fluid-Gesteins-Wechselwirkung bilden sich Salzlösungen, deren chemische Zusammensetzung von verschiedenen Lösungspfaden bestimmt wird und daher heute nicht prognostiziert werden kann. Grundsätzlich denkbar sind gesättigte NaCl-Lösungen, die sich in der Folge an K- und Mg-Salzen anreichern und letztlich eine Zusammensetzung erreichen werden, die der des invarianten Punktes 21 (IP21) im hexären System der ozeanischen Salze [68] entsprechen wird.

Die wichtigsten Ziele der Stilllegungsmaßnahmen innerhalb des Grubengebäudes sind

- die Abdichtung der Einlagerungsbereiche gegenüber den anderen untertägigen Hohlräumen,
- die Verringerung der Hohlraumvolumina

und

- die Ertüchtigung des Gebirges.

Als Baustoff für die Abdichtungen wurden Salzbeton mit der spezifischen Rezeptur M2 entwickelt [3], [69], der durch seine mechanischen und thermodynamischen Eigenschaften [69], [70] sowie seine hydraulischen Parameter [72] für diesen Einsatz vorgesehen ist. Untersuchungen (Kaskadenversuche) zum Korrosionsverhalten dieser Baustoffe unter Einwirkung von Salzlösungen zeigen, dass sie über längere Zeiträume (Dauer unter den hier gegebenen Randbedingungen einige 10.000 Jahre) gegenüber Lösungen mit einer Zusammensetzung, die der des invarianten Punktes 21 (IP21) im hexären System der ozeanischen Salze [68] entspricht, nicht frei von Korrosion sind [72], was zusammenfassend in folgender Weise referiert wird:

„Diese Untersuchungen am Salzbeton zeigten, dass es in Mg-reichen Lösungen (IP21) zu einer Konzentrationserhöhung des Ca in der Lösung kommt; die Zementphasen (C-S-H)³ werden aufgelöst.“ ([72] 2, Seite II)

³ CaO-SiO₂-H₂O

BfS	Konzeptplanung der Schachtverschlüsse für die Schächte Bartensleben und Marie des ERA Morsleben	
9M/ 223 450 11/GHS/ TF/ 0001/00	Stand: 10.03.2004	Seite 71 von 215

Die mit der Korrosion verbundenen chemischen Veränderungen des Salzbetons beeinflussen langfristig auch die Zusammensetzung der als Reaktionsprodukte entstehenden Fluida, in denen dann neben Na-K-Mg-Ca-SO₄-Cl und H₂O auch gelöste Zementphasen zu erwarten sind.

Diese chemische Veränderung der auf die Schachtverschlussbauwerke möglicherweise einwirkenden Salzlösungen beeinflusste die Auswahl geeigneter Baumaterialien für die Schachtverschlüsse erheblich und hatte damit auch unmittelbar Konsequenzen auf die Nachweisführung.

5 Sicherheitskonzept mit integrierter Nachweisführung als Grundlage der Planungskonzeption

5.1 Allgemeine Überlegungen zum Sicherheitskonzept und zu den Nachweisführungen für die Schachtverschlusssysteme des ERA Morsleben

Ausgehend von den in Kapitel 3.2 erläuterten Begriffsdefinitionen, wie sie in einschlägigen Regelwerken und Normen Verwendung finden, war es notwendig, die Aufgabenstellung für das Sicherheits- und Nachweiskonzept unter Berücksichtigung der Zielstellungen für die Konzeptplanung der Schachtverschlussbauwerke des ERA Morsleben zu präzisieren.

Abweichend von herkömmlichen ingenieurtechnischen Aufgabenstellungen ist die Dauerhaftigkeit der Schachtverschlussbauwerke für sehr lange Zeiträume gefordert. Dieser Betrachtungszeitraum für die Nachweisführung von 30.000 Jahren kommt der Zeitdimension geologischer Prozessabläufe nahe, was zwangsläufig die Nutzung konventioneller numerischer Modellrechnungen bei der Nachweisführung einschränkte und eine Einbeziehung des geowissenschaftlichen Methodeninventars erforderte. Letztlich war dieser Zeitmaßstab auch Ursache dafür, dass das hier vorgestellte Konzept eine Nachweisführung in Form von drei unabhängigen Teilen favorisierte.

Zunächst wurden die Schutzziele sowie die Anforderungen an die Schachtverschlüsse definiert. Danach wurden in einer Gefährdungs- und Einwirkungsanalyse alle theoretisch innerhalb der o.g. Zeitspanne möglichen Leit- und Begleitgefahren ermittelt und zu Gefährdungsbildern zusammengestellt. Auf der Basis dieser Gefährdungsbilder wurden

BfS	Konzeptplanung der Schachtverschlüsse für die Schächte Bartensleben und Marie des ERA Morsleben	
9M/ 223 450 11/GHS/ TF/ 0001/00	Stand: 10.03.2004	Seite 72 von 215

Konstruktionsprinzipien/ -regeln als Grundlage der Grundkonzepte für die Bauwerksentwürfe der Schächte abgeleitet. Für diese Bauwerksentwürfe wurden anschließend die **Nachweise der (1) Tragfähigkeit** und **(2) Gebrauchstauglichkeit** geführt. Zusätzlich zu diesen Nachweisen wurde unter Beachtung natürlicher und historischer Analoga bzw. unter Ansatz chemisch-mineralogischer Modellierungsergebnisse der **(3) Nachweis der Langzeitbeständigkeit der eingesetzten Materialien** erbracht. Diese Art der Nachweisführung stellt eine Kombination aus den aus verschiedenen Regelwerken abgeleiteten Grundelementen dar. So wurde beispielsweise die Idee der Ermittlung von Einwirkungen und Gefährdungen und die Zusammenstellung von Gefährdungsbildern aus dem Normenwerk der SIA entnommen, während die Definitionen zur Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit dem Eurocode 1 [43] entstammen. Die Dauerhaftigkeit, die durch die lange Nutzungsdauer des Bauwerkes besonders an Bedeutung gewann, wurde gesondert betrachtet. Zum einen geschah das durch die Vorgehensweise bei der Ermittlung der Einwirkungen und Gefährdungen unter den Aspekten von langfristig möglichen Zuständen (Betrachtung möglicher Endzustände) und zum anderen durch die Einführung eines zusätzlichen Nachweises der Langzeitbeständigkeit der einzusetzenden Materialien. Diese abweichende Art der Nachweisführung, bei der verschiedene Aspekte aus dem natürlichen Umfeld und technisch-konstruktive Gesichtspunkte in ein geotechnisches Gesamtmodell zu überführen waren, erwies sich als zielführend, da die Schachtverschlussbauwerke des Endlagers während der äußerst langen Nachbetriebsphase in vielfältiger Interaktion mit ihrem Umfeld stehen. Des Weiteren galt es zu beachten, dass das natürliche Umfeld während dieses Zeitraums veränderlich ist, was die Berücksichtigung weiterer Szenarien notwendig machte. Nicht zuletzt erforderte die Gewährleistung eines im Vergleich zu herkömmlichen Ingenieurbauwerken überdurchschnittlich hohen Sicherheitsniveaus, ein den Anforderungen entsprechend strukturiertes Vorgehen.

5.2 Das Sicherheitskonzept mit integrierter Nachweisführung

Die vorab erläuterte Vorgehensweise führte zu einem umfassenden Sicherheitskonzept, in dem die Nachweisführung integraler Bestandteil ist. In Abbildung 11 ist das vorgeschlagene Sicherheitskonzept mit der integrierten Nachweisführung schematisch dargestellt.

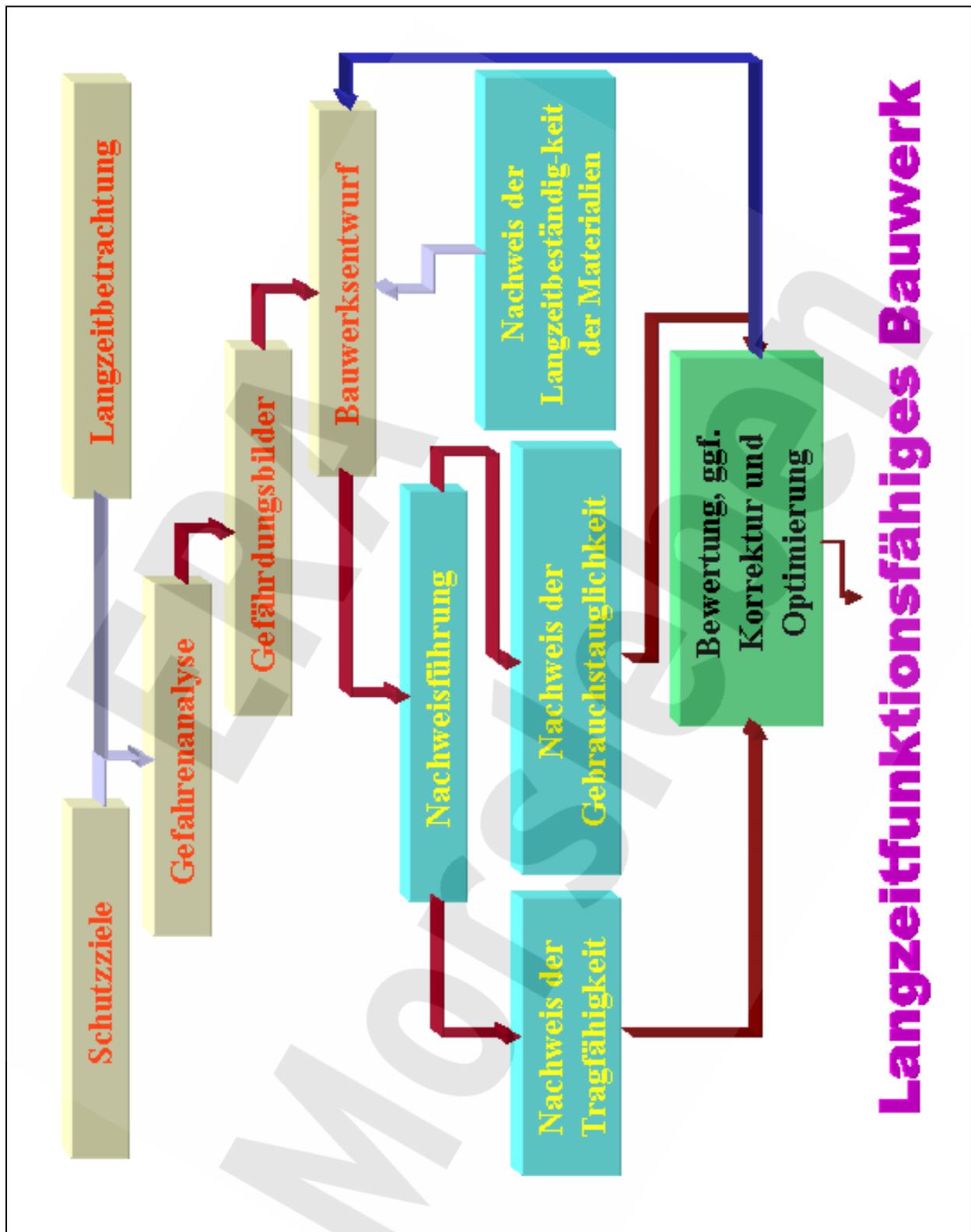


Abbildung 11: Schematische Darstellung des vorgeschlagenen Sicherheitskonzeptes mit integrierter Nachweisführung

BfS	Konzeptplanung der Schachtverschlüsse für die Schächte Bartensleben und Marie des ERA Morsleben	
9M/ 223 450 11/GHS/ TF/ 0001/00	Stand: 10.03.2004	Seite 74 von 215

Die Erarbeitung der Bauwerksentwürfe für die Schachtverschlusssysteme erfolgte dabei schrittweise, wobei die folgende vierstufige Vorgehensweise gewählt wurde:

- Stufe 1: Erfassung der Schutzziele und Quantifizierung der Anforderungen an die Schachtverschlusssysteme,
- Stufe 2: Erfassung und Analyse möglicher Gefährdungen und Einwirkungen,
- Stufe 3: Entwicklung von Gefährdungs- bzw. Einwirkungskombinationen und Ableitung von Gefährdungsbildern,
- Stufe 4: Ableitung von Konstruktionsprinzipien/ -regeln als Grundlagen für die Grundkonzepte der späteren Bauwerksentwürfe und Auswahl der Schachtverschlussmaterialien.

Im Kapitel 6 wurden die abgeleiteten Grundkonzepte auf die spezifischen Bedingungen der Schächte Marie und Bartensleben übertragen und somit Bauwerksentwürfe für die genannten Schächte abgeleitet. In der sich anschließenden Bearbeitungsstufe erfolgte die Nachweisführungen hinsichtlich der Langzeitstabilität der Schachtverschlussmaterialien, der Tragfähigkeit und der Gebrauchstauglichkeit der Verschlusssysteme.

5.2.1 Schutzziele und Anforderungen an das Verschlussbauwerk

Wie bereits in Kapitel 4.2 beschrieben, wurden bereits im Rahmen des Stilllegungskonzepts für das ERA Morsleben die nachfolgenden Anforderungen hinsichtlich des zulässigen Volumenstroms in die und aus der Grube sowie zum geforderten Nachweiszeitraum abgeschätzt.

- Der Volumenstrom von Salzlösungen durch die Schachtverfüllung darf (insbesondere im Schacht Bartensleben) den Betrag von 2 m³/a (Bemessungswert) nicht überschreiten

und

- die Schachtverschlüsse müssen diese Anforderung für mindestens 30.000 Jahre gewährleisten.

Die Einhaltung der formulierten Ansprüche zieht eine Reihe weiterer Anforderungen nach sich, wie bspw. die Gewährleistung der Tragfähigkeit der Füllsäule oder die Beachtung der

BfS	Konzeptplanung der Schachtverschlüsse für die Schächte Bartensleben und Marie des ERA Morsleben	
9M/ 223 450 11/GHS/ TF/ 0001/00	Stand: 10.03.2004	Seite 75 von 215

Durchströmung von Kontakt- und aufgelockerter Zone. Als eine der wesentlichsten Anforderungen ist die Langzeitbeständigkeit der eingesetzten Materialien aufzuführen.

5.2.2 Gefährdungs- & Einwirkungsanalyse

Ziel der Gefährdungs- und Einwirkungsanalyse war die möglichst vollständige Erfassung aller theoretisch möglichen Gefährdungen/Einwirkungen auf das Bauwerk. Dem Langzeitcharakter Rechnung tragend, musste im Fall der Schachtverschlussbauwerke für das ERA Morsleben zu jeder Gefährdung bzw. Einwirkung auch deren zeitliche Entwicklung bzw. deren Endzustand betrachtet werden. Für das vollständige Erfassen von Gefährdungen und Einwirkungen wurde ein kategorisches Vorgehen als zweckmäßig erachtet.

5.2.2.1 Nutzungsplan der Schachtverschlüsse

Um die vollständige Erfassung aller Gefährdungen/Einwirkungen auf die Schachtverschlüsse zu gewährleisten, mussten diese zu unterschiedlichen Zeitpunkten innerhalb der vorgegebenen Bauwerksnutzungsdauer betrachtet werden. Die Grundlage hierfür bildet der Nutzungsplan eines Bauwerkes [18], [42], d.h. der **Nutzungsplan der Schachtverschlüsse**. Der Nutzungsplan beinhaltet nach [42] für die projektierenden Ingenieure die Aufgabenstellung. In ihm wurden den jeweiligen Nutzungsphasen des Bauwerkes bestimmte Gebrauchsfähigkeitsziele zugeordnet.

In Abbildung 12 ist der Nutzungsplan für die Schachtverschlussbauwerke des ERA Morsleben abgebildet. Danach konnten für die Schachtverschlüsse zwei unterschiedliche Nutzungsphasen abgeleitet werden:

- die Herstellung der Schachtverschlüsse
- und
- der langzeitsichere Einschluss der radioaktiven Abfälle gegen die Biosphäre.

Der Errichtungsphase der Schachtverschlüsse konnten keine direkten Gebrauchsfähigkeitsziele zugeordnet werden. Es ist aber darauf zu achten, dass bei der Herstellung der Schachtverschlussysteme streng nach einem zu erstellenden Qualitätssicherungsprogramm

vorzugehen ist. Die Gebrauchsfähigkeitsziele für die zweite Nutzungsphase leiteten sich aus den übergeordneten Schutzziele (vgl. Punkt 5.2.1) ab.

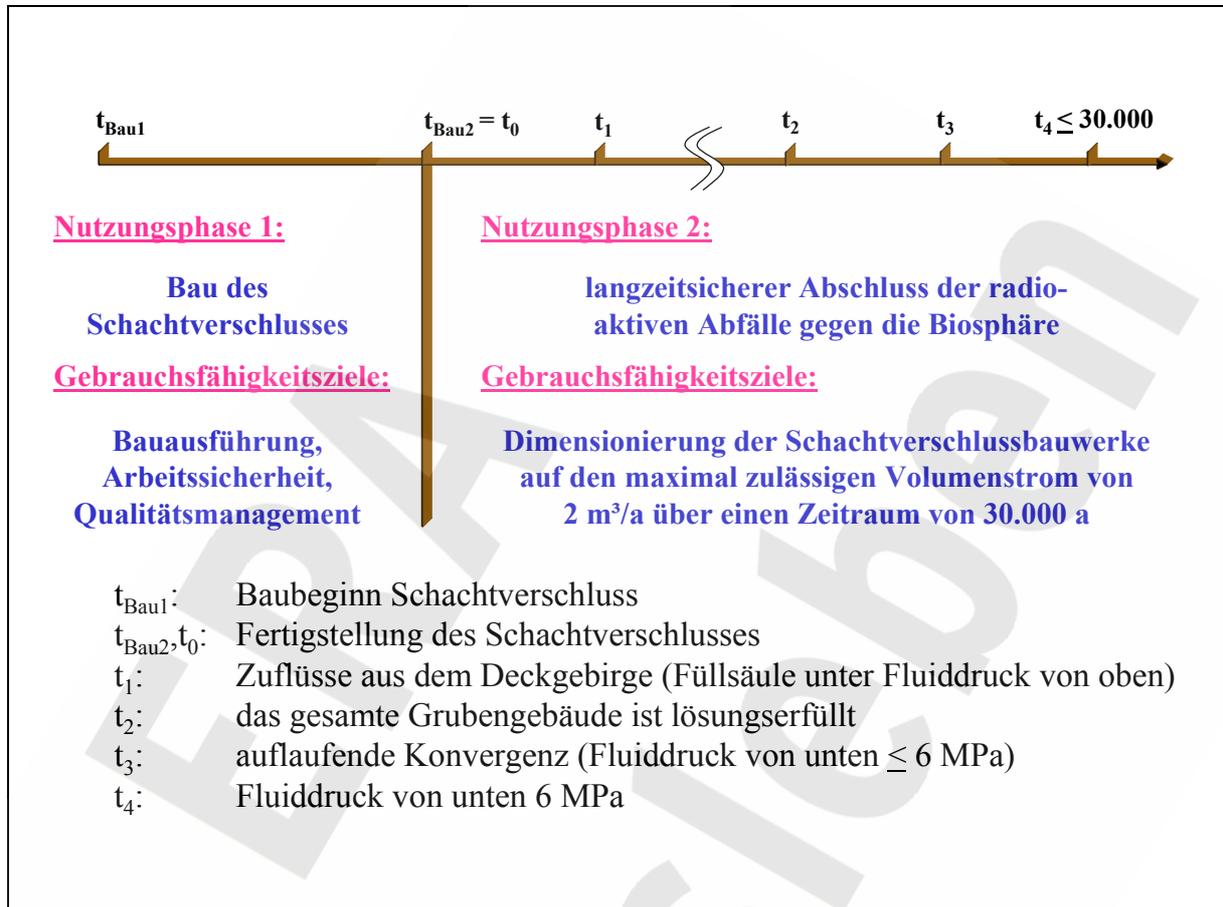


Abbildung 12: Nutzungsplan der Schachtverschlüsse des ERA Morsleben

5.2.2.2 Vorgehensweise zur Erfassung möglicher Gefährdungen und Einwirkungen

Die Unterteilung der Gefährdungen/Einwirkungen nach der zeitlichen Veränderung wurde nach [43] wie folgt vorgenommen:

- ständige Gefährdungen/Einwirkungen,
- veränderliche Gefährdungen/Einwirkungen

sowie

- außergewöhnliche Gefährdungen/Einwirkungen.

BfS	Konzeptplanung der Schachtverschlüsse für die Schächte Bartensleben und Marie des ERA Morsleben	
9M/ 223 450 11/GHS/ TF/ 0001/00	Stand: 10.03.2004	Seite 77 von 215

Unter einer **ständigen Gefährdung/Einwirkung** wird eine Einwirkung verstanden, welche während einer vorgegebenen Bemessungsdauer wirkt und deren zeitliche Größenänderung gegenüber dem Mittelwert vernachlässigbar ist, oder für die die Änderung immer in der gleichen Richtung (gleichmäßig) stattfindet, bis die Einwirkung einen Grenzwert erreicht [43].

Veränderliche Gefährdungen/Einwirkungen sind Einwirkungen, von denen nicht vorausgesetzt werden kann, dass sie dauernd während einer vorgesehenen Bemessungssituation wirken oder deren zeitliche Größenänderung gegenüber dem Mittelwert nicht vernachlässigbar ist, oder für die die Änderung nicht immer in der gleichen Richtung abläuft [43].

Außergewöhnliche Gefährdungen/Einwirkungen sind Einwirkungen, die gewöhnlich von kurzer Dauer, mit merklicher Größenänderung innerhalb des betrachteten Zeitraums während der geplanten Nutzungsdauer nicht auftreten [43].

Gefährdungen/Einwirkungen für die Schachtverschlussbauwerke können resultieren aus:

- der Nutzung des Bauwerkes,
- der natürlichen Umgebung des Bauwerkes,
- der konstruktiven Gestaltung des Bauwerkes

sowie aus

- menschlichen Fehlhandlungen.

In der Übersicht in Abbildung 13 ist die Vorgehensweise zur Erfassung aller auf die Schachtverschlüsse wirkenden Gefährdungen/ Einwirkungen dargestellt.

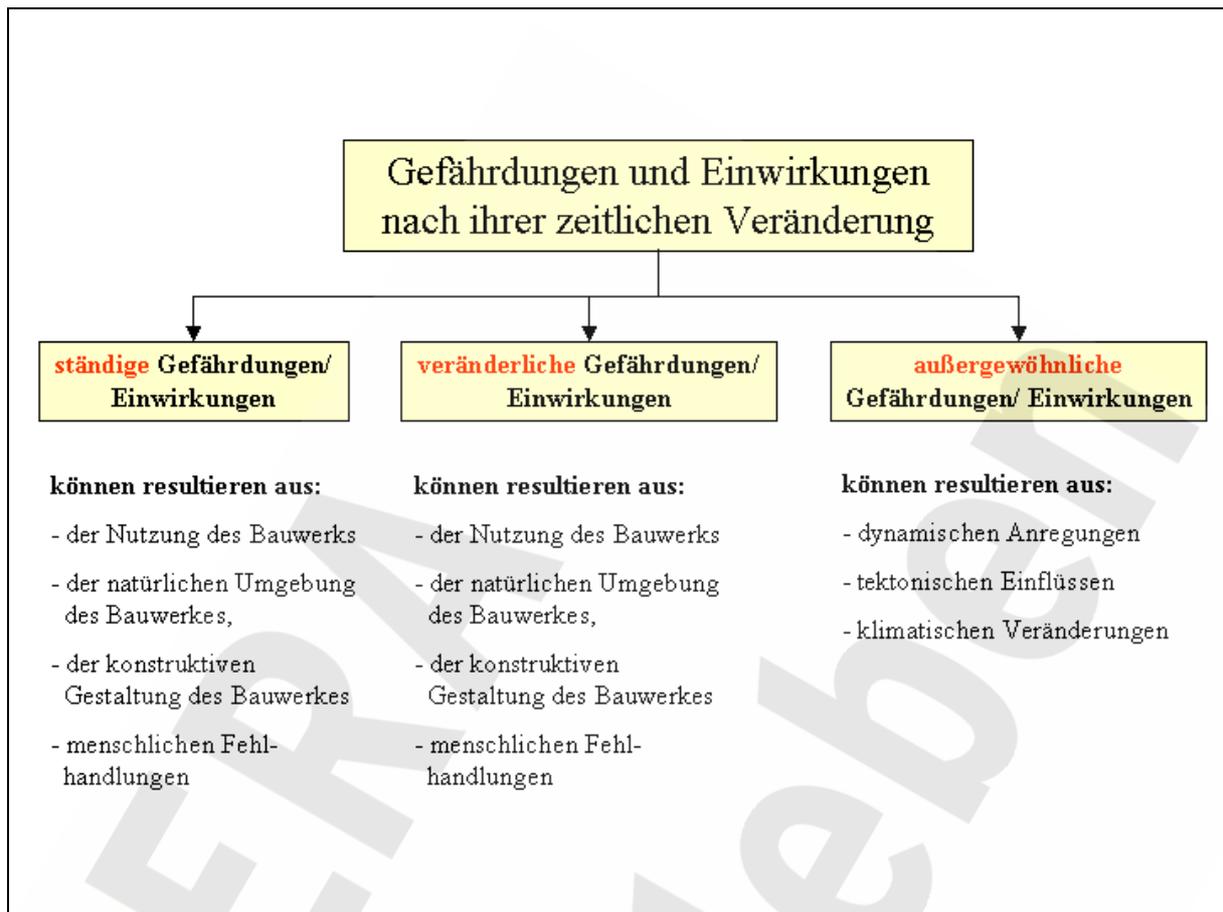


Abbildung 13: Prinzipdarstellung zur Erfassung aller möglichen Gefährdungen/Einwirkungen

5.2.3 Entwicklung von Gefährdungs- bzw. Einwirkungskombinationen

5.2.3.1 Mögliche Gefährdungen/ Einwirkungen

Mögliche **Gefährdungen/Einwirkungen** für bzw. auf die Schachtverschlüsse resultieren **aus der Nutzung des Bauwerkes** und sind im Einzelnen

- der Lösungsdruck von oben
- der Fluiddruck von unten

und

- die Korrosion.

Der **Lösungsdruck von oben** ist abhängig von der Höhe und der Mineralisation (Dichte) der über der Dichtung anstehenden Flüssigkeitssäule, die maximal bis an die Tagesoberfläche

BfS	Konzeptplanung der Schachtverschlüsse für die Schächte Bartensleben und Marie des ERA Morsleben	
9M/ 223 450 11/GHS/ TF/ 0001/00	Stand: 10.03.2004	Seite 79 von 215

reichen kann. In Abhängigkeit von der Teufenlage des Dichtelementes kann also maximal die Größe des hydrostatischen Druckes aus der überlagernden Flüssigkeitssäule auftreten.

Der **Fluiddruck von unten** wurde für das kombinierte West-Südfeld des ERA Morsleben mit maximal 6 MPa angenommen.

Dieser Wert leitete sich aus folgenden Szenarien des Stilllegungskonzeptes ab:

Fall 1:

Bei vollständig korrodierten Abdichtungen im Grubengebäude gilt durch den dann zu erwartenden Zufluss das Prinzip der kommunizierenden Röhren im Grubengebäude. Der damit maximal mögliche Druck an der Unterkante des tiefsten Dichtelementes im Schacht ergibt sich aus der Hydrostatik. Dabei wird unterstellt, dass sich die Unterkante dieses Dichtelementes im Bereich des Anschlages der 1. Sohle befindet. Maßgebend für diese Annahme ist der Schacht Bartensleben mit $h = 400$ m und einer Lösungsdichte von $1,3 \text{ g/cm}^3$ (Q-Lösung). Daraus folgt $p = (1.300 * 9,81 * 400) = 5,1 \text{ MPa}$.

Fall 2:

Bei einem unterstellten „trockenen“ West-Südfeld, ist auch der Aufbau eines Gasdruckes möglich. Dieser Gasdruck wird nach [3] mit ca. 4 MPa angegeben.

Damit waren für die Entwicklung der Gefährdungsbilder die 5,1 MPa des Fall 1 maßgeblich und führten mit einem Sicherheitszuschlag von 0,9 MPa zu den angenommenen 6 MPa.

Zusätzliche dynamische Drücke, welche durch die Verpuffung oder Explosion von Gasgemischen (Bildung von Methan, Wasserstoff infolge von Eisenkorrosion, Denitrifikation, Sulfatreduktion oder der Fermentation von Organika) verursacht werden können, wurden im verfüllten Schacht sowie dem geplanten vollständigen Verfüllen der Schachtanschlüsse ausgeschlossen.

Die **Korrosion** der eingesetzten Schachtverschlussmaterialien als Folge mechanischer, thermischer, physiko/chemischer und biologischer Einflüsse ist in die Materialauswahlkriterien einzubeziehen.

Gefährdungen/ Einwirkungen aus der natürlichen Umgebung des Bauwerkes treten infolge

- von Gebirgseigenschaften,

BfS	Konzeptplanung der Schachtverschlüsse für die Schächte Bartensleben und Marie des ERA Morsleben	
9M/ 223 450 11/GHS/ TF/ 0001/00	Stand: 10.03.2004	Seite 80 von 215

- von Lösungsprozessen

oder

- Temperaturänderungen auf.

Gefährdungen/Einwirkungen können aus den nachfolgend aufgeführten Gebirgseigenschaften resultieren:

- **Spannungs- Verformungsverhalten des Gebirges einschließlich der daraus resultierenden Gebirgsdruckerscheinungen** (Elastizitätsmodul, Querdehnungszahl, Druckfestigkeiten, Winkel der inneren Reibung, Kohäsion, Gebirgsgrundspannungszustand, Konvergenz des Gebirges)
- **Hydraulische Eigenschaften** und daraus resultierende Volumenströme (Porosität und Hydraulische Leitfähigkeit)

Resultierende Gefährdungen/ Einwirkungen aus Lösungsprozessen und Temperaturänderungen können verursacht werden durch:

- **Geochemisches Verhalten** (Lösungsprozesse der anstehenden Salze durch angreifende Wässer in Verbindung mit der dichteinduzierten Konvektion)
- **Geothermisches Verhalten** (Beachtung der geothermischen Tiefenstufe ist in die Konzeptplanung zu integrieren).

Gefährdungen/ Einwirkungen durch die konstruktive Gestaltung des Bauwerkes können verursacht werden durch

- das Eigengewicht des Schachtverschlusses,
- Temperaturänderungen,
- Quelldruck,
- Transportprozesse und Entmischungen

oder

- die Bauwerksgeometrie.

BfS	Konzeptplanung der Schachtverschlüsse für die Schächte Bartensleben und Marie des ERA Morsleben	
9M/ 223 450 11/GHS/ TF/ 0001/00	Stand: 10.03.2004	Seite 81 von 215

Unabhängig von zusätzlichen Belastungen, die vor allem aus der Nutzung des Bauwerks resultieren (z.B.: Lösungsdruck von oben), darf das **Eigengewicht der Schachtverfüllung** nicht zu unzulässig großen Setzungen oder zu einem Auslaufen der Füllsäule führen.

Temperaturänderungen treten hauptsächlich während der Bauphase des Schachtverschlusses auf. Beispiele für derartige konstruktionsbedingte Temperaturänderungen sind:

- die Hydratationswärme bei Abbindeprozessen

und

- Wärmezufuhr bedingt durch spezielle Einbautechnologien (z.B.: Asphalte/ Bitumen).

Materialien wie Bentonit/Bentonitgemische entwickeln bei Lösungszufuhr entsprechende **Quelldrücke**, die einen wesentlichen Einflussfaktor darstellen.

Entmischungen der Schachtverschlussmaterialien sind sowohl beim Einbau, als auch als Folge von **Stofftransportprozessen** bzw. Sedimentation während der Bauwerksnutzung nicht zu verhindern und müssen auf einen tolerablen Wert begrenzt werden.

Die **Geometrie des Bauwerks** ist sowohl in mechanischer (Lastabtrag) als auch in hydraulischer (Strömungsprozess) Hinsicht einzubeziehen und dabei neben den Materialeigenschaften ein wesentlicher Parameter bei der Dimensionierung des Bauwerks.

Gefährdungen/ Einwirkungen durch menschliche Fehlhandlungen sind maßgeblich

- in Unzulänglichkeiten in der Bauausführung

und untergeordnet

- in menschlichen Einwirkungen während der Nachbetriebsphase

begründet.

Außergewöhnliche Gefährdungen/ Einwirkungen werden verursacht durch

- dynamische Anregung (z.B. Erdbeben, Meteoriteneinschlag),
- tektonische Einflüsse

oder

- klimatische Veränderungen.

BfS	Konzeptplanung der Schachtverschlüsse für die Schächte Bartensleben und Marie des ERA Morsleben	
9M/ 223 450 11/GHS/ TF/ 0001/00	Stand: 10.03.2004	Seite 82 von 215

Alle drei Gefährdungen (ständig, veränderlich, außergewöhnlich; siehe Abbildung 13) können in Abhängigkeit von ihrer Intensität bzw. Stärke und ihrer Eintrittswahrscheinlichkeit Einfluss auf die zu errichtenden Bauwerkskonstruktionen der Schachtverschlussbauwerke ausüben.

5.2.3.2 Erarbeitung von Gefährdungsbildern

Ein Gefährdungsbild wird durch jeweils eine Leitgefahr und mögliche Begleitgefahren definiert. Auf Grundlage der Gefährdungsbilder kann das Schachtverschlussbauwerk entworfen und bemessen werden.

Szenarien, die auf Grund ihrer geringen Eintrittswahrscheinlichkeiten keine Berücksichtigung finden, werden als akzeptiertes Restrisiko übernommen.

Für die Schachtverschlussbauwerke des ERA Morsleben wurden insgesamt vier verschiedene Gefährdungsbilder definiert:

Gefährdungsbild 1: Auspressen von wässrigen Lösungen aus dem Grubengebäude über die Schächte,

Gefährdungsbild 2: Zutritt von wässrigen Lösungen in das Grubengebäude über die Schächte,

Gefährdungsbild 3: Setzungen und/oder Auslaufen der Verfüllsäule

und

Gefährdungsbild 4: Hebungen und/oder Auspressen der Verfüllsäule.

In der in Abbildung 14 dargestellten Gefährdungsbildmatrix werden den vier Gefährdungsbildern die jeweiligen Leitgefahren und mögliche Begleitgefahren zugeordnet.

		Gefährdungsbilder				
		Auspresen von wässrigen Lösungen	Zutritt von wässrigen Lösungen	Setzungen und/oder Auslaufen der Verfüllsäule	Hebungen und/oder Auspresen der Verfüllsäule	
Begleitgefahren	aus der Nutzung des Bauwerkes	Lösungsdruck von unten	Leitgefahr	Null (konservativ)	Null (konservativ)	Leitgefahr
		Lösungsdruck von oben	Null (konservativ)	Leitgefahr	x	Null (konservativ)
		Korrosion der Verfüllsäule	x	x	x	x
	aus der natürlichen Umgebung des Bauwerkes	Gebirgsdruck	x	x	x	x
		Bemessungslast für Erdbeben	akzeptierbares Restrisiko			
		Lösungsprozesse im Gebirge	x	x	x	x
	aus der konstruktiven Gestaltung des Bauwerkes	Eigengewicht des Schachtverschlusses	-	x	Leitgefahr	x
		Temperaturänderungen	Bedeutend im Hinblick auf Belastungen			
		Quelldruck/Schwinden	Bedeutend im Hinblick auf Belastungen			
		Entmischung	durch abgeminderte Stoffeigenschaften zu berücksichtigen und durch geeignetes Qualitätsmanagement zu begrenzen			
		Unzulänglichkeiten in der Bauausführung	durch „abgeminderte“ Bauwerkseigenschaften (Bauteilwiderstand) zu berücksichtigen und durch geeignetes Qualitätsmanagement zu begrenzen			
	nicht zu quantifizierende Gefahren	Klimatische Veränderungen	zu übernehmendes Risiko			
		Tektonische Einflüsse	zu übernehmendes Risiko			
		Human Intrusion	zu übernehmendes Risiko			

Abbildung 14: Matrix der Gefährdungsbilder

BfS	Konzeptplanung der Schachtverschlüsse für die Schächte Bartensleben und Marie des ERA Morsleben	
9M/ 223 450 11/GHS/ TF/ 0001/00	Stand: 10.03.2004	Seite 84 von 215

5.2.4 Grundkonzept für die Planung der Schachtverschlussbauwerke des ERA Morsleben und Materialauswahl

Basierend auf der in Kapitel 5.2 erläuterten Vorgehensweise beim Sicherheitskonzept und unter Anwendung der in Kapitel 3.2 vorgestellten Normen und Richtlinien wurden Konstruktionsprinzipien erarbeitet, welche die erstellten Gefährdungsbilder/Szenarien für die Schachtverschlussbauwerke des ERA Morsleben abdecken. Hinsichtlich des anzustrebenden überdurchschnittlich hohen Sicherheitsniveaus der Schachtverschlussbauwerke wurden die speziellen Konstruktionsvarianten für den jeweiligen Schacht anhand eines auf die Randbedingungen des ERA Morsleben ausgerichteten **Grundkonzeptes** erstellt.

Das Grundkonzept für die Planung der Schachtverschlüsse des ERA Morsleben basiert auf den nachfolgenden **Konstruktionsprinzipien**:

- Für die Schachtverschlüsse wird eine Vollverfüllung vorgesehen.
- Es ist eine funktionale Trennung zwischen den einzelnen Schachtverschlüsselementen (Dichtelemente und Elemente mit statischen Aufgaben), unter Berücksichtigung der standortspezifischen geologischen, bergbaulichen und geochemischen Verhältnisse an den Schächten Marie und Bartensleben sowie der aus dem Stilllegungskonzept ERA Morsleben resultierenden Randbedingungen, anzustreben.
- Da eine doppelseitige Belastung des Schachtverschlusses durch Fluide mit unterschiedlichem Chemismus (Lösungsdruck von oben und von unten) auftreten kann, wird eine Trennung der Dichtungen in Dichtelemente gegen Lösungszutritte von oben und Dichtelemente gegen Lösungsaufstieg von unten vorgenommen.
- Die Dimensionierung der Dichtelemente erfolgt unter Berücksichtigung des Volumensstroms durch den abgedichteten freien Querschnitt, durch die Kontaktzone zwischen Gebirge und Dichtelement sowie durch die stoßnahe, aufgelockerte Zone.
- Der Ausbau und die aufgelockerte Zone werden im Bereich der Dichtelemente beraubt. Die zu raubenden Konturbereiche sind durch In-Situ-Messungen im Zuge der Bauausführung zu bestimmen.
- Die Füllsäule ist so zu gestalten, dass die Setzungsstabilität und in den Füllortbereichen die Auslaufsicherheit gewährleistet ist. Für den aus dem Grubengebäude von

BfS	Konzeptplanung der Schachtverschlüsse für die Schächte Bartensleben und Marie des ERA Morsleben	
9M/ 223 450 11/GHS/ TF/ 0001/00	Stand: 10.03.2004	Seite 85 von 215

unten anstehenden Fluiddruck von maximal 6 MPa ist die Füllsäule gegen Auspressen und Hebungen auszulegen.

- Auf Grund des geforderten, hohen Sicherheitsniveaus der Schachtverschlüsse kommen zusätzliche sicherheitserhöhende Konstruktionsprinzipien wie Redundanz/Diversität und ein möglichst zeitlich anwachsendes Sicherheitsniveau zur Anwendung. Darüber hinaus kann im Bereich des Deckgebirges in Zwischenzonen (Zonen höherer Leitfähigkeit) der Ausbau entfernt und ein geringpermeables, setzungsstabiles Verfüllgut eingebaut werden.
- In Tabelle 15 werden die zur Anwendung kommenden Konstruktionsprinzipien aufgeführt und jedem dieser Konstruktionsprinzipien die Aufgabe bzw. der Zweck, den es im Schachtverschlusssystem zu erfüllen hat, zugewiesen. Zu bemerken ist, dass sich unter Berücksichtigung der standortspezifischen geologischen, bergbaulichen und geochemischen Verhältnisse der Schächte sowie der aus dem Stilllegungskonzept des ERA Morsleben resultierenden Randbedingungen die grundsätzliche Trennung von Widerlager und Dichtelement im Einzelfall als nicht möglich erweisen kann. Um diesem Umstand Rechnung zu tragen, werden aufbauend auf den **Katalog der Konstruktionsprinzipien** zwei unterschiedliche Grundkonzepte für die Schachtverschlussbauwerke des ERA Morsleben abgeleitet.

Tabelle 15 : Katalog abgeleiteter Konstruktionsprinzipien

Konstruktionsprinzip	Zweck
Schachtvollverfüllung	Einhaltung TA Abfall, Richtlinie des OBA Clausthal-Zellerfeld
Trennung von Dichtelementen und Widerlagersäulen, unter Berücksichtigung der standort-spezifischen geologischen, bergbaulichen und geochemischen Verhältnisse an den Schächten sowie der aus dem Stilllegungskonzept des ERA Morsleben resultierenden Randbedingungen	die funktionale Trennung ermöglicht die Optimierung und erhöht die Sicherheit
Trennung der Dichtungen gegen Deckgebirgsässer und aufsteigende Lösungen	Gewährleistung einer hohen Sicherheit
Dichtung gegen Deckgebirgsässer unterhalb des letzten Deckgebirgszuflusses	Wirksamkeit der Dichtung gegen Zuflüsse aus dem Deckgebirge
Dichtung oberhalb des letzten Lösungszutrittes und/oder Grubenbaus	Wirksamkeit der Dichtung gegen Fluidruck aus dem Grubengebäude
Dimensionierung der Dichtelemente auf Volumenstrom durch abgedichteten freien Schachtquerschnitt	Einhalten des zulässigen Volumenstroms
Dimensionierung der Dichtelemente auf Volumenstrom durch die Kontaktzone Gebirge-Dichtung	Einhalten des zulässigen Volumenstroms
Dimensionierung der Dichtelemente auf Volumenstrom durch aufgelockerte, ausbruchnahe Gebirgsbereiche	Einhalten des zulässigen Volumenstroms
Rauben des Ausbaus im Dichtelementbereich	Wirksamkeit der Dichtelemente
Rauben der aufgelockerten Zone im Dichtelementbereich	Erhöhte Wirksamkeit der Dichtelemente durch Verminderung der hydraulischen Leitfähigkeit der aufgelockerten Zone
Setzungsstabilität und Füllortauslaufsicherheit	Lagestabilität der Dichtelemente und somit Gebrauchstauglichkeit
Redundanz & Diversität	hohe Sicherheit - durch Vielzahl an Komponenten - durch verschiedenartige Komponenten
mit zunehmender Nutzungszeit anwachsendes Sicherheitsniveau	hohe Sicherheit, sehr lange Nachbetriebsphase
kein rechnerischer Ansatz einer Dichtwirkung im Kaliflözbereich	konservativer Ansatz
Rauben des Schachtausbaus über die gesamte Schachtteufe und Verfüllung im Deckgebirge (oberhalb Dichtelement DE 1) mit Materialien geringer hydraulischer Leitfähigkeit in Abhängigkeit von den Gebirgseigenschaften	Minimierung des Volumenstroms

5.2.4.1 Grundkonzept A der Schachtverschlussbauwerke

Das in Abbildung 15 dargestellte *Grundkonzept A* berücksichtigt die Trennung zwischen Dichtelement und Widerlager.

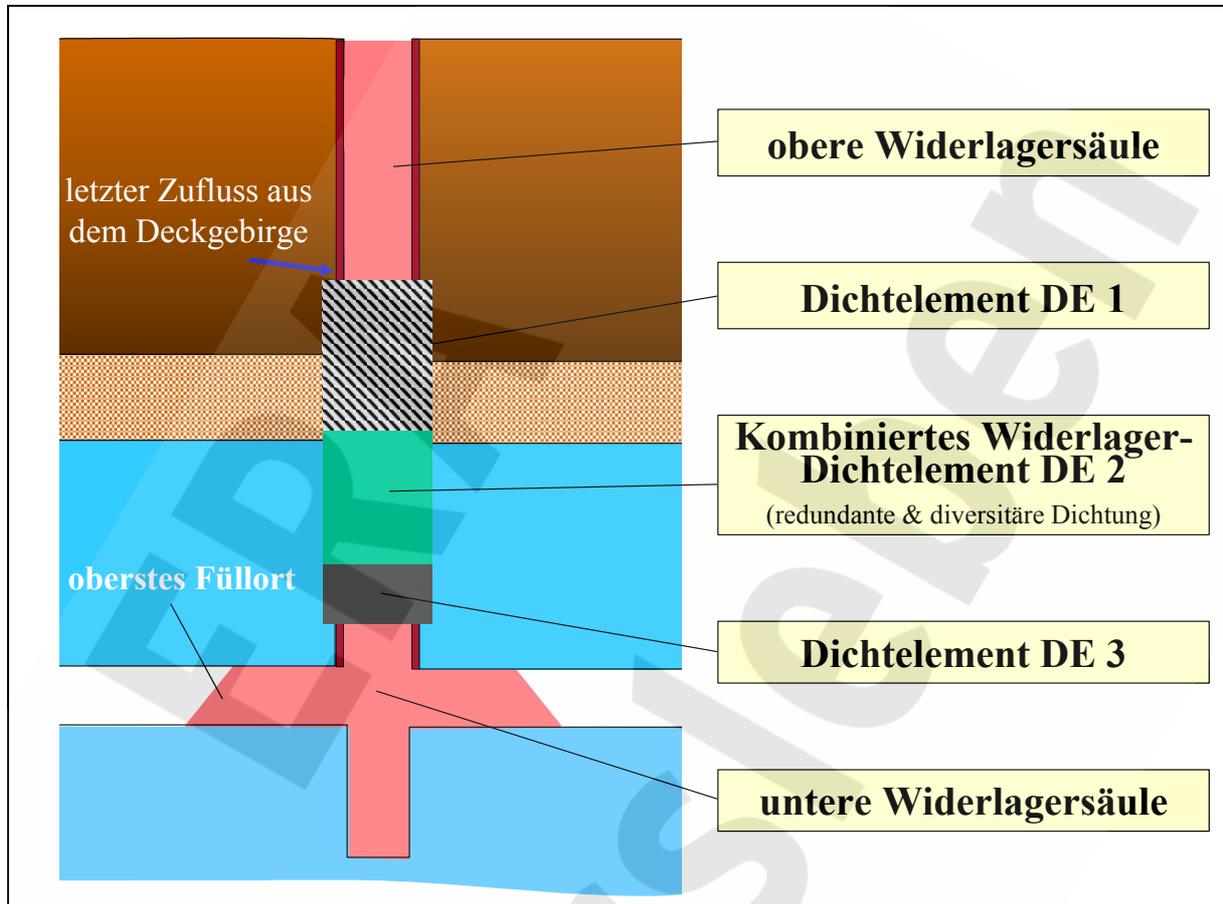


Abbildung 15: Grundkonzept A für den Aufbau der Schachtverschlusssysteme des ERA Morsleben

An die einzelnen der in diesem *Grundkonzept* ausgewiesenen Schachtverschlusselemente werden entsprechend ihrer Aufgabe im Schachtverschlusssystem spezifische Anforderungen gestellt.

Wenn das kombinierte Widerlager-Dichtelement den Lastabtrag der von unten wirkenden Kräfte aus dem Fluidruck nicht gewährleisten kann, muss die **obere Widerlagersäule** den Lastabtrag garantieren. Weiterhin ist eine hohe Steifigkeit erforderlich, um eine Stützwirkung des umgebenden Gebirges zu erreichen.

BfS	Konzeptplanung der Schachtverschlüsse für die Schächte Bartensleben und Marie des ERA Morsleben	
9M/ 223 450 11/GHS/ TF/ 0001/00	Stand: 10.03.2004	Seite 88 von 215

Die **obere Dichtung** verhindert die Zuflüsse aus dem Deckgebirge in das Grubengebäude. Gegen aufsteigende Lösungen aus dem Grubengebäude wird die **untere Dichtung** eingesetzt.

Die **mittlere Dichtung** stellt ein redundantes und diversitäres Dichtsystem sowohl für das untere als auch für das obere Dichtelemente dar. Die Auslegung dieser Dichtung erfolgt gegen die Zuflüsse aus dem Deckgebirge sowie gegen den Lösungsaufstieg aus dem Grubengebäude.

Die mittlere Widerlagersäule muss den Lastabtrag aus den von unten angreifenden Fluiddrücken und den von oben anstehenden hydrostatischen Drücken aus der überlagernden Wassersäule gewährleisten.

Als Anforderungen an die **untere Widerlagersäule** können die Auslaufsicherheit und die Setzungsstabilität definiert werden.

Die genannten spezifischen Anforderungen an die Schachtverschlusselemente können durch die Zuordnung von entsprechenden Schachtverschlussmaterialien und durch die Anwendung bestimmter Bauwerksgeometrien erfüllt werden. Für das Gesamtsystem Schachtverschluss wird ein Anwachsen des Sicherheitsniveaus mit zunehmender Nutzungsdauer angestrebt.

5.2.4.2 Grundkonzept B der Schachtverschlussbauwerke

Auf der Grundlage der in Kap. 5.2.4 aufgeführten Konstruktionsprinzipien und unter dem Umstand, dass auf Grund der geologischen, bergbaulichen und geochemischen Randbedingungen keine Trennung zwischen Widerlager und Dichtelement erfolgen kann, ist in Abbildung 16 das daraus abgeleitete **Grundkonzept B** für die Schachtverschlussbauwerke des ERA Morsleben abgebildet.

Gegenüber den im Grundkonzept A ausgewiesenen spezifischen Aufgaben und den daraus resultierenden Anforderungen der einzelnen Schachtverschlusselemente haben diese im **Grundkonzept B** teilweise unterschiedliche Anforderungen bzw. Funktionen zu erfüllen.

Die **obere Widerlagersäule** muss wie im Grundkonzept A ggf. den Lastabtrag der von unten angreifenden Kräfte gewährleisten sowie eine möglichst hohe Steifigkeit hinsichtlich der Stützwirkung des Deckgebirges aufweisen.

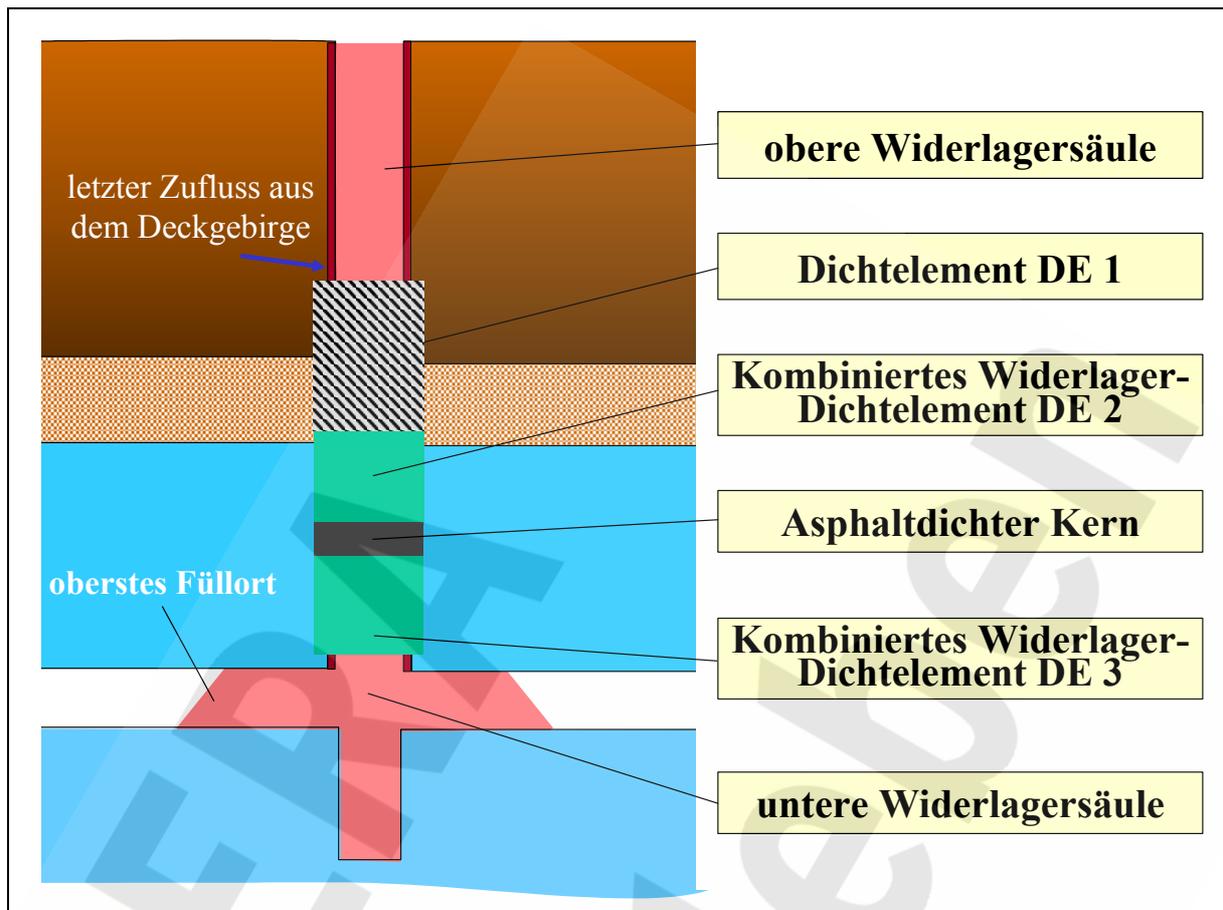


Abbildung 16: Grundkonzept B für den Aufbau der Schachtverschlusssysteme des ERA Morsleben

Das **Dichtelement DE 1** entspricht der oberen Dichtung des Grundkonzeptes A und hat demzufolge die Aufgabe der Abdichtung gegenüber Zuflüssen aus dem Deckgebirge in das Grubengebäude zu erfüllen.

Das kombinierte Widerlager-**Dichtelement DE 2** stellt das redundante und diversitäre Dichtsystem für das Dichtelement DE 1 dar. Die Auslegung dieser Dichtung erfolgt ebenso wie beim Dichtelement DE 1 gegen die Zuflüsse aus dem Deckgebirge. Die Auslegung der **Widerlagersäule** des **DE 2** hat sowohl auf Fluiddrücke von unten als auch von oben zu erfolgen.

Das **kombinierte Widerlager-Dichtelement DE 3** ist analog dem kombinierten Widerlager-Dichtelement DE 2 aufgebaut. Das Dichtmaterial des kombinierten Widerlager-Dichtelementes DE 3 dichtet den freien Schachtquerschnitt sowie die Kontaktzone zwischen dem Dichtelement und dem Gebirge gegenüber aus dem Grubengebäude aufsteigenden Lösungen ab. Die **Widerlagersäule** des **DE 3** trägt die Belastungen von unten in das Gebirge ab.

BfS	Konzeptplanung der Schachtverschlüsse für die Schächte Bartensleben und Marie des ERA Morsleben	
9M/ 223 450 11/GHS/ TF/ 0001/00	Stand: 10.03.2004	Seite 90 von 215

Zwischen den beiden gleichartigen kombinierten Widerlager-Dichtelementen DE 2 und DE 3 ist eine **Trennschicht** zur Gewährleistung der Gebrauchstauglichkeit der beiden kombinierten Widerlager-Dichtelemente anzuordnen.

Die **untere Widerlagersäule** entspricht dem Prinzip einer Vollverfüllung und gewährleistet die Auslaufsicherheit und Setzungsstabilität. Weiterhin sollte auf eine möglichst hohe Steifigkeit hinsichtlich der Stützwirkung des Salzgebirges und Lagestabilität der Dichtelemente geachtet werden.

Die genannten spezifischen Anforderungen an die Schachtverschlusselemente müssen durch die Zuordnung von entsprechenden Schachtverschlussmaterialien und durch die Anwendung bestimmter Bauwerksgeometrien erfüllt werden. Für das Gesamtsystem Schachtverschluss wird ein Anwachsen des Sicherheitsniveaus mit zunehmender Nutzungsdauer angestrebt.

5.2.4.3 Auswahl geeigneter Materialien

Aufbauend auf den genannten Anforderungen an die Schachtverschlusselemente werden im Folgenden spezifische Anforderungen sowie Auswahlkriterien für die einzusetzenden Schachtverschlussmaterialien festgelegt.

Als **allgemeine Anforderungen** an die Schachtverschlussmaterialien werden

- die Langzeitstabilität,
- deren Verfügbarkeit

sowie

- die Wirtschaftlichkeit

definiert.

Auf Grund des für die Schachtverschlüsse des ERA Morsleben geforderten Nachweiszeitraumes von 30.000 Jahren stellt die Langzeitstabilität den Kernpunkt der allgemeinen Materialanforderungen dar.

Aus der Strategie der Dimensionierung der Dichtelemente resultieren die Anforderungen an die Dichtmaterialien hinsichtlich ihrer Wirksamkeit bei der Abdichtung gegenüber den zu beachtenden 3 Teilvolumenströmen:

BfS	Konzeptplanung der Schachtverschlüsse für die Schächte Bartensleben und Marie des ERA Morsleben	
9M/ 223 450 11/GHS/ TF/ 0001/00	Stand: 10.03.2004	Seite 91 von 215

- im abzudichtenden, freien Schachtquerschnitt,
- in der Kontaktzone zwischen Dichtelement und Gebirge,

sowie

- in der schachtnahen, aufgelockerten Gebirgszone.

Ein weiterer wesentlicher Gesichtspunkt, der bei der Materialauswahl berücksichtigt werden muss, ist die Dichtwirkung des Materials als Funktion der Zeit (sofort wirksame und verzögert wirksame Dichtelemente).

Außerdem werden **spezifische Mindestanforderungen** an die **Dichtmaterialien** hinsichtlich ihrer mechanischen Parameter gestellt (z.B.: innere Reibung, Haftreibung, Haftscher- und Zugfestigkeit, Steifemodul).

Für beide Widerlagersäulen (untere und obere) erfolgt die Auswahl entsprechender Schachtverschlussmaterialien auf der Grundlage der Stützwirkung des Schachtausbruchsbereiches. Die untere Widerlagersäule muss zusätzlich das Kriterium der Auslaufsicherheit erfüllen.

Für das mittlere, kombinierte Widerlager-Dichtelement sind die Eigenschaften zum Lastabtrag, der aus der überlagernden Wassersäule und dem von unten wirkenden Fluiddruck resultiert, entscheidend.

Als mögliche Schachtverschlussmaterialien (für Dichtung und Füllsäulen), für die der Nachweis der Langzeitstabilität erbracht werden kann, kommen folgende Baustoffe/Dichtmaterialien uneingeschränkt in Frage (siehe Kapitel 6.1):

- Bitumen und Asphalte,
- Tone und Bentonite/Bentonitgemische,
- Mineralgemische,
- Schottermaterialien (einschließlich Kiese und Sande)

sowie

- arteigene Materialien (z.B. Salzgrus, Salzhauwerk, Rückstände aus der Kalirohsalzaufbereitung).

Alle genannten Schachtverschlussmaterialien wurden auf Basis des von der ARGE in Kapitel 3.1 erarbeiteten Kenntnisstandes erfasst und bilden für die zu planenden Schachtverschlussbauwerke die weitere Bearbeitungsgrundlage.

Die Zuordnung der zuvor genannten Schachtverschlussbaustoffe zu den jeweiligen Schachtverschlusselementen der **Grundkonzepte A** und **B** führte zu 2 verschiedenen Varianten für die Schachtverschlussbauwerke des ERA Morsleben.

Die Abbildung 17 und Abbildung 18 zeigen die Zuordnung der ausgewählten Materialien zu den jeweiligen Schachtverschlusselementen für die **Grundkonzepte A** und **B**.

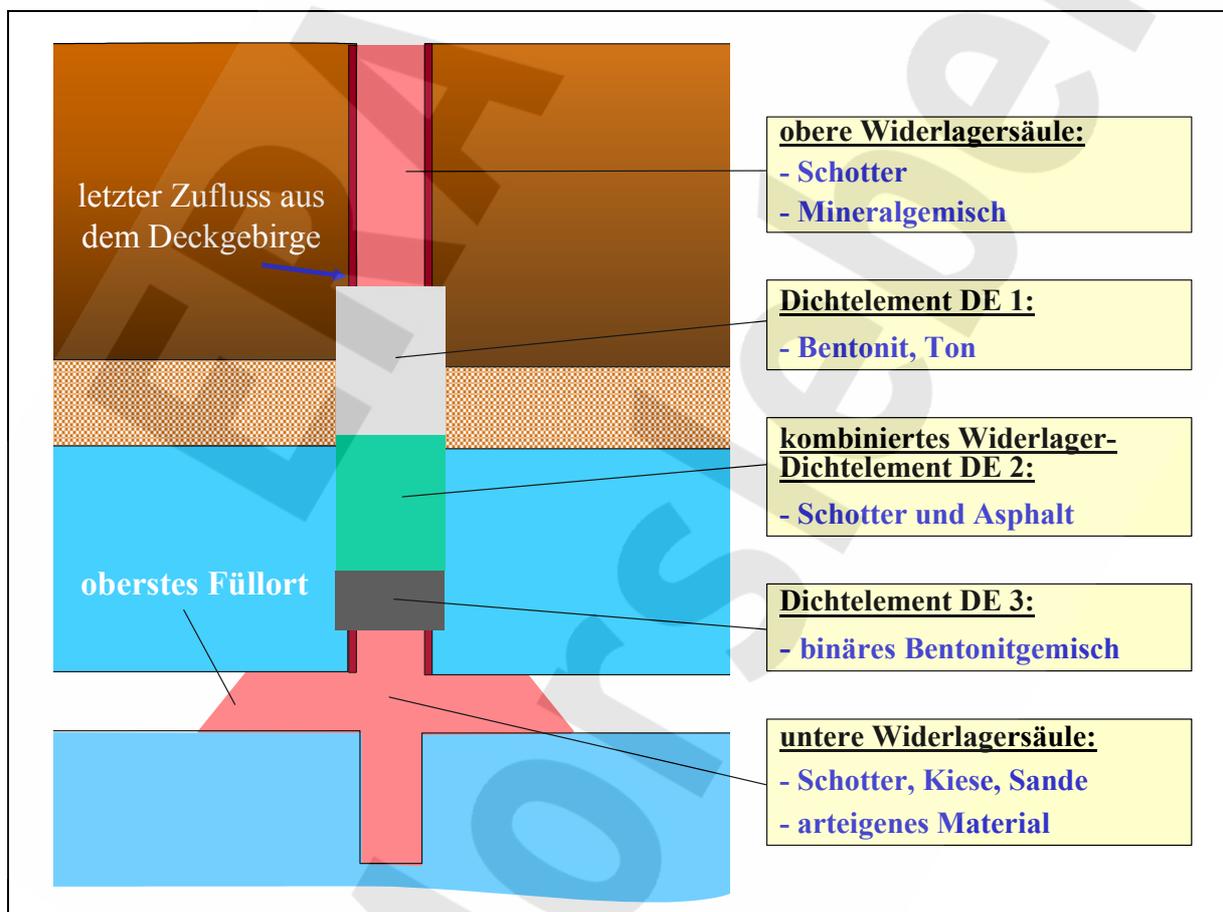


Abbildung 17: Grundkonzept A - Zuordnung möglicher Schachtverschlussmaterialien zu den Schachtverschlusselementen

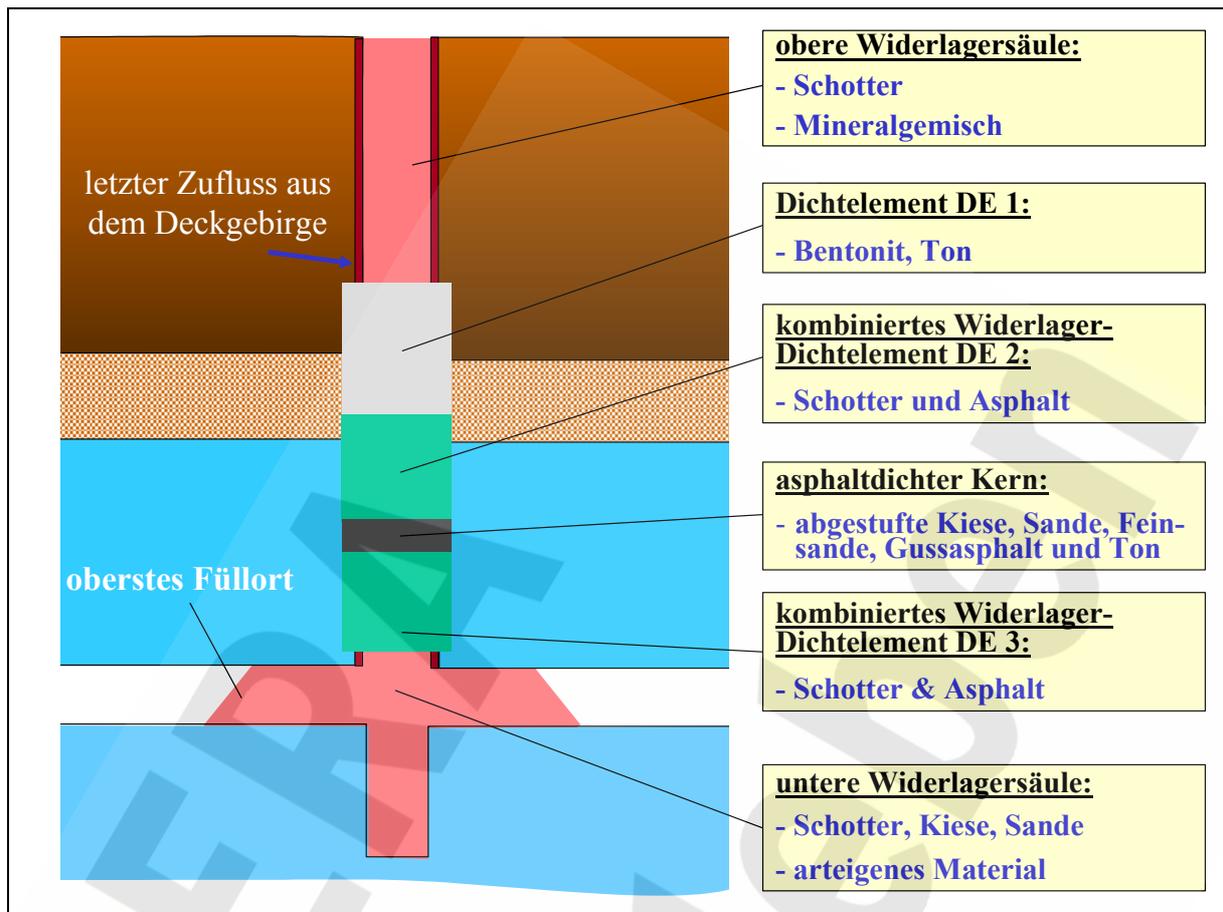


Abbildung 18: Grundkonzept B - Zuordnung möglicher Schachtverschlussmaterialien zu den Schachtverschlusselementen

BfS	Konzeptplanung der Schachtverschlüsse für die Schächte Bartensleben und Marie des ERA Morsleben	
9M/ 223 450 11/GHS/ TF/ 0001/00	Stand: 10.03.2004	Seite 94 von 215

6 Planungskonzeption für den Schachtverschluss der Schächte des ERA Morsleben auf Basis der Nachweisführungen zur Tragfähigkeit, Gebrauchstauglichkeit sowie Langzeitstabilität der Schachtverschlussmaterialien

Für die auf der Basis der Grundkonzepte zu entwerfenden Bauwerksentwürfe für die Schachtverschlussbauwerke der Schächte Marie und Bartensleben waren auch die Nachweise zur Langzeitstabilität der Baustoffe sowie die Nachweise zur Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit der Schachtverschlüsse zu führen. In diesem Bericht sind nachfolgend nur die wesentlichen Ergebnisse der Nachweisführungen dargestellt. Eine detaillierte Betrachtung ist in [73] enthalten.

Die Aufgabenstellung eines quantitativen Nachweises der Sicherheit (Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit) lässt sich grundsätzlich in drei Teilaufgaben zerlegen.

- (A) Zunächst ist es notwendig die geologischen, hydrologischen, geomechanischen und technisch-konstruktiven Aspekte, die in den Gefährdungsbildern erfasst wurden, in ein geotechnisches Gesamtmodell zu integrieren, das die genannten natürlichen Prozesse hinreichend genau erfasst.
- (B) Zur rechentechnischen Umsetzung gilt es, die nicht minder komplexe Aufgabe der Parameterwahl umzusetzen.
- (C) Letztendlich müssen die Ergebnisse beurteilt und eingeschätzt werden, woraus gegebenenfalls eine Neubemessung des Bauwerkes erfolgt. Dazu ist die Wahl von Beurteilungskriterien, ob eine ausreichende Sicherheit (Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit) erreicht wurde, notwendig.

Fällt die Beurteilung der erreichten Sicherheit negativ aus, so ist über Iterationsprozesse das Bauwerk konstruktiv solange umzugestalten, bis das geforderte Sicherheitsniveau erreicht ist. Die konstruktiven Änderungen umfassen dabei die Auswahl der einzusetzenden Materialien (der Nachweis der Langzeitbeständigkeit wird vorab erbracht) und Änderungen der Bauwerksgeometrie. Als Ziel kann formuliert werden, dass konservative Modellansätze mit einer begrenzten Anzahl an Parametern zu favorisieren sind. Nur so sind Unsicherheiten die gleichermaßen aus den Modellansätzen und der Parameterwahl resultieren auf ein vertretbares

BfS	Konzeptplanung der Schachtverschlüsse für die Schächte Bartensleben und Marie des ERA Morsleben	
9M/ 223 450 11/GHS/ TF/ 0001/00	Stand: 10.03.2004	Seite 95 von 215

Maß zu minimieren. Komplexere Modelle (oftmals mit einer Vielzahl von Parametern) können vergleichsweise verwendet werden, sollten jedoch für eine Sicherheitsbewertung nach Möglichkeit nicht herangezogen werden. Zusätzlich zu den quantitativen Verfahren kann auf Erfahrungen mit konzeptionell ähnlichen Versuchsbauwerken und auf entsprechende Labor- und Technikumversuche zurückgegriffen werden.

6.1 Nachweisführungen zur Langzeitstabilität der eingesetzten Schachtverschlussmaterialien

6.1.1 *Kriterien zur Beurteilung der Langzeitstabilität der Schachtverschlussmaterialien*

Als Bestandteil der Nachweisführung war dem Nachweis der Langzeitstabilität der einzusetzenden Schachtverschlussmaterialien besonders Rechnung zu tragen. In den Nachweisen zur Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit der Schachtverschlussbauwerke fanden Materialparameter Eingang, deren zeitabhängige Veränderung entweder ausgeschlossen oder entsprechend quantifiziert werden musste. Die Stabilität dieser Materialparameter bzw. deren Veränderung war unter den zeitlich veränderlichen Umgebungsparametern über den gesamten Nachweiszeitraum von 30.000 Jahren zu erfassen. Ein Material gilt als langzeitstabil, wenn in Abhängigkeit von den sich zeitlich ändernden Einflussparametern die Materialeigenschaften [74]:

- konstant in einem gewissen Toleranzbereich bleiben,
- nur kurzzeitig und reversibel diesen Toleranzbereich in einem akzeptierbaren Umfang verlassen

oder

- sich zeitlich so ändern, dass diese Veränderungen über Sicherheitsreserven innerhalb des Nachweiszeitraumes kompensiert werden können.

Der Nachweis der Langzeitstabilität der eingesetzten Materialien stützte sich in erster Linie auf die Auswertung von Untersuchungen zu natürlichen und historischen Analoga. Weiterhin wurde der Stand der Technik in Bezug auf chemische und thermodynamische Modellierungen ausgewertet und in die Betrachtungen integriert. Die Akzeptanz des jeweils untersuchten Ma-

BfS	Konzeptplanung der Schachtverschlüsse für die Schächte Bartensleben und Marie des ERA Morsleben	
9M/ 223 450 11/GHS/ TF/ 0001/00	Stand: 10.03.2004	Seite 96 von 215

terials als Schachtverschlussbaustoff wurde durch Beispiele bzw. durch vorliegende Anwendungen/Erfahrungen bei nationalen und internationalen Projekten untermauert.

6.1.2 Nachweis der Langzeitstabilität von Bentoniten und Tonen

Tone und Bentonite sind nach den in den Kapiteln 5.2.4.1 und 5.2.4.2 erarbeiteten Grundkonzepten A und B als Baustoffe für die Dichtelemente gegen zuzitende Lösungen aus dem Deckgebirge und/oder gegen aufsteigende Lösungen aus dem Grubengebäude vorgesehen. Diese natürlichen Materialien verfügen über hervorragende Dichteigenschaften sowohl gegenüber Wasser, als auch gegenüber salinaren Lösungen (NaCl-, IP21-Lösungen). Von entscheidender Bedeutung für die Auswahl als Dichtelementbaustoff waren neben der geringen hydraulischen Leitfähigkeit der Bentonite die Ausbildung eines Quelldruckes bei Bewässerung durch Wasser oder salinare Lösungen. Durch den Aufbau des Quelldruckes bei Lösungszutritt dichten die Bentonite neben dem freien Schachtquerschnitt auch die Kontaktzone zum Gebirge und eventuelle Einbauimperfectionen zuverlässig ab. In zahlreichen Untersuchungen [12], [16], [23], [29], [34], aber auch in der praktischen Umsetzung [12], [75] wurde die Eignung dieses Materials als Dichtelementbaustoff nachgewiesen.

Bislang noch nicht hinreichend untersucht wurden die Auswirkungen zementphasenbehafteter salinärer Lösungen auf die Bentoniteigenschaften. Bedingt durch das gewählte Stilllegungskonzept können diese aber nicht ausgeschlossen werden. Aus diesem Grund muss das in Kapitel 5.2.4.1 vorgestellte Grundkonzept A mit dem darin vorgesehenen Bentonit-Dichtelement gegen aus dem Grubengebäude aufsteigende Lösungen ausscheiden.

Grundsätzlich besteht für Quelldruck und hydraulische Leitfähigkeit gegenüber Wasser der gleiche Zusammenhang zur Bentonittrockendichte wie bei Einwirkung von Salzlösungen. Mit zunehmender Bentonittrockendichte erhöht sich der Quelldruck und verringert sich die hydraulische Leitfähigkeit des Materials. Jedoch werden im Vergleich zum Angriff salinärer Lösungen höhere Quelldrücke und niedrigere hydraulische Leitfähigkeiten bei gleichen Bentonittrockendichten erzielt [23], [29], [34]. Somit können im nichtsalinaren Milieu geringere Anforderungen an die Bentonittrockendichte gestellt werden. Für die Dichtmaterialien, die im Deckgebirge eingesetzt werden, ist deshalb ein kompaktiertes Bentonitgemisch (Calcigel) mit einer Körnung 0 bis 10 mm ausreichend. Für dieses Material wurde ein Quelldruck von min-

BfS	Konzeptplanung der Schachtverschlüsse für die Schächte Bartensleben und Marie des ERA Morsleben	
9M/ 223 450 11/GHS/ TF/ 0001/00	Stand: 10.03.2004	Seite 97 von 215

destens 1,0 MPa und eine hydraulische Leitfähigkeit von $2,0 \cdot 10^{-12}$ m/s bei einer Bentonittrockendichte von $1,45 \text{ g/cm}^3$ gegenüber Wasser erreicht und nachgewiesen [23], [75].

Neben dem Quellvermögen weist der Bentonit weitere wichtige Eigenschaften auf, welche seine Eignung als Dichtmaterial besonders untermauern. Nach [22], [76] besitzt das Tonmineral Montmorillonit ein hohes Ionenaustauschvermögen bzw. ein hohes Adsorptionsvermögen gegenüber einigen diffundierenden Radionukliden.

Eine weitere positive Eigenschaft hinsichtlich des qualitätsgerechten Einbaus des Bentonits in das Schachtverschlusssystem sind seine gute Handhabbarkeit [22], [76], [77] sowie die mögliche Einstellung der hydraulischen Eigenschaften des Bentonits in einer großen Bandbreite in Abhängigkeit von der gewählten Bentonittrockendichte. Durch diese Eigenschaften des Bentonits werden dessen Funktionssicherheit und somit die Gebrauchstauglichkeit des Gesamtschachtverschlusssystem maßgeblich bestimmt.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die Eignung von Bentonit für Dichtungszwecke gegenüber Süßwasser sowie der sichere verfahrenstechnische Ablauf beim Bau mit diesen Materialien durch Laborversuche, Versuchen in halbtechnischen Anlagen (Technikumsversuche), In-Situ-Versuche und im praktischen Einsatz nachgewiesen ist.

Grundsätzlich kann die Eignung von Bentonit als langzeitstabiles Schachtverschlussmaterial unter Berücksichtigung der spezifischen Randbedingungen des ERA Morsleben wie folgt zusammengefasst werden:

- die Langzeitstabilität von Bentonit ist durch natürliche und historische Analoga nachgewiesen,
- die Eignung von Bentonit als Dichtmaterial gegen Deckgebirgswässer ist nachgewiesen,
- die vorgesehenen unterschiedlichen Einsatzmöglichkeiten von Bentonit bei internationalen Endlagerprojekten unterstreichen dessen Akzeptanz

und

BfS	Konzeptplanung der Schachtverschlüsse für die Schächte Bartensleben und Marie des ERA Morsleben	
9M/ 223 450 11/GHS/ TF/ 0001/00	Stand: 10.03.2004	Seite 98 von 215

- für die aus dem Salzbetoneinsatz beim Stilllegungskonzept resultierende chemische Veränderung der Lösungen durch Zementphasen und deren Auswirkungen auf das Langzeitverhalten von Bentonit liegen bislang keine gesicherten Erkenntnisse vor. Daher verbietet sich der in Kapitel 5.2.4.1 dokumentierte Ansatz des Grundkonzeptes A, dass ein weiteres Dichtelement auf Bentonitbasis gegen aus dem Grubengebäude aufsteigende Lösungen vorsah.

6.1.3 Nachweis der Langzeitstabilität von Asphalten und Bitumen

Als weiteres Dichtmaterial wurden Bitumen bzw. Asphalte in die Betrachtungen einbezogen. Bitumen stellen komplexe, natürliche oder künstlich hergestellte Kohlenwasserstoffverbindungen dar. Bitumen können als schwerlösliche Rückstände bei der Erdölaufbereitung gewonnen oder aber als Rohstoff abgebaut werden. Asphalte (im technischen Sinne) dagegen stellen Gemische aus Bitumen mit Mineralstoffen dar, die ggf. auch weitere Zuschläge enthalten können [15]. Die Begriffe Bitumen und Bitumenmischungen sind in [121] genormt.

Wesentlich für die Eignung von Bitumen und Asphalt als Dichtbaustoff ist die Tatsache der absoluten Flüssigkeitsdichtheit. Ein weiterer Vorteil dieser Materialien ergibt sich aus der einstellbaren Bandbreite hinsichtlich Dichte und Viskosität sowie der Unlöslichkeit in Wasser [15], [94], [95], [96]. Auch gegenüber salinaren Lösungen wurden diese Eigenschaften nachgewiesen [97].

In den Grundkonzepten A und B für die Schachtverschlüsse Bartensleben und Marie des ERA Morsleben ist der Einsatz von Bitumen/Asphalt als redundantes/diversitäres Dichtmaterial zum Bentonit vorgesehen. Dieses redundante/diversitäre System ist sowohl gegen zusitzende Deckgebirgswässer als auch gegen aus dem Grubengebäude aufsteigende salinare Lösungen auszulegen. Zur Optimierung der Einbringtechnologie (es ist eine Schottersäule vorgesehen deren Porenvolumen mit Bitumen/Asphalt gefüllt wird) ist innerhalb der Ausführungsplanung die begründete Auswahl eines Normbitumens zu treffen und die Zugabemengen von Füllstoffen zu ermitteln. Im Zuge der Konzeptplanung wird basierend auf dem Grundkonzept B für das kombinierte Widerlager-Dichtelement DE 2 von gefülltertem Bitumen B 200 (dessen Dichte ist durch die Zugabe von Füllstoffen auf 1.300 kg/m³ einzustellen) und für das kombinierte Widerlager-Dichtelemente DE 3 von ungefülltertem Bitumen B 80

BfS	Konzeptplanung der Schachtverschlüsse für die Schächte Bartensleben und Marie des ERA Morsleben	
9M/ 223 450 11/GHS/ TF/ 0001/00	Stand: 10.03.2004	Seite 99 von 215

als Dichtmaterialien ausgegangen. Die Dichte des Bitumens B 80 ($\rho = 1.000 \text{ kg/m}^3$) garantiert, dass bei Auftreffen der aufsteigenden salinaren Lösungen aus dem Grubengebäude (Dichte der „Laugen“ $>1,0 \text{ g/cm}^3$) in jedem Fall ein Aufschwimmen des Bitumens im kombinierten Widerlager-Dichtelement DE 3 gewährleistet ist. Umgekehrt werden die Deckgebirgswässer mit einer Dichte $<1,3 \text{ g/cm}^3$ stets auf der beschwerten Asphaltsschicht des kombinierten Widerlager-Dichtelementes DE 2 aufschwimmen.

Die Entscheidung zum Einsatz von Bitumen und Asphalten wurde aufgrund der nachstehenden Materialeigenschaften getroffen [15], [96], [97], [98], [99], [100], [101], [102], [103]:

- sehr gute Dicht- und Versiegelungseigenschaften (technisch dicht),
- viskoses Materialverhalten,
- sehr gut in großer Bandbreite einstellbare Dichten und Viskositäten,
- Abdichtung von Spalten und Rissen,
- Beständigkeit gegenüber Wasser,
- beständig gegenüber organischen und anorganischen Salzen sowie schwachen Säuren und Basen (härtere Bitumen sind gegen chemische Einflüsse resistenter als weiche)
- Beständigkeit gegenüber ionisierender Strahlung

und

- Haftfestigkeit auf fast allen Materialien.

Der Kontakt von Bitumen und Asphalten mit Licht und Sauerstoff führt zu einer oxidativen Bitumenalterung. Dieser Prozess ist durch eine sehr langsam ablaufende Versprödung und Verhärtung des Bitumens/Asphalts gekennzeichnet [97], [104]. Durch den Entzug von Licht z.B. durch untertägigen Einbau kann dieser Vorgang wesentlich reduziert werden, so dass der oxidative Alterungsprozess auf die Materialoberfläche beschränkt bleibt.

Der Abbau von Bitumen und Asphalt kann durch nachstehend aufgeführten Mikroorganismen erfolgen [97], [102]:

- Bakterien,
- Actinomyceten,

- Hefen,

sowie

- Pilze.

Nach [104] sind bitumenabbauende Mikroorganismen allgegenwärtig. Die **mikrobielle Degradation** von Bitumen und Asphalten kann unter **aeroben** oder **anaeroben** Bedingungen [97], [102] erfolgen. Zur Quantifizierung der Aktivität der Mikroorganismen wird das bei den Stoffwechselprozessen entstehende Kohlendioxid genutzt.

Nach [105] wirkt sich das saline Umfeld stark hemmend (ab einer Salinität von >10 Masse-% NaCl sind keine Bakterien bekannt, die unter dieser Bedingung überleben können) auf die mikrobielle Degradation von Bitumen und Asphalt aus.

In Tabelle 16 sind unter Berücksichtigung der in [102] für aerobes bzw. anaerobes Milieu ausgewiesenen Degradationsraten von Bitumen/Asphalten die Bitumen-/Asphaltverluste für den gesamten Nachweiszeitraum von 30.000 Jahren ausgewiesen.

Tabelle 16 : Degradationsverluste von Bitumen/Asphalten im Nachweiszeitraum unter Berücksichtigung aerober und anaerober Verhältnisse bei Angriffsflächen von 100 m²

Degradationsrate	Degradation im Nachweiszeitraum	Bemerkung
[g/m ²]	[t]	
50	150	aerobes Milieu
20	60	aerobes Milieu
0,6	2	anaerobes Milieu
0,2	0,6	anaerobes Milieu

Wenn man die in [104] unter aeroben Bedingungen zugrunde gelegte jährliche mikrobielle Abbaurate von Bitumen von etwa $5,5 \times 10^{-6}$ m über die 30.000 Jahre extrapoliert, würde während dieser Zeit eine Schicht von 0,17 m Bitumen mikrobiell abgebaut.

Die Berechnungsergebnisse zeigen, dass selbst unter konservativer Berücksichtigung der im aeroben Milieu und unter Laborbedingungen maximal ermittelten Degradationsrate von

BfS	Konzeptplanung der Schachtverschlüsse für die Schächte Bartensleben und Marie des ERA Morsleben	
9M/ 223 450 11/GHS/ TF/ 0001/00	Stand: 10.03.2004	Seite 101 von 215

50g/m² die Bitumen-/Asphaltverluste im Nachweiszeitraum um ein Vielfaches geringer sind, als die in der Schottersäule vorhandenen Bitumen-/Asphaltvolumina.

Im Hinblick auf die Langzeitbeständigkeit von Bitumen und Asphalten zeigt die Bildung von Bitumen in der Natur, dass dieses Material als Bestandteil von Erdöl Zeiträume von Hunderten von Millionen Jahren überstehen kann. Das bedeutet, dass spezifische Milieubedingungen (Chemismus, Druck, Temperatur) unter der Erdoberfläche herrschen, welche die Erhaltung der organischen Substanz über den genannten Zeitraum ermöglichen. Bitumen- und Asphaltlagerstätten können deshalb auf Grundlage der nachstehend genannten Punkte als ein natürliches Analogon betrachtet werden [104]:

- die technisch hergestellten Qualitäten des Destillationsbitumens unterscheiden sich in den Eigenschaften nicht von den natürlichen Bitumen,
- unter Endlagerbedingungen unterliegen Bitumen und Asphalte ähnlichen Druck- und Temperaturbedingungen wie in einer Lagerstätte,
- die mineralischen Beimengungen in Bitumen, d.h. die Füllstoffe, können für die Dichtmaterialien so gewählt werden, dass sie vergleichbare Eigenschaften zu denen in natürlich vorkommenden Asphalten aufweisen

und

- die mikrobiellen Milieufaktoren, welche sich in einem Endlager einstellen werden, sind ähnlich denen in einer Erdöllagerstätte.

6.1.4 Nachweis der Langzeitstabilität von Schottern, Kiesen und Sanden

Als Kiese und Sande bezeichnet man verwitterte und anschließend abgelagerte Hartgesteine mit Korndurchmessern für Kies von 2 bis 63 mm und für Sande von 0,063 bis 2 mm [106]. Schotter sind im Festgesteinstagebau abgebaute und anschließend gebrochene Hartgesteine. Die Korngröße von Schotter liegt im Bereich von 25 bis 65 mm.

Hartgesteinsschotter sind hinsichtlich ihrer Setzungsstabilität als Baustoff für die untere Widerlagersäule sowie ihres Lastabtragsverhaltens infolge der Ausbildung des Siloeffektes als Baustoff für die kombinierten Widerlager-Dichtelemente DE 2 und DE 3 und als Bestandteil

BfS	Konzeptplanung der Schachtverschlüsse für die Schächte Bartensleben und Marie des ERA Morsleben	
9M/ 223 450 11/GHS/ TF/ 0001/00	Stand: 10.03.2004	Seite 102 von 215

des Mineralgemischs (Schotter, Kiese, Sande, Bentonit) zur Stabilisierung des Deckgebirges vorgesehen. Die Kiese und Sande werden in verschiedenen Kornabstufungen als Baustoff für Filter- und Ausgleichsschichten eingesetzt.

Die mineralogische Zusammensetzung der Schotter, Kiese, Sande ist abhängig von deren Genese. Die Auswahl von Schottern, Kiesen und Sanden als Baustoffe für die jeweiligen Schachtverschlusselemente muss nach folgenden Kriterien erfolgen:

- die Gewährleistung der Langzeitstabilität des Baustoffes,
- die Setzungsstabilität des gewählten Baustoffes

und

- die Verfügbarkeit des Baustoffes in der Region.

Die Eignung der Baustoffe ist hinsichtlich der Setzungsstabilität und Langzeitstabilität unter Zugrundelegung einschlägiger Normen, z.B. der TECHNISCHEN LIEFERBEDINGUNGEN GLEISSCHOTTER der Deutschen Bahn AG [107] und der bei Schachtverfüllungen mit Schotter gesammelten Erfahrungen im Kali- und Steinsalzbergbau nachgewiesen.

Als natürliche Analoga für die Langzeitbeständigkeit von Hartgesteinen können die Basaltintrusionen im Werra-Kalirevier angesehen [108] werden.

Für die weitere Konzeptplanung wird die Langzeitbeständigkeit und die Setzungsstabilität der eingesetzten Schotter, Kiese, Sande vorausgesetzt.

BfS	Konzeptplanung der Schachtverschlüsse für die Schächte Bartensleben und Marie des ERA Morsleben	
9M/ 223 450 11/GHS/ TF/ 0001/00	Stand: 10.03.2004	Seite 103 von 215

6.2 Bauwerksentwürfe/Planungskonzeption für die Schachtverschlüsse der Schächte Bartensleben und Marie des ERA Morsleben

Als Grundlage für die vorgenommenen gebirgsmechanischen und geohydraulischen Berechnungen zur Nachweisführung der Tragfähigkeit und der Gebrauchstauglichkeit der Schachtverschlussbauwerke wurden, unter Berücksichtigung der in den Kapiteln 5.2.4.1 und 5.2.4.2 erarbeiteten Grundkonzepte A und B sowie der im vorherigen Kapitel dargelegten Ergebnisse zur Langzeitstabilität der einzusetzenden Schachtverschlussbaustoffe, Bauwerksentwürfe für die Schächte Marie und Bartensleben abgeleitet.

Da, wie bereits ausgeführt, derzeit keine gesicherten Erkenntnisse über die Beeinflussung der Bentoniteigenschaften durch in Salzlösungen gelöste C-S-H Phasen vorlagen, musste für beide Schächte auf das in Kapitel 5.2.4.2 beschriebene Grundkonzept B zurückgegriffen werden.

Unter der Berücksichtigung der jeweiligen geologischen und bergbaulichen Situationen in den beiden Schächten sind in Tabelle 17 für die Schachtverschlüsselemente die Einbaulängen sowie die Materialien zusammengefasst. Ergänzend dazu sind in der Anlage 7 und der Anlage 8 die Bauwerksentwürfe für beide Schächte abgebildet.

Tabelle 17 : Bauwerksentwürfe Schächte Marie und Bartensleben

Schachtverschlusselement	Schacht Marie				Schacht Bartensleben				Material
	Einbauteufe		Einbau- länge m	Einbauteufe		Einbau- länge m	Einbauteufe		
	von m unter GOK	bis m unter GOK		von m unter GOK	bis m unter GOK		von m unter GOK	bis m unter GOK	
obere Widerlagersäule	0,00	173,00	173,00	0,00	196,50	196,50	196,50	196,50	Mineralgemisch
Filterschicht I	173,00	176,00	3,00	196,50	199,50	199,50	199,50	3,00	Feinsand, abgestufte Kiese und Sande
Dichtelement DE 1	176,00	253,53	77,53	199,50	258,74	258,74	258,74	59,24	Bentonit (Calcigel)
Filterschicht II	253,53	256,53	3,00	258,74	261,74	261,74	261,74	3,00	Feinsand, abgestufte Kiese und Sande
Widerlager-Dichtelement DE 2	256,53	303,53	47,00	261,74	308,74	308,74	308,74	47,00	Schotter, Asphalt
Filterschicht III	303,53	307,53	4,00	308,74	312,74	312,74	312,74	4,00	Feinsand und Porenraumfüllung mit CaCl ₂ -Lauge
Asphalt-undurchlässiger Kern	307,53	312,03	4,50	312,74	317,23	317,23	317,23	4,50	erdfeuchter Ton
Gussasphalt	312,03	312,53	0,50	317,23	317,74	317,74	317,74	0,50	Gussasphaltplatten
Filterschicht IV	312,53	318,53	6,00	317,74	323,74	323,74	323,74	6,00	Feinsand, abgestufte Kiese und Sande
Widerlager- Dichtelement DE 3	318,53	343,53	25,00	323,74	366,24	366,24	366,24	42,50	Schotter, Asphalt
Filterschicht V	343,53	346,53	3,00	366,24	369,24	369,24	369,24	3,00	Feinsand, abgestufte Kiese und Sande
Schotter mit Porenraumfüllung durch Zementstein	346,53	352,56	6,03	369,24	386,75	386,75	386,75	17,51	Schotter, Solezementstein
untere Widerlagersäule	352,56	522,00	169,44	386,75	526,00	526,00	526,00	139,25	Schotter

BfS	Konzeptplanung der Schachtverschlüsse für die Schächte Bartensleben und Marie des ERA Morsleben	
9M/ 223 450 11/GHS/ TF/ 0001/00	Stand: 10.03.2004	Seite 105 von 215

Die Anforderungen an die bzw. die Funktionen der in den Bauwerksentwürfen dargestellten Schachtverschlüsselemente können wie folgt zusammengefasst werden:

obere Widerlagersäule:

Die obere Widerlagersäule dient zur Stützung des Schachtstoßes und ist aus einem setzungsarmen Mineralgemisch aufgebaut. Zusätzlich sollte die hydraulische Leitfähigkeit des Mineralgemischs im Bereich der geringsten hydraulischen Leitfähigkeit des Deckgebirges liegen, um Zuflüsse aus dem Deckgebirge zu minimieren.

Filterschicht I:

Die Filterschicht I besteht aus abgestuften Kiesen, Sanden, Feinsanden und trennt das Dichtelement DE 1 von der oberen Widerlagersäule.

Dichtelement DE 1:

Durch das Dichtelement DE 1 erfolgt die Abdichtung des Grubengebäudes gegen Zuflüsse aus dem Deckgebirge. Als Dichtmaterial wird Bentonit eingesetzt. Durch die Verwendung dieses Dichtmaterials erfolgen die Abdichtung des freien Schachtquerschnittes und die Abdichtung der Kontaktzone zwischen Gebirge und Dichtelement durch den sich bei Flüssigkeitsaufnahme im Bentonit einstellenden Quelldruck.

Filterschicht II:

Die Filterschicht II besteht aus abgestuften Kiesen, Sanden, Feinsanden und trennt das Dichtelement DE 1 von dem kombinierten Widerlager-Dichtelement DE 2.

kombiniertes Widerlager-Dichtelement DE 2:

Über die Schottersäule des kombinierten Widerlager-Dichtelementes DE 2 erfolgt der Lastabtrag der Belastungen von oben und/oder unten in das Gebirge. Die Porenräume der Schottersäule werden mit Asphalt/Bitumen ausgefüllt, so dass das kombinierte Widerlager-Dichtelement DE 2 neben dem Lastabtrag den Zufluss von Deckgebirgswässern in das Grubengebäude verhindert. Bitumen/Asphalt wird somit als redundante und diversitäre Dichtung zum Bentonit (Dichtelement DE 1) wirksam. Zur Gewährleistung der dauerhaften Abdichtung des freien Schachtquerschnittes gegenüber

BfS	Konzeptplanung der Schachtverschlüsse für die Schächte Bartensleben und Marie des ERA Morsleben	
9M/ 223 450 11/GHS/ TF/ 0001/00	Stand: 10.03.2004	Seite 106 von 215

Deckgebirgswässern muss die Dichte des Bitumen/Asphaltes größer als die der zutretenden Deckgebirgswässer (gefüllter B 200, $\rho = 1.300 \text{ kg/m}^3$) sein.

Die Trennung der beiden kombinierten Widerlager-Dichtelemente erfolgt durch einen asphaltdichten Kern, welcher, zwischen den beiden genannten Schachtverschlusselementen angeordnet, aus folgenden Komponenten aufgebaut ist

Filterschicht III:

Die Filterschicht III besteht aus Feinsand und stabilisiert den Asphalt des kombinierten Widerlager-Dichtelementes DE 2 in seiner Lage. Weiterhin ist die Sättigung der Filterschicht mit CaCl_2 -„Lauge“ als Maßnahme gegen das Austrocknen des Tones vorgesehen.

Tonschicht:

Die Tonschicht ist das redundante und diversitäre Element für die Filterschichten III und IV.

Gussasphaltplatten:

Die unterhalb der Tonschicht einzubauenden Gussasphaltplatten sind als Maßnahme gegen das Austrocknen des Tones vorgesehen.

Filterschicht IV:

Die Filterschicht IV ist aus abgestuften Kiesen, Sanden und Feinsanden (Aufbau von unten nach oben) aufgebaut. Durch die stufenweise Verringerung der hydraulischen Leitfähigkeit in der Filterschicht wird der Asphalt des kombinierten Widerlager-Dichtelementes DE 3 im Falle einer möglichen Fluiddruckbelastung von unten in seiner Lage gehalten.

kombiniertes Widerlager-Dichtelement DE 3:

Das kombinierte Widerlager-Dichtelement DE 3 ist analog dem kombinierten Widerlager-Dichtelement DE 2 aufgebaut. Es dichtet den Schacht gegen aufsteigende saline Lösungen aus dem Grubengebäude ab. Zur Gewährleistung der dauerhaften Abdichtung des freien Schachtquerschnittes gegenüber aus dem Grubengebäude aufsteigenden salinaren Lösungen muss die Dichte des Bitumen/Asphaltes kleiner als die

BfS	Konzeptplanung der Schachtverschlüsse für die Schächte Bartensleben und Marie des ERA Morsleben	
9M/ 223 450 11/GHS/ TF/ 0001/00	Stand: 10.03.2004	Seite 107 von 215

der aufsteigenden „Laugen“ (Aufschwimmen des Bitumen/Asphaltes auf den salinaren Lösungen) sein. Deshalb wird in den Nachweisführungen von einem ungefüllerten B 80 ($\rho = 1.000 \text{ kg/m}^3$) ausgegangen.

Filterschicht V:

Die Filterschicht V ist aus abgestuften Kiesen, Sanden und Feinsanden aufgebaut. Durch die stufenweise Verringerung der hydraulischen Leitfähigkeit in der Filterschicht wird der Asphalt des kombinierten Widerlager-Dichteletes DE 3 in seiner Lage gehalten.

Die untere Widerlagersäule besteht von der Unterkante der Filterschicht V bis zur Unterkante des obersten Füllortes aus einem

setzungsarmen Schotter mit einer Poren-Solezementsteinfüllung

Durch die Auffüllung des Porenraumes des setzungsarmen Schotters mit einer Solezementsuspension entsteht ein redundantes und diversitäres Element zur Filterschicht V. Durch den Verschluss des Porenraumes in der Schottersäule wird bei Versagen der Filterschicht V das Abfließen des Asphalts aus dem kombinierten Widerlager-Dichtelet DE 3 verhindert und somit dessen Gebrauchstauglichkeit über den Nachweiszeitraum gewährleistet. Sollte der Lösungsspiegel die Solezementsteinschicht erreichen, wird nach der Korrosion des Solezementsteins das Bitumen/Asphalt aufgrund seiner den salinaren Lösungen gegenüber geringeren Dichte aufschwimmen, so dass die Gebrauchstauglichkeit des kombinierten Widerlager-Dichteletes DE 3 dauerhaft erhalten bleibt.

Außerdem verbessert dieser kohäsive Abschnitt der unteren Widerlagersäule die Auslaufsicherheit und dient insgesamt der Stabilisierung der Verfüllsäule. Von diesen Eigenschaften wird im Rahmen der geomechanischen und geohydraulischen Nachweisführungen kein Kredit genommen.

und bis zur Endteufe des Schachtes

BfS	Konzeptplanung der Schachtverschlüsse für die Schächte Bartensleben und Marie des ERA Morsleben	
9M/ 223 450 11/GHS/ TF/ 0001/00	Stand: 10.03.2004	Seite 108 von 215

aus setzungsarmen Schotter

Dieser Abschnitt der unteren Widerlagersäule besteht aus einem setzungsarmen Schotter und dient zur Lagestabilisierung der Füllsäule.

Eine Besonderheit für den Schacht Marie stellte die zusätzlich angeschlagene Zwischensohle bei 310 m Teufe dar. Diese wurde vermutlich bei den Abteufarbeiten aufgeschlossen, um die salzspiegelnahen Kalivorkommen abzubauen. Der Abbau wurde gewendet um den Schacht herum aufzufahren, woraus die Bezeichnung *Korkenzieherwendel* für diesen Grubenbau, der bis ca. 20 m unterhalb des Salzspiegels reicht, herrührt. Die Zwischensohle und die angeschlossene Korkenzieherwendel ist vorzeitig (vor Beginn der eigentlichen Schachtverfüllung) mit geeigneten Materialien zu versetzen.

Bei der Materialauswahl ist zu berücksichtigen, dass die ursprünglichen Eigenschaften des unverritzten Salinargebirges insbesondere in Hinblick auf die hydraulischen Kennwerte (hydraulische Leitfähigkeit) wiederhergestellt werden. Bei den weiteren Betrachtungen wurde von der vollständigen Wiederherstellung der Steinsalzeigenschaften im Ausbruchsbereich der Korkenzieherwendel ausgegangen.

6.3 Gebirgsmechanische Untersuchungen zum Tragfähigkeits- und Gebrauchstauglichkeitsnachweis

6.3.1 **Bemessungsziele und Kriterien für die geomechanischen Nachweisführungen**

Die Bemessung der konzipierten Schachtverschlüsse erfolgte unter dem Aspekt der Gewährleistung von Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit. Entsprechend den in den Gefährdungsbildern erfassten geomechanischen Belastungen des Systems Verschlussbauwerk/Gebirge, die aus dem Eigengewicht der Verfüllsäule, dem Fluiddruck, dem Gebirgsdruck und dem Quelldruck resultieren, ergeben sich folgende Bemessungsziele:

- Lastabtrag der aus dem Fluiddruck resultierenden mechanischen Belastungen,
- Beanspruchungen von Bauwerk und Gebirge in zulässigen Bereichen,

BfS	Konzeptplanung der Schachtverschlüsse für die Schächte Bartensleben und Marie des ERA Morsleben	
9M/ 223 450 11/GHS/ TF/ 0001/00	Stand: 10.03.2004	Seite 109 von 215

- Vertikalverschiebungen/vertikale Deformationen der Dichtbereiche in zulässigen Bereichen

sowie

- Auslaufsicherheit der Verfüllsäule in den Füllorten.

Der Nachweis, dass die Bemessungsziele erreicht wurden, erfolgte mittels der folgenden Kriterien:

Kriterium 1:

Statischer Gleichgewichtszustand des Schachtverschlussbauwerkes

Die Voraussetzung für die Tragfähigkeit des Schachtverschlussbauwerkes ist, dass das Bauwerk bei allen Belastungsszenarien in einem statischen Gleichgewichtszustand verbleibt.

Kriterium 2:

Lastabtrag der vertikalen Belastungen bei einem Fluiddruck von oben und/oder von unten in das Gebirge

Für den **Nachweis des Lastabtrages bei einer Fluiddruckbelastung von oben** ist es erforderlich, dass die Beträge der Vertikalspannungen in den lastabtragenden Elementen (vorrangig das kombinierte Widerlager-Dichtelement DE 2, zusätzlich das kombinierte Widerlager-Dichtelement DE 3) sich dem Niveau der Vertikalspannungen im Einbauzustand, d.h. bei einer vertikalen Belastung nur durch die Eigenmasse mit einer Berücksichtigung des Siloeffektes, annähern.

Der **Nachweis des Lastabtrages bei Fluiddruck von oben und unten bzw. nur von unten** (konservativer, theoretischer Lastfall) ist erbracht, wenn die Beträge der Vertikalspannungen im lastabtragenden Element kleiner als die Beträge der Vertikalspannungen an der Oberkante des lastabtragenden Elementes sind.

Kriterium 3:

Zulässigkeit der Beanspruchungen von Bauwerk und Gebirge

Der Nachweis erfolgt einerseits für das Bauwerk (**Kriterium 3.1**)

mittels des **MOHR-COULOMB-BRUCHKRITERIUMS** (siehe Abschnitt 6.3.2).

BfS	Konzeptplanung der Schachtverschlüsse für die Schächte Bartensleben und Marie des ERA Morsleben	
9M/ 223 450 11/GHS/ TF/ 0001/00	Stand: 10.03.2004	Seite 110 von 215

Andererseits geschieht die Nachweisführung für das Gebirge (**Kriterium 3.2**) wie folgt:

Gebirgsbereiche ***Dogger/ Schluff/ Tonstein/ Mergel und Hutgestein:***

Bewertung der berechneten Beanspruchungszustände mittels des **FRAC-KRITERIUMS**, d.h. für die kleinste Hauptnormalspannung σ_3 (Zugspannungen positiv) an der Kontur gilt: $\sigma_3 < \sigma_Z$ (σ_Z : einaxiale Zugfestigkeit), sowie mittels des **MOHR-COULOMB-BRUCHKRITERIUMS**,

Gebirgsbereich des ***Salinars:***

Bewertung der berechneten Beanspruchungszustände mittels des **DILATANZKRITERIUMS** (nach [109] bzw. [110], siehe Abschnitt 6.3.2) sowie des **FRAC-KRITERIUMS**.

Kriterium 4:

Maximal zulässige Vertikalverschiebungen (Gebrauchstauglichkeit)

Die geomechanisch bedingte Gefährdung der Gebrauchstauglichkeit beruht, neben den im nachfolgenden Kriterium 5 erfassten Gefahren, auf den Vertikalverschiebungen im Bereich des Dichtelementes DE 1. Die vertikalen Verschiebungen können zu einer Änderung der Dichte des Dichtmaterials Bentonit im Dichtelement DE 1 und damit des Quelldruckes p_Q führen.

Für die Gewährleistung der abdichtenden Wirkung des aus Bentonit bestehenden Dichtelementes DE 1 und zur Vermeidung von FRAC-Erscheinungen ist die Einstellung des Quelldruckes p_Q in einem Bereich $1 \text{ MPa} < p_Q < p_{QK}$ erforderlich. Der maximal zulässige Quelldruck p_{QK} ergibt sich aus der Anforderung, dass an der Schachtkontur keine zum FRAC führenden tangentialen Zugspannungen auftreten. Folglich müssen die vom Quelldruck (p_{QK}) und der mechanischen Belastung des Dichtelementes DE 1 (Wirkung der effektiven Radialspannungen im Kontakt: $\sigma_r(r = r_0)$) hervorgerufenen tangentialen Zugspannungen ($p_{QK} - \sigma_r(r = r_0)$: elastische Lösung für einen kreisrunden Hohlraum unter Innendruck (Druckspannungen negativ)) kleiner als der Betrag der aus der Gebirgsdruckwirkung resultierenden effektiven Tangentialspannungen $\sigma_t(r = r_0)$ (Druckspannungen) sein. Man erhält somit bei einer konservativen Vernachlässigung der Zugfestigkeit des Gebirges die Bedingung $p_{QK} - \sigma_r(r = r_0) < -\sigma_t(r = r_0)$.

BfS	Konzeptplanung der Schachtverschlüsse für die Schächte Bartensleben und Marie des ERA Morsleben	
9M/ 223 450 11/GHS/ TF/ 0001/00	Stand: 10.03.2004	Seite 111 von 215

Für beide Schächte ergibt sich hieraus der maximal zulässige Quelldruck $p_{QK} \approx 6 \text{ MPa}$.

Die in Folge der Vertikalverschiebung der Ober- und Unterkante des Dichtelementes DE 1 sich ändernde Dichte muss folglich, bezogen auf die Trockenrohdichte ρ_{DEIt} , im Bereich $1.200 \text{ kg/m}^3 < \rho_{DEIt} < 1.600 \text{ kg/m}^3$ verbleiben (siehe Abschnitt 6.4.3.2).

Kriterium 5:

Nachweis der Haftung des Dichtmaterials am Gebirge im Kontaktbereich der Dichtelemente

Der Nachweis der dauerhaften Abdichtung der Kontaktzone zwischen den Dichtmaterialien und dem Gebirge ist erbracht, wenn Haftreibung in der Kontaktfuge vorhanden ist, also kein Übergang zur Gleitreibung auftritt oder die Radialspannungen im Kontaktbereich größer als der Fluidruck sind.

Kriterium 6:

Tragfähigkeit und Setzung im Füllortbereich

Die Tragfähigkeit ist nachgewiesen, wenn sich bei den geomechanischen Untersuchungen ein statischer Gleichgewichtszustand im Füllortbereich ergibt sowie die Beanspruchungen in zulässigen Bereichen verbleiben (**Kriterium 6.1**).

Weiterhin dürfen die zusätzlichen Vertikalverschiebungen im Füllortbereich nicht zu einer Gefährdung der Gebrauchstauglichkeit führen (**Kriterium 6.2**).

6.3.2 Vorgehensweise bei der geomechanischen Modellierung

Das mechanische Verhalten der Verfüllsäule und des umgebenden Gebirges wurde in Abhängigkeit von den in der Gefährdungsanalyse ermittelten mechanischen Belastungen, die aus dem Eigengewicht der Verfüllsäule, dem Fluidruck, dem Quelldruck des Bentonites und dem Gebirgsdruck resultieren, analysiert.

Hierbei erfolgte konservativ die Betrachtung der im Nachweiszeitraum auftretenden extremen Belastungssituationen. Diese ergaben sich aus der mechanischen Druckbelastung der Dichtelemente und der Schachtkontur

BfS	Konzeptplanung der Schachtverschlüsse für die Schächte Bartensleben und Marie des ERA Morsleben	
9M/ 223 450 11/GHS/ TF/ 0001/00	Stand: 10.03.2004	Seite 112 von 215

- **von oben**

(Diese Druckbelastung resultiert aus der Flüssigkeitssäule von der Oberkante der Dichtelemente bis zur Geländeoberkante, dem Eigengewicht bei Berücksichtigung des Siloeffektes und dem Quelldruck im Dichtelement DE 1.)

und

- **von unten**

(Diese Druckbelastung ergibt sich aus dem Gas-/Fluiddruck im Grubengebäude.).

Weiterhin wurden die Belastungen der Schachtverschlüsselemente durch den Gebirgsdruck, der infolge der rheologischen Eigenschaften des Salinargebirges nach Einbau der Verschlussmaterialien einsetzt, analysiert.

Der erste Teil der geomechanischen Untersuchungen beruhte auf der Modellierung der gesamten Schachtverfüllung (Gesamtmodell).

Eine detaillierte Betrachtung der hinsichtlich des mechanischen Verhaltens wesentlichen Bereiche der Verfüllsäule, d.h. der kombinierten Widerlager-Dichtelemente und der Füllortbereiche mittels entsprechender Teilmodelle, geschah im zweiten Teil der Untersuchungen.

Dieser zweite Teil der Nachweisführung besteht aus Sicherheitsanalysen und aus Prognosen des Sicherheitsniveaus des kombinierten Widerlager-Dichtelementes DE 2 mittels eines Teilmodells.

Die Sicherheitsanalyse umfasste Berechnungen mit abgeminderten Festigkeitsparametern der Verfüllsäule, abgeminderter Reibung in der Kontaktfuge und verminderter Steifigkeit von Verfüllmaterial und Gebirge. Die Abminderung erfolgte mit dem Teilsicherheitsbeiwert $\gamma = 1,5$ (siehe z.B. [42]). Da für die Lastannahmen bereits die maximal möglichen Werte verwendet wurden, war eine Sicherheitsanalyse mit überhöhter Belastung nicht notwendig.

Die Abschätzung des Sicherheitsniveaus mittels des Teilmodells erfolgte durch eine Sensitivitätsanalyse der Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit des kombinierten Widerlager-Dichtelementes DE 2 hinsichtlich der wesentlichen mechanischen Modellparameter (Reibung in der Kontaktzone, Festigkeitsparameter des Schotter/Asphalt-Gemisches, Verformungsverhalten des Schotter/Asphalt-Gemisches sowie des Gebirges (Hutgestein, Salinar)).

BfS	Konzeptplanung der Schachtverschlüsse für die Schächte Bartensleben und Marie des ERA Morsleben	
9M/ 223 450 11/GHS/ TF/ 0001/00	Stand: 10.03.2004	Seite 113 von 215

Mit einem weiteren Teilmodell, welches einen charakteristischen Füllortbereich beschreibt, wurde der Einfluss der Füllörter auf die Tragfähigkeit der Verfüllsäule und das Setzungsverhalten im Füllortbereich untersucht.

Die Betrachtung des geomechanischen Verhaltens des Schachtes erfolgte zu folgenden Zeitpunkten:

- Abteufen des Schachtes,
- nach einer Standzeit von 100 a (konservativ ohne Berücksichtigung des Ausbaus) und nach folgendem Nachriss der Kontur um 0,75 m (Entfernung der geschädigten Zone),
- nach dem Einbau der Verfüllsäule (1 Jahr nach dem Nachriss der Schachtkontur),
- nach der Fluiddruckbelastung entsprechend der Belastungsszenarien

sowie

- zum Ende des Nachweiszeitraumes (nach 30.000 Jahren, Aufbau eines Gebirgsdruckes durch das Kriechen des Salinars).

Die Berechnungsergebnisse der geomechanischen Untersuchungen und deren Bewertung mit den in Kapitel 6.3.1 beschriebenen Kriterien zur geomechanischen Nachweisführung wurden für zwei Referenzlastfälle ausführlich in [73] beschrieben.

Auf dieser Grundlage wurden der Tragfähigkeitsnachweis und der Gebrauchstauglichkeitsnachweis aus geomechanischer Sicht erbracht. Der Gebrauchstauglichkeitsnachweis aus geohydraulischer Sicht erfolgt in Kapitel 6.4.

6.3.3 Modellgeometrien und Randbedingungen

Die Geometrie des Schachtes, die Materialeigenschaften der Verfüllsäule und die Gebirgseigenschaften erlaubten eine rotationssymmetrische Modellierung mit der Schachtachse als Symmetrieachse (vgl. Abbildung 19).

Die geomechanischen Betrachtungen erfolgten am Modell des Schachtes Marie. Dieser Bauwerksentwurf stellt hinsichtlich der geringeren Einbaulänge des Schachtverschlusselementes **Widerlager-Dichtelement DE 3** und **des geringeren vertikalen Abstandes zum oberen Füllort** den konservativen Betrachtungsfall dar. Aufgrund der vergleichbaren geomechani-

BfS	Konzeptplanung der Schachtverschlüsse für die Schächte Bartensleben und Marie des ERA Morsleben	
9M/ 223 450 11/GHS/ TF/ 0001/00	Stand: 10.03.2004	Seite 114 von 215

schen Verhältnisse an den Schächten Marie und Bartensleben können die Ergebnisse der geomechanischen Berechnungen für den Schacht Marie auf den Schacht Bartensleben übertragen werden. Die geohydraulischen Nachweise sind für beide Schächte gültig.

Das Gebirge wurde für den betrachteten Schacht Marie durch die drei homogen angesetzten Schichten

Schicht 1: Dogger/Schluff/Tonstein/Mergel,

Schicht 2: Hutgestein

und

Schicht 3: Salinar,

mit ausreichender Genauigkeit beschrieben.

Es erfolgte die Modellierung der wesentlichen Teile der Verfüllsäule:

- unterer Teil der unteren Widerlagersäule,
- oberer Teil der mit Solezementstein verfüllten unteren Widerlagersäule,
- unteres kombiniertes Widerlager-Dichtelement DE 3,
- Übergangsbereich zwischen den Widerlager-Dichtelementen DE 2 und DE 3,
- oberes kombiniertes Widerlager-Dichtelement DE 2,
- Dichtelement DE 1

und

- obere Widerlagersäule.

Die gering mächtigen Filterschichten wurden den angrenzenden Elementen zugeordnet.

Der Schachtradius betrug bei Simulationsbeginn („Abteufen des Schachtes“, kein Ausbau) 3,25 m. Nach 100 Jahren Standzeit, vor dem Einbau der Verfüllsäule, wurde konservativ ein Nachriss der Schachtkontur um 0,75 m simuliert. Es ergab sich summarisch ein Radius im Einbauzustand von $r_0 = 4,0$ m.

Das im Rahmen des Sicherheitsnachweises und der Sensitivitätsanalyse verwendete Teilmodell für das kombinierte Widerlager-Dichtelement DE 2 illustriert die Abbildung 20.

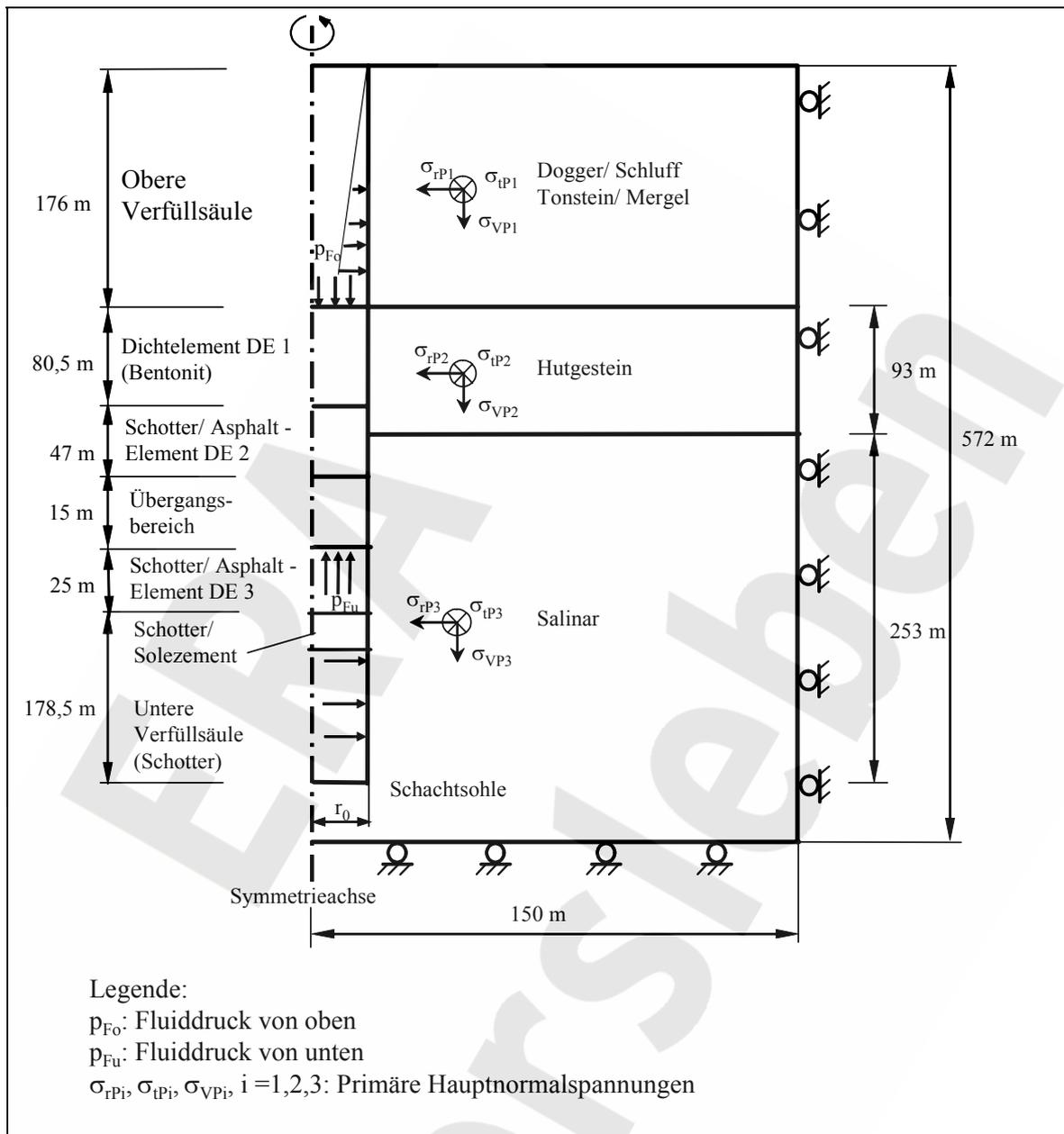


Abbildung 19: Geometrie und Randbedingungen des Gesamtmodells

Die Betrachtungen zum Einfluss der sich im Bereich der unteren Widerlagersäule befindlichen Füllorte auf die Setzungen der Verfüllsäule beruhen auf einem weiteren Teilmodell. Aufgrund fehlender detaillierter Angaben wurden folgende prinzipielle Varianten der Füllortgeometrie untersucht:

- Füllorte mit rechteckigem Vertikalschnitt

und

- Füllorte mit trapezförmigem Vertikalschnitt (vgl. Abbildung 21).

Einzelheiten wie Geometrien, Stoffgesetze, mechanische Formulierung der Versagenskriterien, Materialdaten usw. sind detailliert im Sicherheits- und Nachweiskonzept beschrieben [73].

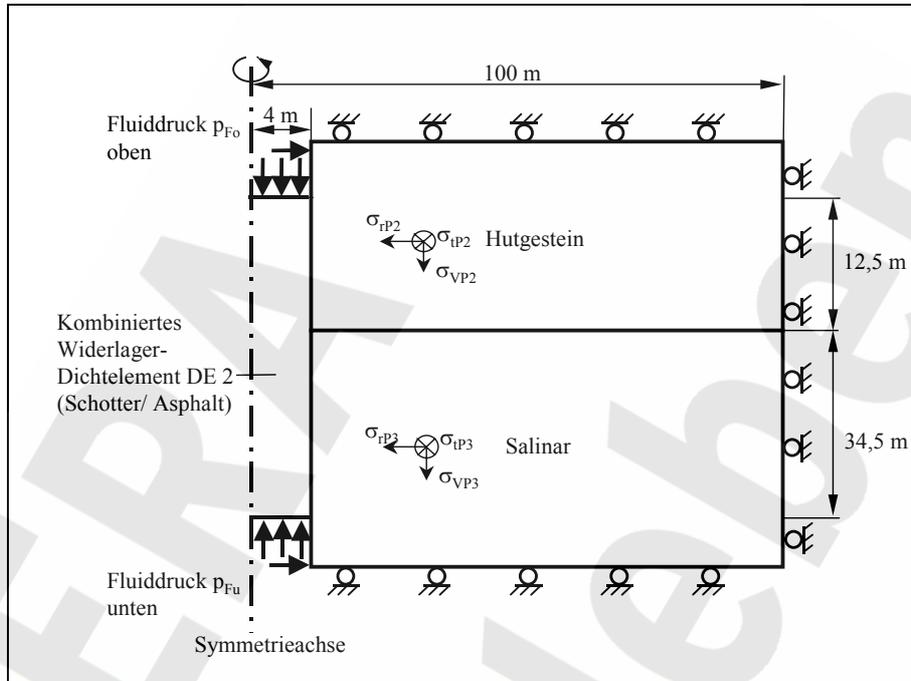


Abbildung 20: Modellgeometrie des Teilmodells für den Bereich des kombinierten Widerlager-Dichteelementes DE 2

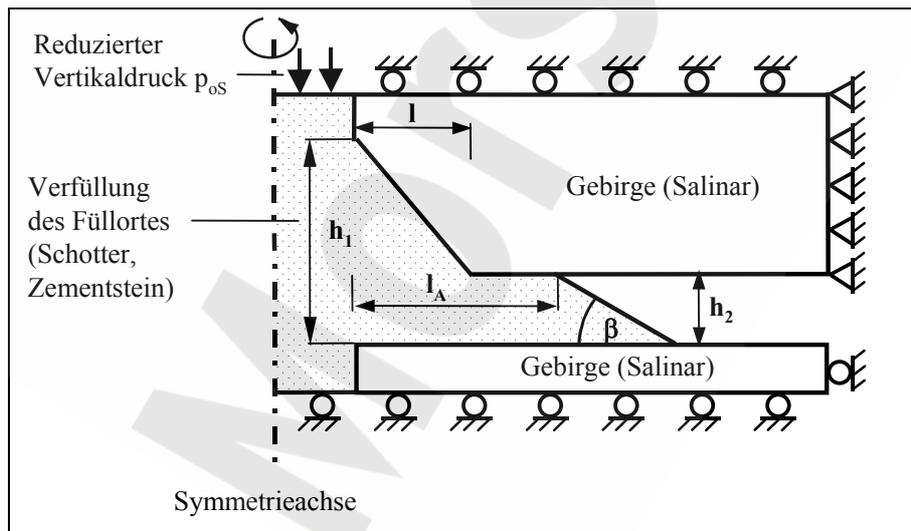


Abbildung 21: Geometrie und Randbedingungen für ein trapezförmiges Füllort

6.3.4 Numerische Modellierung mit dem Programmsystem FLAC

Die numerische Umsetzung erfolgte mit Hilfe des FDM-Programmsystems FLAC der Firma ITASCA [111]. Es wurde das in FLAC vorhandene Modul zur rotationsymmetrischen Modellierung verwendet.

Abbildung 22 und Abbildung 23 illustrieren die Modellgeometrie in FLAC für die Berechnungsvarianten „Gesamtmodell“ und „Teilmodell DE 2“.

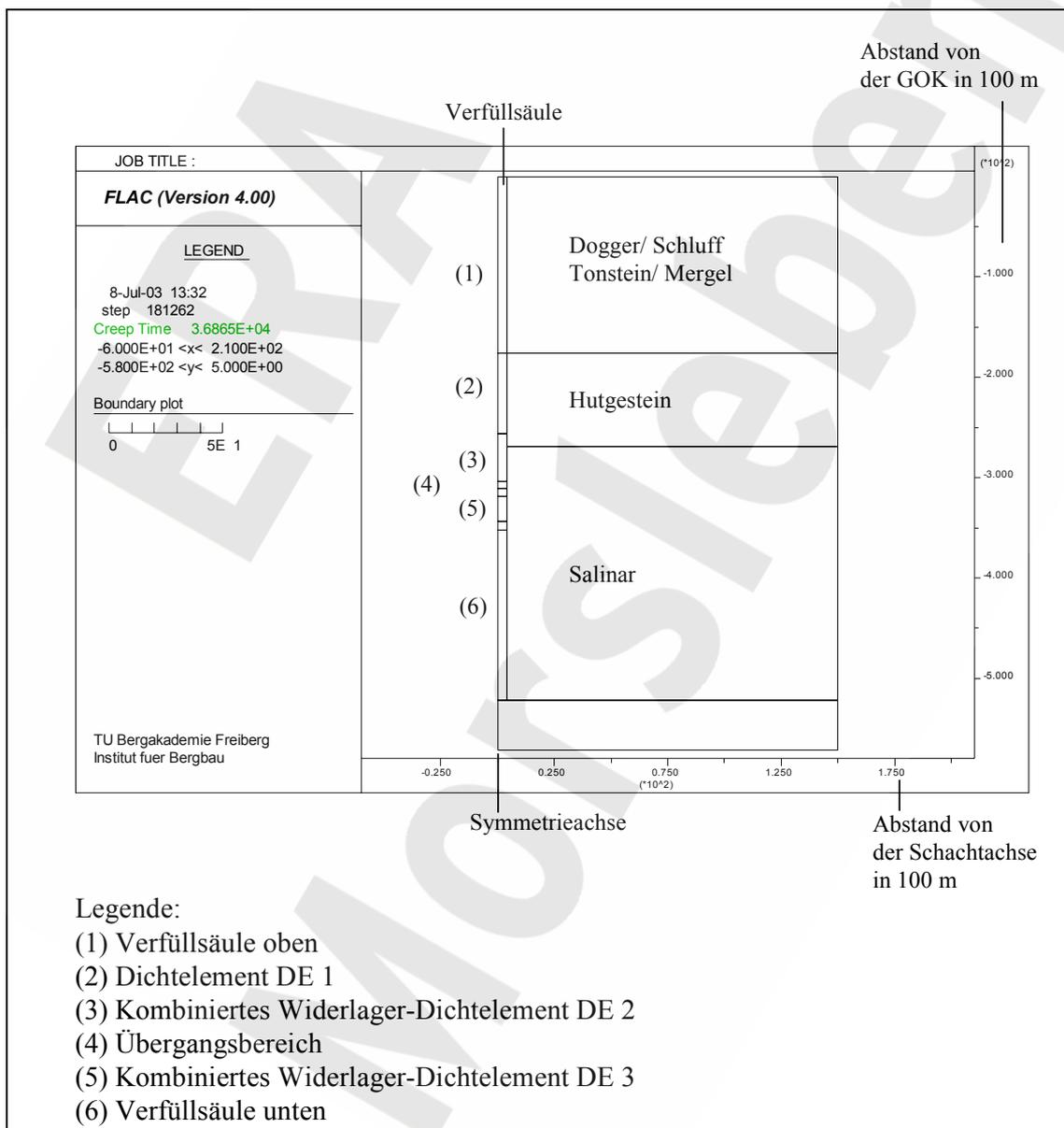


Abbildung 22: Numerische Modellierung des Gesamtmodells Schacht Marie in FLAC

Die FDM-Vernetzung der Verfüllsäule und des umgebenden Gebirges für das Gesamtmodell ist für

- die Bereiche der oberen Widerlagersäule, Dichtelement DE 1, kombiniertes Widerlager-Dichtelement DE 2 in Anlage 15, Blatt 1 in [73]

und

- die Bereiche des Übergangsbereichs zwischen den beiden kombinierten Widerlager-Dichtelementen DE 2 und DE 3, des unteren kombinierten Widerlager-Dichtelementes DE 3 und der unteren Verfüllsäule in der Anlage 15, Blatt 2 in [73] dokumentiert.

In analoger Weise wurden die in Abschnitt 6.3.3 beschriebenen Teilmodelle mittels FLAC numerisch umgesetzt. Die entsprechende Diskretisierung verdeutlicht die Abbildung 23 für den Bereich des kombinierten Widerlager-Dichtelementes DE 2.

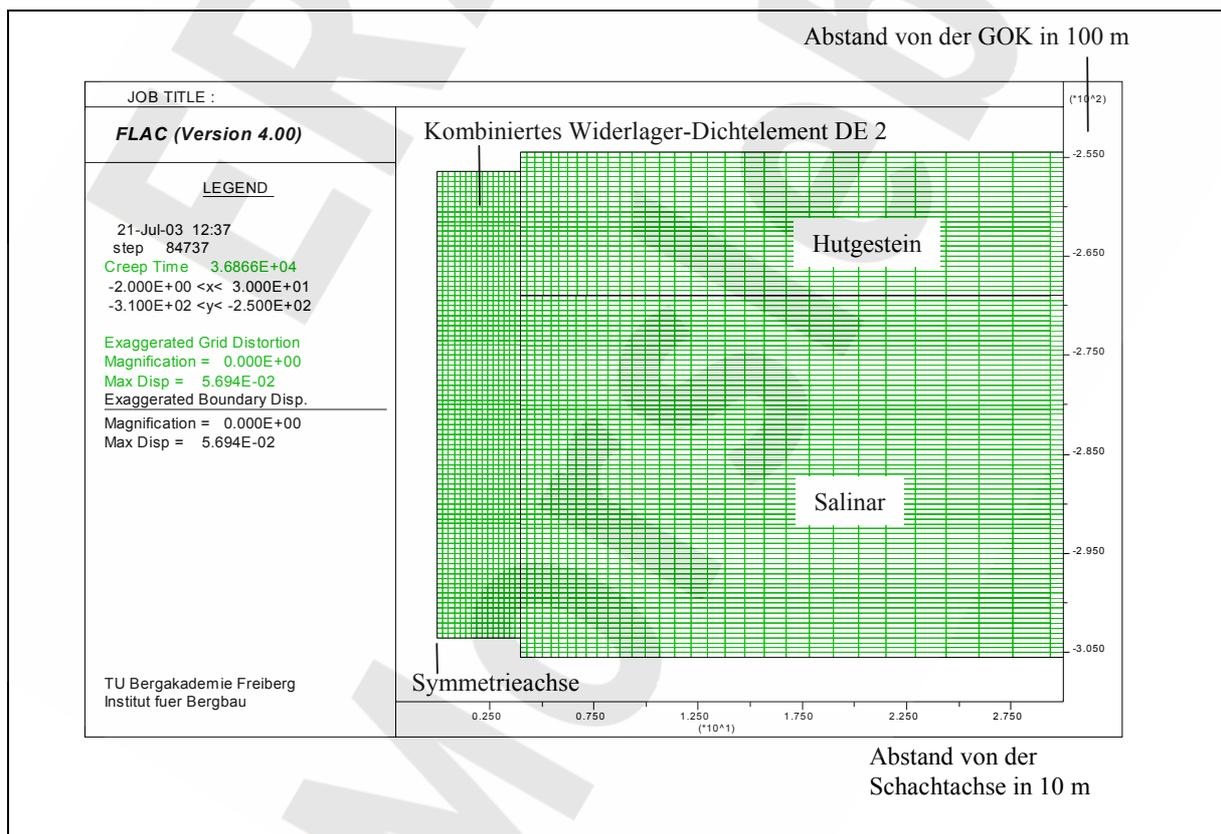


Abbildung 23: Numerische Modellierung des Teilmodells des kombinierten Widerlager-Dichtelementes DE 2 in FLAC (Vernetzung)

Die Untersuchungen zum Einfluss der Füllörter beruhen auf dem in Abbildung 24 dargestellten FLAC-Modell.

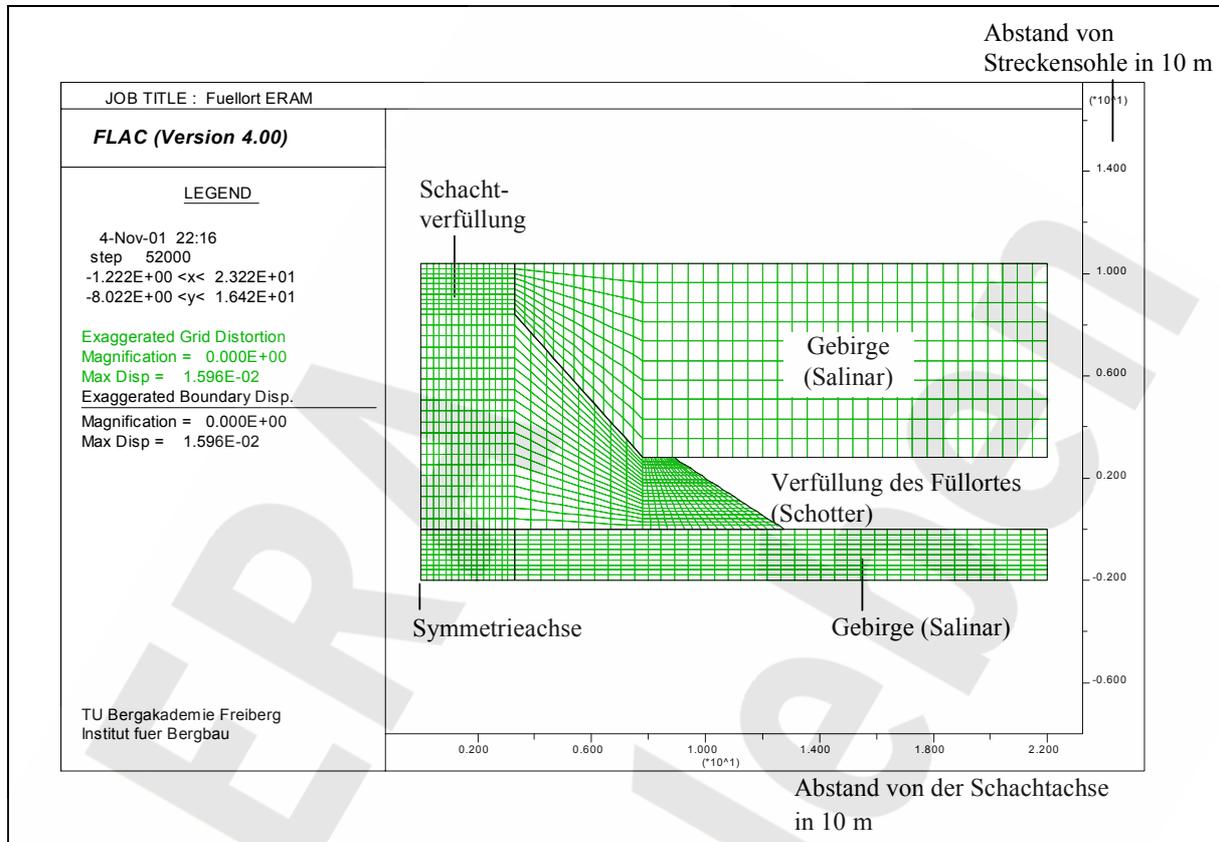


Abbildung 24: Numerische Modellierung eines trapezförmigen Füllortes in FLAC

Das Spannungs-/Verformungsverhalten wurde mit Hilfe des in FLAC implementierten elastoplastischen Stoffgesetzes mit einem **MOHR-COULOMB-BRUCHKRITERIUM** modelliert.

Die Simulation der primären Gebirgsspannungen erfolgte mittels der in FLAC möglichen elementweisen Zuordnung der Hauptnormalspannungen.

Für die Auswertung der Berechnungsergebnisse wurden weitgehend die in FLAC vorhandenen Visualisierungsroutinen verwendet.

BfS	Konzeptplanung der Schachtverschlüsse für die Schächte Bartensleben und Marie des ERA Morsleben	
9M/ 223 450 11/GHS/ TF/ 0001/00	Stand: 10.03.2004	Seite 120 von 215

6.3.5 Belastungsszenarien und Berechnungsfälle

Wie bereits im Abschnitt 6.3.2 erwähnt, erfolgten die geomechanischen Untersuchungen zum Beanspruchungs- und Deformationszustand zu unterschiedlichen Zeitpunkten vor und nach dem Einbau der Verfüllsäule, d.h. konkret

- nach dem Schachtabteufen (*Berechnungsfall A 0*),
- nach 100 Jahren Standzeit des Schachtes, Nachriss der Kontur sowie 1 Jahr Standzeit bis zum Einbau der Verfüllsäule (*Berechnungsfall E 0*),
- nach dem Einbau der Verfüllsäule, ohne vertikale Belastung durch Fluiddruck und Quelldruck (*Berechnungsfall E 1*),
- bei einer Fluiddruckbelastung entsprechend der nachfolgend erläuterten Belastungsszenarien (*Berechnungsfälle LF 1 bis LF 6*)

und

- im Endzustand nach 30.000 Jahren nach dem Aufkriechen des Salinargebirges auf die Verfüllsäule (*Berechnungsfälle GE 1, GLF 1, GLF 2, GLF 6*).

Die Belastungsszenarien resultieren aus dem Fluiddruck von oben (Deckgebirge) und/oder einem Fluiddruck von unten (aus dem Grubengebäude).

In Abhängigkeit von der Angriffsfläche des Fluiddruckes ergeben sich unterschiedliche Belastungsszenarien. Die Abbildung 25 illustriert die relevanten Angriffsflächen der aus dem Fluiddruck resultierenden mechanischen vertikalen Belastungen.

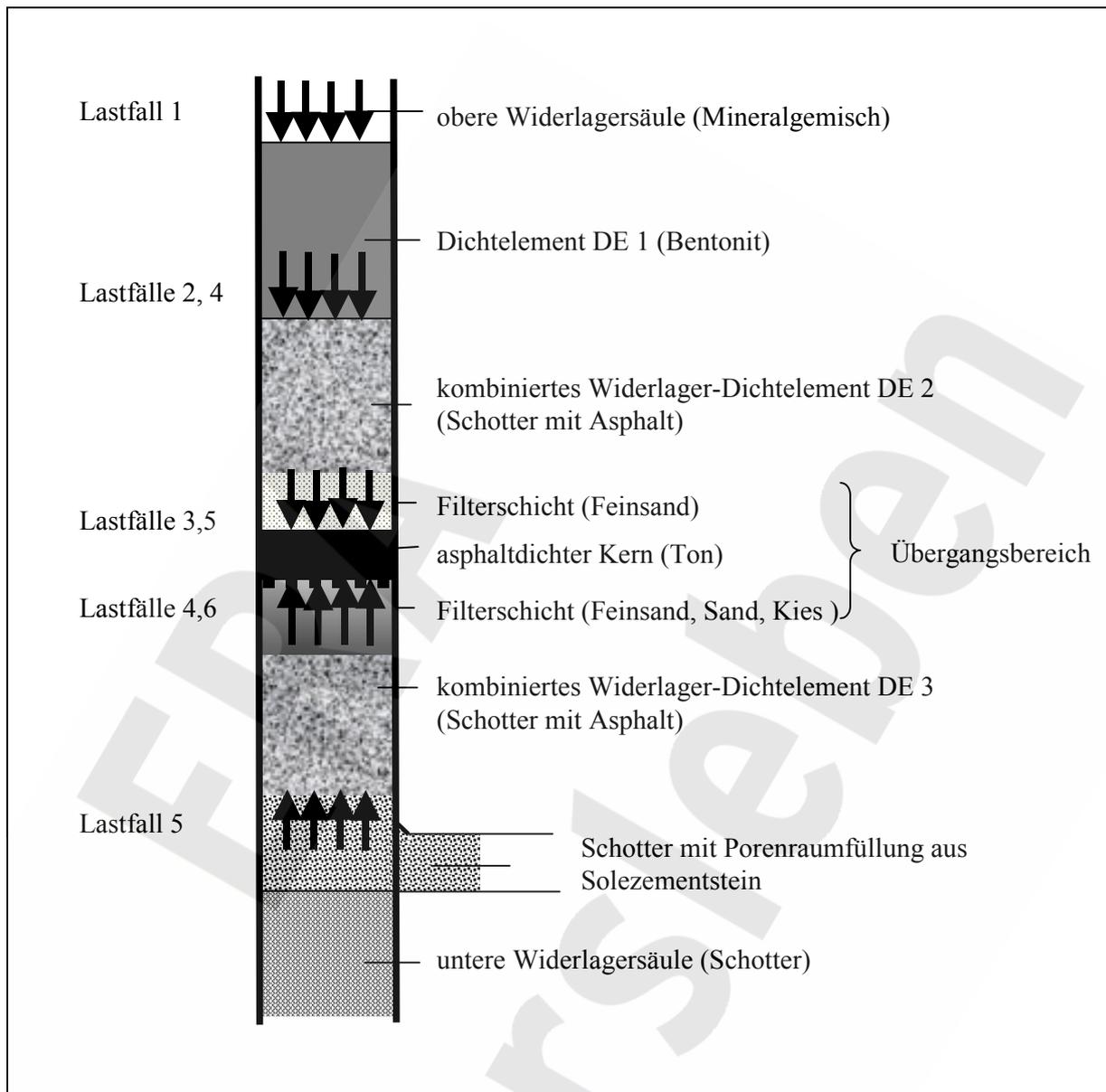


Abbildung 25: Prinzipskizze der Lastangriffsflächen des Fluiddruckes von oben und unten
In Abhängigkeit von den Angriffsflächen der aus dem Fluiddruck resultierenden mechanischen vertikalen Lasten:

- Lastangriff (Fluiddruck von oben) an der Oberkante des Dichtelementes DE 1,
- Lastangriff (Fluiddruck von oben) an der Oberkante des kombinierten Widerlager-Dichtelementes DE 2,

BfS	Konzeptplanung der Schachtverschlüsse für die Schächte Bartensleben und Marie des ERA Morsleben	
9M/ 223 450 11/GHS/ TF/ 0001/00	Stand: 10.03.2004	Seite 122 von 215

- Lastangriff (Fluiddruck von oben) an der Oberkante der asphaltlichten Schicht des Übergangsbereiches zwischen den kombinierten Widerlager-Dichtelementen DE 2 und DE 3,
- Lastangriff (Fluiddruck von unten) an der Unterkante der asphaltlichten Schicht des Übergangsbereiches zwischen den kombinierten Widerlager-Dichtelementen DE 2 und DE 3

und

- Lastangriff (Fluiddruck) von unten an der Unterkante des kombinierten Widerlager-Dichtelementes DE 3

ergaben sich die folgenden für die Nachweisführung wesentlichen Lastfälle:

Lastfall LF 1:

Fluiddruckbelastung von oben ($p_{Fo} = 1,8 \text{ MPa}$) am Dichtelement DE 1
(Referenzlastfall),

Lastfall LF 2:

Fluiddruckbelastung von oben ($p_{Fo} = 2,5 \text{ MPa}$) am kombinierten Widerlager-Dichtelement DE 2 und Quelldruck ($p_Q = 3,3 \text{ MPa}$) im Dichtelement DE 1,

Lastfall LF 3:

Fluiddruckbelastung von oben ($p_{Fo} = 3,2 \text{ MPa}$) am Übergangsbereich, mit Berücksichtigung des Eigengewichtes des Asphalts im kombinierten Widerlager-Dichtelement DE 2 und des Quelldruckes ($p_Q = 3,3 \text{ MPa}$) im Dichtelement DE 1,

Lastfall LF 4:

Fluiddruckbelastung von oben am kombinierten Widerlager-Dichtelement DE 2 mit Berücksichtigung des Quelldruckes im Dichtelement DE 1 (analog LF 2),

Fluiddruckbelastung von unten an Übergangsbereich ($p_{Fu} = 6 \text{ MPa}$),

BfS	Konzeptplanung der Schachtverschlüsse für die Schächte Bartensleben und Marie des ERA Morsleben	
9M/ 223 450 11/GHS/ TF/ 0001/00	Stand: 10.03.2004	Seite 123 von 215

Lastfall LF 5:

Fluiddruckbelastung von oben am Übergangsbereich mit Berücksichtigung des Quelldruckes im Dichtelement DE 1 (analog LF 3),

Fluiddruckbelastung von unten am kombinierten Widerlager-Dichtelement DE 3 ($p_{Fu} = 6 \text{ MPa}$),

Lastfall LF 6:

Fluiddruckbelastung von unten an Übergangsbereich ($p_{Fu} = 6 \text{ MPa}$) (Referenzlastfall).

Die Simulation des geomechanischen Verhaltens des Systems Verfüllsäule-Gebirge nach 30.000 Jahren bei Berücksichtigung des Aufkriechens des Salinargebirges, erfolgte für die Referenzlastfälle LF 1 und LF 6 sowie den Lastfall LF 2. Es ergaben sich somit die folgenden Lastfälle:

Lastfall GE 1 (Ausgangslastfall für Vergleich):

Verfüllsäule ohne Belastungen durch Fluiddruck und Quelldruck mit Berücksichtigung des Gebirgsdruckes nach 30.000 Jahren (entspricht „trockener Schacht“, d.h. kein Zufluss aus dem Deckgebirge).

Lastfall GLF 1:

Belastung der Verfüllsäule entsprechend Lastfall LF 1 mit Berücksichtigung des Gebirgsdruckes nach 30.000 Jahren,

Lastfall GLF 2:

Belastung der Verfüllsäule entsprechend Lastfall LF 2 mit Berücksichtigung des Gebirgsdruckes nach 30.000 Jahren,

Lastfall GLF 6:

Belastung der Verfüllsäule entsprechend Lastfall LF 6 mit Berücksichtigung des Gebirgsdruckes nach 30.000 Jahren.

Ergänzend erfolgten Berechnungen zur Untersuchung der Auslaufsicherheit der Füllörter. Aus den oben angeführten Berechnungen resultierte eine Vertikalbelastung an der Oberkante der

BfS	Konzeptplanung der Schachtverschlüsse für die Schächte Bartensleben und Marie des ERA Morsleben	
9M/ 223 450 11/GHS/ TF/ 0001/00	Stand: 10.03.2004	Seite 124 von 215

Füllörter $p_{oS} = 0,3 \text{ MPa}$ (Siloeffekt). Die Berechnungsfälle ergaben sich aus den im Abschnitt 6.3.3 erwähnten Füllortgeometrien [73]:

Berechnungsfall TMF 1:

Simulation Füllort, konstante Höhe (rechteckige Form),

Berechnungsfall TMF 2:

Simulation trapezförmiges Füllort, Variante 1,

Berechnungsfall TMF 3:

Simulation trapezförmiges Füllort, Variante 2.

Die Sicherheitsanalyse beruhte auf dem Teilmodell für das kombinierte Widerlager-Dichtelement DE 2. Es erfolgte der Sicherheitsnachweis mit dem Teilsicherheitsfaktor $\gamma = 1,5$ für folgende Parameter:

Kontaktreibung	-	$\Phi_{\text{Kontakt}} / \gamma$
Festigkeitsparameter Schotter/Asphalt	-	$\Phi_{\text{Schotter}} / \gamma$
E – Modul Schotter/Asphalt	-	$\gamma E_{\text{Schotter}}$ bzw. $E_{\text{Schotter}} / \gamma$
E – Moduln Gebirge	-	$E_{\text{Hutgestein}} / \gamma$ und $E_{\text{Salinar}} / \gamma$.

Bei den Parametern Φ_{Kontakt} , Φ_{Schotter} , $E_{\text{Hutgestein}}$, E_{Salinar} führte eine Abminderung zu einem niedrigeren Sicherheitsniveau. Da der Parameter E_{Schotter} in beiden Richtungen wirksam ist (die Erhöhung von E_{Schotter} auf $\gamma E_{\text{Schotter}}$ bei gleichzeitiger Abminderung der anderen Materialparameter kann u.U. zu einem geringeren Sicherheitsniveau führen), wurde sowohl die Erhöhung als auch die Verminderung mit dem Teilsicherheitsfaktor γ untersucht.

Aus den oben angeführten Belastungsszenarien ergaben sich bei der konservativen Annahme einer Belastung an der Oberkante des kombinierten Widerlager-Dichtelementes DE 2 durch den Fluiddruck ($p_{Fo} = 2,5 \text{ MPa}$) und den Quelldruck ($p_Q = 3,3 \text{ MPa}$) ohne Berücksichtigung der Abminderung der Parameter folgende Belastungsszenarien:

BfS	Konzeptplanung der Schachtverschlüsse für die Schächte Bartensleben und Marie des ERA Morsleben	
9M/ 223 450 11/GHS/ TF/ 0001/00	Stand: 10.03.2004	Seite 125 von 215

Lastfall Teilmodell TM 0:

Einbauzustand ohne Vertikalbelastung durch Fluiddruck und Quelldruck,

Berücksichtigung der im Einbauzustand an der Oberkante von DE 2 vorhandenen Vertikalspannung, die aus dem Eigengewicht der oberen Verfüllsäule und dem Siloeffekt resultiert ($p_{Fo} = 0,4 \text{ MPa}$),

Lastfall Teilmodell TM 1:

Belastung von oben ($p_{Fo} + p_Q = 5,8 \text{ MPa}$)

(in Anlehnung an die Lastfälle LF 1, LF 2 und LF 3),

Lastfall Teilmodell TM 2:

Belastung von oben ($p_{Fo} + p_Q = 5,8 \text{ MPa}$) und unten ($p_{Fu} = 6 \text{ MPa}$)

(in Anlehnung an die Lastfälle LF 4 und LF 5),

Lastfall Teilmodell TM 3:

Belastung von unten ($p_{Fu} = 6 \text{ MPa}$)

Berücksichtigung der im Einbauzustand an der Oberkante vorhandenen Vertikalspannung, die aus dem Eigengewicht der oberen Verfüllsäule und dem Siloeffekt resultiert ($p_{Fo} = 0,4 \text{ MPa}$)

(in Anlehnung an Lastfall 6).

Die Bezeichnungen der Berechnungsfälle lauten TM 0_γ, TM 1_γ, TM 2_γ und TM 3_γ.

Das Sicherheitsniveau wurde mit Hilfe einer Sensitivitätsanalyse hinsichtlich des Einflusses der Parameter Φ_{Kontakt} , Φ_{Schotter} , E_{Schotter} , $E_{\text{Hutgestein}}$ bzw. E_{Salinar} ermittelt. Bei den numerischen Untersuchungen erfolgte nur die Variation des jeweils betrachteten Parameters. Die übrigen Parameter blieben unverändert. Die Sensitivitätsanalyse wurde für die zuvor beschriebenen Belastungsszenarien TM 0, TM 1, TM 2 und TM 3 durchgeführt. Es ergaben sich die in Tabelle 18 zusammengefassten Berechnungsfälle für die Sensitivitätsanalyse.

Tabelle 18 : Berechnungsfälle Sensitivitätsanalyse

Teilsicherheitsfaktor γ	Lastfall	Φ_{Kontakt}	Φ_{Schotter}	$E_{\text{Hutgestein}}$ E_{Salinar}	E_{Schotter}
1,5	TM0	TMK1_T0	TMS1_T0	TMG1_T0	TMES1_T0
2,0	TM0	TMK2_T0	TMS2_T0	TMG2_T0	TMES2_T0
3,0	TM0	TMK3_T0	TMS3_T0	TMG3_T0	TMES3_T0
1,5	TM1	TMK1_T1	TMS1_T1	TMG1_T1	TMES1_T1
2,0	TM1	TMK2_T1	TMS2_T1	TMG2_T1	TMES2_T1
3,0	TM1	TMK3_T1	TMS3_T1	TMG3_T1	TMES3_T1
1,5	TM2	TMK1_T2	TMS1_T2	TMG1_T2	TMES1_T2
2,0	TM2	TMK2_T2	TMS2_T2	TMG2_T2	TMES2_T2
3,0	TM2	TMK3_T2	TMS3_T2	TMG3_T2	TMES3_T2
1,5	TM3	TMK1_T3	TMS1_T3	TMG1_T3	TMES1_T3
2,0	TM3	TMK2_T3	TMS2_T3	TMG2_T3	TMES2_T3
3,0	TM3	TMK3_T3	TMS3_T3	TMG3_T3	TMES3_T3

Einen Überblick über sämtliche im Rahmen der geomechanischen Nachweisführung durchgeführten Berechnungen gibt die Anlage 3 in [73].

6.3.6 Darstellung und Auswertung der Berechnungsergebnisse

Die Auswertung der Berechnungsergebnisse für die Belastungsszenarien nach dem Einbau der Verfüllsäule erfolgte beispielhaft für die beiden Referenzlastfälle (siehe hierzu in [73]: für LF 1 – Anlage 6, für LF 6 – Anlage 7). Eine tabellarische Zusammenfassung der Berechnungsdaten in Bezug zu den im Kapitel 6.3.1 erläuterten Nachweiskriterien enthält die Anlage 9 in [73].

Auswertung der Berechnungsergebnisse und Nachweisführung für den Referenzlastfall 1:

(Berechnungsfall LF 1, Fluiddruckbelastung von oben, Lastangriff am Dichtelement DE 1)

Auswertung nach Kriterium 1 (Konvergenz des Verfahrens):

Die Konvergenz des numerischen Verfahrens verdeutlicht das in [73] in Anlage 6, Blatt 2, Bild 1 enthaltene Protokoll der Vertikalverschiebungen. Die von der Belastung abhängige Vertikalverschiebung der Oberkante des Dichtelementes DE 1 konvergiert

BfS	Konzeptplanung der Schachtverschlüsse für die Schächte Bartensleben und Marie des ERA Morsleben	
9M/ 223 450 11/GHS/ TF/ 0001/00	Stand: 10.03.2004	Seite 127 von 215

nach dem Erreichen der maximalen Belastung p_{Fo} . Damit ist nachgewiesen, dass sich das System Verschlussbauwerk/Gebirge in einem statischen Gleichgewichtszustand befindet.

Auswertung nach Kriterium 2 (Lastabtrag im DE 2 bei Fluiddruck von oben):

Den Lastabtrag der aus dem Fluiddruck $p_{Fo} = 1,8 \text{ MPa}$ resultierenden mechanischen Belastung in das Gebirge zeigen die in [73] in Anlage 6, Blatt 2, Bild 2 und Blatt 3, Bild 3 dargestellten Vertikalspannungen σ_V . Im für den Lastabtrag entscheidenden kombinierten Widerlager-Dichtelement DE 2 (siehe in [73] den Ausschnitt DE 1/DE 2 in Anlage 6, Blatt 3, Bild 3) fällt der Betrag von σ_V bis auf den im Einbauzustand vorhandenen Wert von ca. $\sigma_V = -0,2 \text{ MPa}$ ab. Die Fluiddruckbelastung von oben wird folglich im Bereich des Dichtelemente DE 1 und des kombinierten Widerlager-Dichtelementes DE 2 vollständig in das Gebirge abgetragen.

Auswertung nach Kriterium 3.1 (Mechanische Beanspruchung des DE 2):

Die Bilder 4 bis 6 der Anlage 6 in [73] zeigen die Spannungszustände in der Verfüllsäule, die die Grundlage der Auswertung hinsichtlich der Beanspruchung bilden. Die in Blatt 5, Bild 7 der Anlage 6 in [73] dargestellten Bewertungskoeffizienten k_τ verdeutlichen, dass die Beanspruchungen in der Verfüllsäule im zulässigen Bereich verbleiben. Da für alle berechneten Bewertungskoeffizienten in der Verfüllsäule $k_\tau > 1$ gilt, ist das **MOHR-COULOMB-BRUCHKRITERIUM** erfüllt. In dem für den Lastabtrag wesentlichen kombinierten Widerlager-Dichtelement DE 2 ist $k_\tau > 1,3$ (siehe hierzu in [73]: Anlage 9).

Auswertung nach Kriterium 3.2 (Mechanische Beanspruchung des Gebirges):

Im Gebirge treten keine Zugspannungen auf, d.h. bei diesem Belastungszenarium ist keine Gefährdung durch Fractissbildung vorhanden. Dies illustrieren die Darstellungen der minimalen Hauptnormalspannungen in der Betrachtungsebene σ_{N2} (siehe hierzu in [73]: Anlage 6, Bild 5) und der Tangentialspannungen σ_t (Hauptnormalspannung in Richtung der Normalen der Betrachtungsebene, siehe hierzu in [73]: Anlage 6, Bild 6). Es gilt $\sigma_3 = \min\{-\sigma_{N2}, -\sigma_t\} < 0$ (Druckspannungen negativ).

BfS	Konzeptplanung der Schachtverschlüsse für die Schächte Bartensleben und Marie des ERA Morsleben	
9M/ 223 450 11/GHS/ TF/ 0001/00	Stand: 10.03.2004	Seite 128 von 215

In den Bereichen des Dogger/Schluff/Tonstein/Mergel und des Hutgesteins führen der Einbau der Verfüllsäule und die vertikale Belastung zu günstigeren Beanspruchungszuständen im Vergleich zum Berechnungsfall E 0. Für den gesamten Bereich wurden Koeffizienten von $k_{\tau} > 1,2$ errechnet.

Die Auswertung des Dilatanzkoeffizienten k_{Dil} im Salinar verdeutlicht, dass sich im betrachteten Belastungsszenarium keine dilatante Zone ausbildet (siehe hierzu in [73]: Anlage 6, Blatt 6, Bild 8). Es ist $k_{Dil} > 1,1$ (siehe hierzu in [73]: Anlage 9).

Damit ist die Zulässigkeit der Beanspruchungszustände im Bauwerk und im Gebirge nachgewiesen.

Auswertung nach Kriterium 4 (Dichteänderung des DE 1):

Durch Setzung und Fluiddruckbelastung verringert sich die Gesamtlänge des Dichtelementes DE 1 um ca. 0,41 m. Dies führt zu einer Erhöhung der Dichte um 0,7 % und damit zu einer geringen, aber vernachlässigbaren Quelldruckerhöhung (siehe hierzu in [73]: Anlage 9).

Auswertung nach Kriterium 5 (Nachweis der Haftung in der Kontaktfuge):

Da in diesem Lastfall keine Auflockerung des Dichtelementes DE 1 eintritt, ist bei dessen vollständiger Durchfeuchtung ein Quelldruck $p_Q = 3,3 \text{ MPa}$ vorhanden, der eine sichere Abdichtung der Kontaktfuge zwischen dem Dichtelement DE 1 und dem Gebirge gewährleistet ($p_Q > 1,0 \text{ MPa}$).

Die Auswertungen der Normalspannungen σ_{nK} und der Schubspannungen τ_K in den Kontaktflächen der kombinierten Widerlager-Dichtelemente und dem Gebirge mittels des Bewertungskoeffizienten $k_{\tau K}$ (nach Formel (9)) zeigen, dass in der gesamten Fuge Haftreibung vorhanden ist. Für diese Bereiche wurden Werte von $k_{\tau K} > 1$ ermittelt (siehe hierzu in [73]: Anlage 9).

BfS	Konzeptplanung der Schachtverschlüsse für die Schächte Bartensleben und Marie des ERA Morsleben	
9M/ 223 450 11/GHS/ TF/ 0001/00	Stand: 10.03.2004	Seite 129 von 215

Auswertung der Berechnungsergebnisse und Nachweisführung für den Referenzlastfall 2:

(Berechnungsfall LF 6, Fluiddruckbelastung von unten, Lastangriff am Übergangsbereich)

Auswertung nach Kriterium 1 (Konvergenz des Verfahrens):

Die Konvergenz des numerischen Verfahrens ergibt sich analog zu Referenzlastfall 1 aus dem Protokoll der Vertikalverschiebungen (siehe hierzu in [73]: Anlage 7, Blatt 2, Bild 1). Damit ist der statische Gleichgewichtszustand nachgewiesen.

Auswertung nach Kriterium 2 (Lastabtrag im DE 2 bei Fluiddruck von oben):

Den Lastabtrag der aus dem Fluiddruck $p_{Fu} = 6 \text{ MPa}$ resultierenden mechanischen Belastung in das Gebirge verdeutlichen die Auswertungen von σ_V in [73] in Anlage 7, Blatt 3, Bild 2. Im für den Lastabtrag entscheidenden Widerlager-Dichtelement DE 2 sind im mittleren Bereich die Beträge der Vertikalspannungen ($|\sigma_V| = 0,2 \text{ MPa}$) geringer als an der Oberkante von DE 2 ($|\sigma_{VOK}| = 0,4 \text{ MPa}$). Somit ist der vollständige Lastabtrag der Fluiddruckbelastung von unten in das Gebirge erfolgt und die Tragfähigkeit gewährleistet.

Auswertung nach Kriterium 3.1 (Mechanische Beanspruchung des DE 2):

Die in den Bildern 3 bis 5 der in [73] in Anlage 7 dargestellten Hauptnormalspannungen verdeutlichen, dass die Beanspruchungen in der Verfüllsäule im zulässigen Bereich verbleiben. In dem für die Tragfähigkeit wesentlichen kombinierten Widerlager-Dichtelement DE 2 gilt für die den Beanspruchungszustand einschätzenden Bewertungskoeffizienten $k_\tau > 1,5$ (siehe hierzu in [73]: Anlage 7, Blatt 5, Bild 6).

Auswertung nach Kriterium 3.2 (Mechanische Beanspruchung des Gebirges):

Für das Gebirge im Bereich Dogger/Schluff/Tonstein/Mergel und im Hutgestein gelten zum Referenzlastfall 1 analoge Aussagen.

Die Auswertungen von σ_{N2} und σ_t in [73] in Anlage 7, Blatt 4, Bild 4 und Blatt 5, Bild 5 zeigen, dass im umgebenden Gebirge keine Zugspannungen auftreten. Die Auswertungen hinsichtlich Schädigungen/Dilatanz des Salinargebirges mit dem Dilatanzkoeffizienten k_{Dil} erlauben auch hier die Schlussfolgerung, dass beim betrachteten

BfS	Konzeptplanung der Schachtverschlüsse für die Schächte Bartensleben und Marie des ERA Morsleben	
9M/ 223 450 11/GHS/ TF/ 0001/00	Stand: 10.03.2004	Seite 130 von 215

Belastungsszenarium keine dilatante Zone entsteht (siehe hierzu in [73]: Anlage 7, Blatt 6, Bild 7). Für den Salinarbereich gilt $k_{Dil} > 1,1$.

Folglich sind damit die die Beanspruchung von Bauwerk und Gebirge bewertenden Kriterien (FRAC, MOHR-COULOMB, Dilatanz) erfüllt.

Auswertung nach Kriterium 4 (Dichteänderung des DE 1):

Durch die Fluidruckbelastung von unten erfolgt keine Vertikalverschiebung der Unterkante des Dichtelementes DE 1, da der Lastabtrag ins Gebirge hier bereits vollständig erfolgt ist. Diese von unten einwirkende Belastung beeinflusst also nicht die Funktionsfähigkeit des Dichtelementes DE 1 (siehe hierzu in [73]: Anlage 9).

Auswertung nach Kriterium 5 (Nachweis der Haftung in der Kontaktfuge):

In der Kontaktfuge zwischen dem kombinierten Widerlager-Dichtelement DE 2 und dem Gebirge ist Haftreibung ($k_{rK} > 1$) vorhanden (siehe hierzu in [73]: Anlage 9). In Folge der viskosen Eigenschaften des Asphaltens bildet sich ein hydrostatischer Druck im kombinierten Widerlager-Dichtelement DE 3 in Höhe des Fluiddruckes p_{Fu} aus. Dies gewährleisten der asphaltgedichte Übergangsbereich und das kombinierte Widerlager-Dichtelement DE 2, da beide Elemente den Abfluss von Asphalt aus dem Bereich des kombinierten Widerlager-Dichtelementes DE 3 verhindern und dessen vertikale Verschiebung begrenzen. Wegen der zusätzlich vorhandenen Adhäsion zwischen dem Bitumen/Asphalt und dem Gebirge ist die Radialspannung im Kontaktbereich größer als der Fluiddruck p_{Fu} und somit der Verschluss der Kontaktfuge auch im Bereich des kombinierten Widerlager-Dichtelementes DE 3 gegeben.

Damit wurden alle Nachweiskriterien für beide Referenzlastfälle auch bei der gewählten konservativen Vorgehensweise erfüllt. Die Untersuchung der restlichen Belastungsszenarien geschah in analoger Weise. Die Anlage 8 (Detailauswertung zum Berechnungsfall GLF1, d.h. der Simulation des Aufkriechens des Salinargebirges, Fluiddruckbelastung von oben an DE 1) und die Anlage 9 in [73] (Zusammenfassung in tabellarischer Form) enthalten die Ergebnisse.

BfS	Konzeptplanung der Schachtverschlüsse für die Schächte Bartensleben und Marie des ERA Morsleben	
9M/ 223 450 11/GHS/ TF/ 0001/00	Stand: 10.03.2004	Seite 131 von 215

Gesamteinschätzung für alle Lastfälle:

Die grafischen Auswertungen der Referenzfälle und des Berechnungsfalles GLF1 (siehe hierzu in [73]: die Anlagen 6, 7 und 8) sowie die Tabelle der Berechnungsergebnisse und deren Auswertungen (siehe hierzu in [73]: Anlage 9) verdeutlichen, dass in allen Lastfällen die Kriterien (1) bis (5) erfüllt sind. Damit sind der Tragfähigkeitsnachweis und der geomechanische Gebrauchstauglichkeitsnachweis erbracht.

Da der Lastabtrag der Fluidruckbelastungen wesentlich für die Tragfähigkeit ist, sind zusätzlich in Anlage 10 in [73] für die Berechnungsfälle LF 2 bis LF 5, GLF 2, GLF 6 sowie für die Berechnungen ohne Fluidruck (Einbauzustand E 1, Zustand nach 30.000 Jahren ohne Fluidruckbelastung GE 1) die Vertikalspannungen in den für den Lastabtrag relevanten Teilbereichen der kombinierten Widerlager-Dichtelemente grafisch dargestellt.

Dabei wird deutlich, dass bei allen Belastungsszenarien mit einer Fluidruckbelastung von oben die Vertikalspannungen auf das Niveau des Einbauzustandes abfallen.

Die mechanische Belastung, die aus dem Fluidruck von unten resultiert, wird stets soweit in das Gebirge abgetragen, dass die Vertikalspannungsbeträge im lastabtragenden Element geringer sind, als die auf die Oberkante einwirkenden Vertikalspannungen (Eigengewicht, Fluidruck von oben). Diese Grafiken zum Lastabtrag zeigen, dass die Tragfähigkeit des Bauwerkes auf hohem Niveau sichergestellt ist.

Die in der Anlage 9 in [73] enthaltenen Auswertungen verdeutlichen, dass die Beanspruchungen von Bauwerk und Gebirge sich bei den Belastungsszenarien nur gering unterscheiden. Folglich gelten hier zu den Referenzberechnungen analoge Aussagen.

Die maximale Deformation des Dichtelementes DE 1 ergibt sich beim Referenzlastfall 1 (siehe siehe hierzu in [73]: Anlage 9). Bei den anderen Belastungsszenarien erhält man eine geringere Kompaktion des Dichtelementes DE 1, also vernachlässigbare Quelldruckerhöhungen. Auflockerungen des Dichtelementes DE 1 treten nicht auf.

Die Beanspruchungen in der Kontaktfuge (siehe hierzu in [73] die Auswertung $k_{\tau K}$ nach Formel (9) in Anlage 9) sind bei den Berechnungsfällen weitgehend identisch. Durch das Aufkriechen des Salinargebirges erhöhen sich die maximal in der Kontaktfuge zulässigen

BfS	Konzeptplanung der Schachtverschlüsse für die Schächte Bartensleben und Marie des ERA Morsleben	
9M/ 223 450 11/GHS/ TF/ 0001/00	Stand: 10.03.2004	Seite 132 von 215

Schubspannungen und damit die Bewertungskoeffizienten k_{TK} , so dass mit wachsender Zeit das Sicherheitsniveau der Konstruktion ansteigt.

Den Abschluss bilden Untersuchungen zum Einfluss der Füllörter auf die Tragfähigkeit der Verfüllsäule hinsichtlich zusätzlicher Vertikalverschiebungen. Dabei wird von dem realitätsnahen Ansatz einer Belastung der Schachtverfüllung im Füllortbereich von $p_{Fo} = 0,3 \text{ MPa}$ ausgegangen (siehe hierzu in [73]: Anlage 9, Lastfall LF 3).

Die Ergebnisse (Konvergenz des Verfahrens/statischer Gleichgewichtszustand) in Anlage 11 in [73] zeigen, dass die Tragfähigkeit im Füllortbereich bei den betrachteten Füllortgeometrien gewährleistet ist. Die zusätzlichen Setzungen betragen ca. 0,01 m und gefährden damit nicht die Gebrauchstauglichkeit der Verfüllsäule. Die Auslaufsicherheit der Verfüllsäule ist somit zwangsläufig gegeben.

Die Berechnungsergebnisse liefern folglich die geomechanischen Nachweise von Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit.

Sicherheitsanalyse:

Die Abschätzung des Sicherheitsniveaus erfolgte mittels des Teilmodells des kombinierten Widerlager-Dichtelementes DE 2.

Zunächst wurden die Parameter Φ_{Kontakt} , Φ_{Schotter} , $E_{\text{Hutgestein}}$, E_{Salinar} , E_{Schotter} mit den Teilsicherheiten $\gamma = 1,5$ abgemindert. Da eine Erhöhung von E_{Schotter} auf $\gamma E_{\text{Schotter}}$ bei gleichzeitiger Abminderung der anderen Materialparameter wegen des sich verschlechternden Lastabtrages u.U. zu einem geringeren Sicherheitsniveau führte, wurde diese Parameterkombination in die Sicherheitsanalyse einbezogen und damit zwei Varianten betrachtet.

Die Berechnungen beruhen auf konservativ gewählten Belastungen an der Oberkante des kombinierten Widerlager-Dichtelementes DE 2 von $p_{Fo} = 5,8 \text{ MPa}$ (Fluiddruck an der Oberkante des kombinierten Widerlager-Dichtelementes DE2 zuzüglich des Quelldruckes in DE 1) und an der Unterkante des kombinierten Widerlager-Dichtelementes DE 2 mit $p_{Fu} = 6 \text{ MPa}$.

Die Anlage 12 in [73] enthält in tabellarischer Form die Auswertung der Berechnungsergebnisse auf Basis der 5 Bewertungskriterien für den Einbauzustand, für die sich an den Referenzlastfällen orientierenden Belastungsszenarien **Fluiddruck nur von oben und Flu-**

BfS	Konzeptplanung der Schachtverschlüsse für die Schächte Bartensleben und Marie des ERA Morsleben	
9M/ 223 450 11/GHS/ TF/ 0001/00	Stand: 10.03.2004	Seite 133 von 215

iddruck nur von unten sowie für eine Belastung **von oben und unten**. Ergänzend dazu enthält die Anlage 13 in [73] die grafische Auswertung zum Lastabtrag.

Die Ergebnisse verdeutlichen, dass für die um die Teilsicherheiten $\gamma = 1,5$ abgeminderten Parameter die Tragfähigkeit in allen Belastungsszenarien gewährleistet ist (siehe hierzu in [73]: Anlage 12, Auswertungen mit den Nachweiskriterien (1) bis (3)).

Für die geomechanische Gebrauchstauglichkeit des kombinierten Widerlager-Dichtelementes DE 2 sind hinsichtlich der Widerlagerfunktion die Vertikalverschiebungen (Nachweiskriterium 4) wesentlich. Da aus den berechneten Vertikalverschiebungen der Oberkante von DE 2 und damit auch der Unterkante des Dichtelementes DE 1 eine Auflockerung von DE 1 von maximal 0,7% resultiert, reduziert sich bei einer vollständigen Durchfeuchtung von DE 1 der Quelldruck in DE 1 geringfügig auf $p_Q = 3,1 \text{ MPa}$ (siehe Formel (1) in Kapitel 6.4.3.2). Somit ist die sichere Abdichtung der Kontaktfuge zwischen dem Dichtelement DE 1 und dem Gebirge gewährleistet ($p_Q > 1,0 \text{ MPa}$). Gleiches gilt für das Widerlager-Dichtelement DE 2 (Nachweiskriterium 5).

Eine Abminderung von E_{Schotter} war hinsichtlich der Vertikalverschiebung des Dichtelementes DE 1 ungünstiger, so dass der richtige Ansatz gewählt wurde.

Eine Wichtung der Materialparameter hinsichtlich ihrer Bedeutung für das Sicherheitsniveau war mit Hilfe der in [73] in Anlage 14 zusammengefassten Sensitivitätsanalyse von Φ_{Kontakt} , Φ_{Schotter} , $E_{\text{Hutgestein}}$, E_{Salinar} und E_{Schotter} möglich. Es wurden für alle Parameter die drei Teilsicherheitsfaktoren $\gamma = 1,5; 2,0; 3,0$ verwendet. Die Nachweise konnten in allen Fällen erbracht werden.

Die Ergebnisse zeigten, dass die Tragfähigkeit und die geomechanische Gebrauchstauglichkeit wesentlich durch die Kontaktreibung (Φ_{Kontakt}) und die Festigkeit des Schotters (Φ_{Schotter}) beeinflusst wurden.

Zusätzliche Simulationen erbrachten, dass bei einer Belastung $p_{Fu} = 6 \text{ MPa}$ Versagenszustände bei $\Phi_{\text{Kontakt}} < 4^\circ$ bzw. $\Phi_{\text{Schotter}} < 2^\circ$ eintraten. Dies verdeutlichte das sehr hohe Sicherheitsniveau, das wesentlich durch den Lastabtrag über die kombinierten Widerlager-Dichtelemente bestimmt wird.

BfS	Konzeptplanung der Schachtverschlüsse für die Schächte Bartensleben und Marie des ERA Morsleben	
9M/ 223 450 11/GHS/ TF/ 0001/00	Stand: 10.03.2004	Seite 134 von 215

6.3.7 *Einschätzung des Sicherheitsniveaus*

Für alle Belastungsszenarien wurden die Tragfähigkeit und geomechanische Gebrauchstauglichkeit nachgewiesen. Dies gilt für die Fälle, bei denen die Fluiddruckbelastung vor dem Aufkriechen des Salinargebirges eintritt und auch für die Szenarien mit einer Berücksichtigung des aus dem Gebirgsdruck resultierenden Aufkriechens (nach 30.000 Jahren). Der Gebirgsdruck verbessert den Lastabtrag und führt zu einer Erhöhung des Sicherheitsniveaus.

Die Auslaufsicherheit der Füllörter bei der angegebenen Füllortverfüllung wurde ebenfalls nachgewiesen. Hinsichtlich der geomechanischen Gebrauchstauglichkeit der Verfüllsäule haben die Füllörter nur eine geringe Bedeutung.

Das gewählte Schachtverschlussbauwerk besitzt aus geomechanischer Sicht ein sehr hohes Sicherheitsniveau. Es wurde ein Sicherheitsnachweis mit Teilsicherheiten $\gamma = 1,5$ der wesentlichen Materialparameter erbracht. Für die Belastungen wurden generell konservative Extremwerte angesetzt.

Sensitivitätsanalysen zeigten, dass die Eigenschaften der Kontaktfuge (Reibung) und die Festigkeit des Verfüllmaterials (Φ_{Schotter}) wesentlich die Tragfähigkeit beeinflussen.

Eine Ermittlung des Versagenszustandes durch eine weitere Abminderung dieser Parameter bis zum Verlust der Tragfähigkeit bestätigte das sehr hohe Sicherheitsniveau.

6.4 Geohydraulische Untersuchungen zum Gebrauchstauglichkeitsnachweis

6.4.1 *Bemessungsziele und Kriterien für die geohydraulische Nachweisführung*

Als übergeordnetes Bemessungsziel für das gesamte Schachtverschlussystem wurde ein maximal zulässiger Volumenstrom von 2 m³/a vorgegeben. Bei Auslegung der Dichtelemente wurde dieser Grenzvolumenstrom für jedes einzelne Dichtelement angestrebt. Die Sicherheitsbewertung basierte ebenfalls auf dem Kriterium des einzuhaltenden Volumenstroms.

Bauwerksspezifisch war die Einhaltung des Quelldruckes in einem vorgegebenen Bereich (vgl. Kriterium 4), die vollständige Abdichtung der Kontaktbereiche zwischen den Dichte-

BfS	Konzeptplanung der Schachtverschlüsse für die Schächte Bartensleben und Marie des ERA Morsleben	
9M/ 223 450 11/GHS/ TF/ 0001/00	Stand: 10.03.2004	Seite 135 von 215

menten und dem Gebirge (vgl. Kriterium 5) und die Begrenzung der Asphaltverluste nachzuweisen.

Die Einhaltung des Quelldrucks wurde durch gezielte Materialeinstellungen/-modifikationen und durch die geomechanischen Berechnungen nachgewiesen. Ebenso erfolgte der Nachweis der vollständigen Abdichtung der Kontaktfugen im Bereich der kombinierten Widerlager-Dichtelemente innerhalb der Auswertungen der geomechanischen Berechnungen. Der Nachweis der Begrenzung der Asphaltverluste erfolgte gesondert in Auswertung geohydraulischer Berechnungen. Als verbleibende Mindestlänge der mit Bitumen/Asphalt gefüllten Schotter säule (bei Berücksichtigung sämtlicher Verluste) wurde eine Dichtelementlänge von 15 m festgelegt.

6.4.2 Vorgehensweise

Die geohydraulischen Untersuchungen umfassten die Auslegung der Dichtelemente innerhalb der Schachtverschlüsse des ERA Morsleben. Als Dichtmaterialien kamen Bentonit und Bitumen bzw. Asphalte zum Einsatz.

Der erste Schwerpunkt der geohydraulischen Untersuchungen war die Dimensionierung der Deckgebirgsdichtungen. Es wurden die Auswahl eines geeigneten Bentonitmaterials und dessen hydraulische Kennwerte beschrieben. Die mit den vorliegenden Kennwerten durchgeführten numerischen Modellrechnungen wurden erläutert. Die Auslegung des Dichtelementes erfolgte zunächst ohne Kreditnahme von weiteren Elementen innerhalb des Schachtverschlusses.

Der zweite Schwerpunkt beinhaltete die Auslegung der kombinierten Widerlager-Dichtelemente auf Schotter-Asphalt-Basis. Dazu wurden auf Grundlage der vorliegenden Erkenntnisse u.a. über die anstehenden Wässer und Lösungen, geeignete Bitumen und entsprechende Füllmaterialien ausgewählt. Die Bemessung der kombinierten Widerlager-Dichtelemente erfolgte ohne die Kreditnahme von weiteren Schachtverschlusskomponenten. Eine Einschätzung des erreichten Sicherheitsniveaus für jedes Einzelement wurde abschließend abgegeben.

BfS	Konzeptplanung der Schachtverschlüsse für die Schächte Bartensleben und Marie des ERA Morsleben	
9M/ 223 450 11/GHS/ TF/ 0001/00	Stand: 10.03.2004	Seite 136 von 215

Im Weiteren erfolgten Angaben über mögliche Asphaltverluste, die sich vor allem auf Erfahrungswerte anderer ausgeführter Projekte stützten. Ergänzend erfolgten hypothetische Betrachtungen zum Eindringen von Bitumen/Asphalten in permeable Gebirgsbereiche.

Abschließend wurde eine zusammenfassende Betrachtung des erreichten Sicherheitsniveaus unter Einbezug aller im Gesamtsystem integrierten Dichtelemente durchgeführt und die insgesamt zulaufenden bzw. ausgepressten Fluidmengen wurden abgeschätzt.

Zur Auslegung der Dichtelemente wurde als Bemessungsziel (vgl. Kapitel 6.4.1) für jedes Einzeldichtelement ein maximaler Volumenstrom von $2 \text{ m}^3/\text{a}$ angestrebt. Dieser Grenzvolumenstrom stellte gleichzeitig auch das einzige gültige Sicherheitskriterium für den geohydraulischen Gebrauchstauglichkeitsnachweis dar. Die Dimensionierung erfolgte sowohl über zu berechnende Volumenströme durch das Dichtelement als auch über den ausbruchsnahen, aufgelockerten Gebirgsbereich.

Ein Volumenstrom über die Kontaktfuge zwischen Dichtung und Gebirge ist nicht zu besorgen, da sowohl für den Bentonit auf Grund des Quelldrucks als auch für das Bitumen/Asphalt auf Grund der Adhäsionskräfte und der Fluideigenschaften (Druckaufbau) kein Aufklaffen der Kontaktfuge möglich ist. Der Nachweis der Abdichtung der Kontaktfuge erfolgte für die kombinierten Widerlager-Dichtelemente durch Einschätzung nach Kriterium 5 im Kapitel 6.3.

Die Dimensionierung der Dichtelemente hängt im starken Maße von den geohydraulischen Eigenschaften der umgebenden Gebirgshorizonte ab. Aus diesem Grund sind dem erreichbaren Gesamtvolumenstrom stets natürliche Grenzen gesetzt, die entweder nicht oder nur mit unvertretbar hohem Aufwand überwunden werden können. Dieser Tatsache wurde bei einer Gesamteinschätzung der Dichtwirkung des Systems Rechnung zu tragen.

6.4.3 Deckgebirgsdichtung

6.4.3.1 Dichthorizonte im Deckgebirge und hydraulische Kennwerte

Sowohl für die Dichtelemente im Salinarbereich der Schächte des ERA Morsleben als auch für die Dichtungen im Deckgebirge mussten geeignete Einbauhorizonte festgelegt werden. Die Auswahl erfolgte auf Grund der vorliegenden hydraulischen Kennwerte d.h. speziell auf Basis der hydraulischen Leitfähigkeiten, welche in [5], [49] und [50] dokumentiert sind.

Der Aufbau des Deckgebirges stellt sich für die beiden Schächte Marie und Bartensleben sehr unterschiedlich dar. Aus diesem Grund wurden die nachfolgenden Ausführungen auf jeden Schacht getrennt bezogen.

6.4.3.1.1 *Dichthorizonte Schacht Marie*

Das Deckgebirge am Schacht Marie ist verhältnismäßig einfach aufgebaut. Unmittelbar unterhalb der bis zu einer Teufe von 8 m unter Gelände anstehenden quartären Schichten wurden mächtige Ton- und Schluffsteinkomplexe aufgeschlossen, die sich bis in eine Teufenlage von 176 m erstrecken. Innerhalb der Ton- und Schluffsteinschichten wurden lagenweise Dolomitmergelsteine angetroffen. Der letzte Zufluss aus dem Deckgebirge wurde in einer Teufenlage von 129 m registriert [5].

Abbildung 26 zeigt schematisch den Aufbau des Deckgebirges und die in [5] dokumentierten bzw. in [50] ermittelten hydraulischen Kennwerte (hydraulische Leitfähigkeit). In Tabelle 19 sind die Werte tabellarisch zusammengefasst.

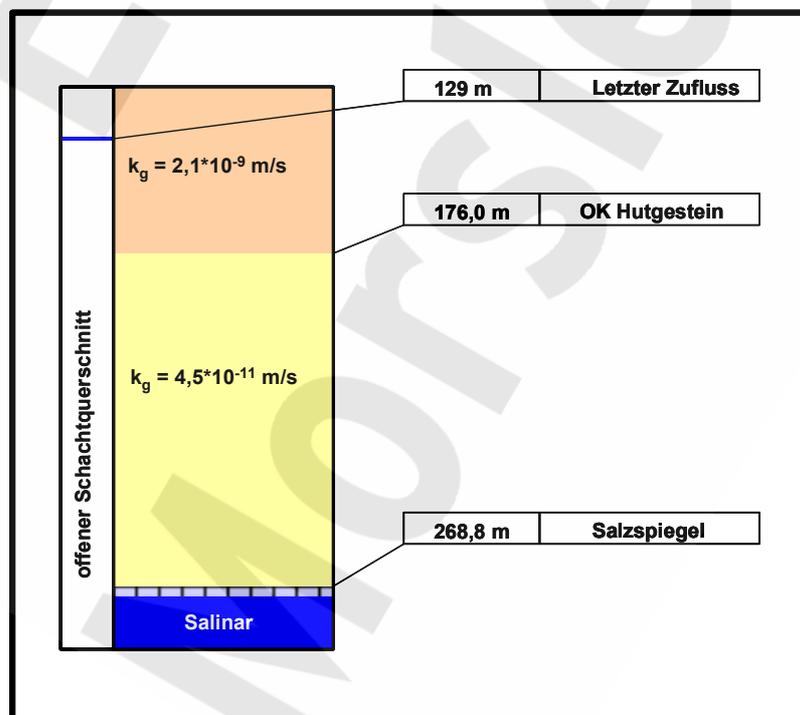


Abbildung 26: Schacht Marie – Lage der potentiellen Dichthorizonte und deren hydraulische Kennwerte – schematische Darstellung

Tabelle 19 : Schacht Marie - Hydraulische Leitfähigkeit des Deckgebirges unterhalb des letzten Zuflusses [5], [50]

Homogenbereich	Stratigraphische Bezeichnung	Teufenbereich	Hydraulische Leitfähigkeit
		[m unter GOK]	[m/s]
2	Dogger/Tonstein/Schluffstein	130,0 – 176,0	$2,1 \cdot 10^{-9}$
3	Hutgestein/Gipsstein	176,0 – 268,8	$4,5 \cdot 10^{-11}$

Insbesondere der mächtige Hutgesteinsbereich eignet sich auf Grund seiner geringen hydraulischen Leitfähigkeit als Dichthorizont für den Einbau eines Dichtelementes gegenüber Deckgebirgswässern.

Über Auflockerungszonen auf Grund mechanischer Beanspruchungen in Deckgebirgsbereichen, etwa analog zur Dilatanzproblematik im Salinar, liegen derzeit keine fundierten Erkenntnisse vor. Aktuell wurde nur in [112] über Möglichkeiten zur direkten Messung der Deckgebirgspermeabilitäten berichtet, jedoch explizit darauf hingewiesen, dass es sich bei den angegebenen Kennwerten um stark standortspezifische Größen handelt. Aus diesem Grund wurde von einer durch die beim Schachtausbruch angewendete Bohr- und Sprengtechnologie induzierte Auflockerungszone (ALZ) von 0,75 m ausgegangen. Eine weitere Auflockerung nach erfolgter gebirgsschonender Beraubung dieser ALZ wurde nicht unterstellt (Ansatz elastisches Gebirgsverhalten), so dass von den in [5] dokumentierten hydraulischen Kennwerten ausgegangen wurde. Dieser Sachverhalt galt ebenso für die Deckgebirgsbereiche des Schachtes Bartensleben.

6.4.3.1.2 *Dichthorizonte Schacht Bartensleben*

Entgegen der einfachen Deckgebirgsstruktur am Schacht Marie gestaltet sich der Aufbau des Deckgebirges am Schacht Bartensleben komplexer. Unterhalb des letzten Zuflusses bei etwa 178 m Teufe im Feinsandstein wurde ab 186 m eine Schluffsteinschicht angetroffen. Ihr folgen eine Tonsteinschicht und der gering durchlässige Hutgesteinskomplex, der im Gegensatz zum Schacht Marie geringmächtiger ausfällt. Für die angeführte Tonsteinschicht erfolgte in den Arbeitsunterlagen [5] und [49] mangels Messwerten nur eine analytische Schätzung der hydraulischen Leitfähigkeit. Der in Abbildung 27 eingetragene

Kennwert der hydraulischen Leitfähigkeit für den Feinsandstein zwischen 177 m und 186 m entspricht dem Größtwert einer Störung, die in diesem Bereich lokalisiert wurde.

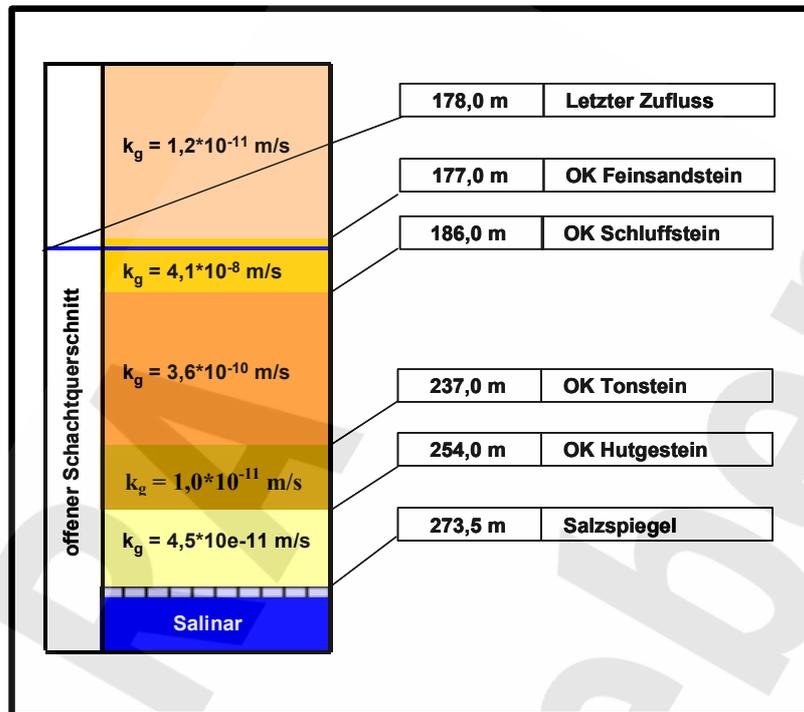


Abbildung 27: Schacht Bartensleben – Lage der potentiellen Dichthorizonte und deren hydraulische Kennwerte – schematische Darstellung

Als Dichthorizonte stehen entsprechend den in Tabelle 20 zusammengefassten Kennwerten die Schluff- und Tonsteinhorizonte und der Hutgesteinskomplex des Schachtes Bartensleben zur Verfügung.

Tabelle 20 : Schacht Bartensleben - Hydraulische Leitfähigkeit des Deckgebirges unterhalb des letzten Zuflusses [5], [49]

Homogenbereich	Stratigraphische Bezeichnung	Teufenbereich [m unter GOK]	Hydraulische Leitfähigkeit [m/s]
8	Feinsandstein	177,0 – 186,0	$4,1 * 10^{-8}$ bis $5,0 * 10^{-9}$
9	Schluffstein	186,0 – 237,0	$3,6 * 10^{-10}$
10	Tonstein	237,0 – 254,0	$1,0 * 10^{-11}$
11	Hutgestein / Gipsstein	254,0 – 273,5	$5 * 10^{-13}$ ($4,5 * 10^{-11}$)*

* Der Wert in Klammern stellt als „negativster“ Messwert im Hutgestein beider Schächte eine konservative Annahme dar und wird den hydraulischen Berechnungen zu Grunde gelegt.

BfS	Konzeptplanung der Schachtverschlüsse für die Schächte Bartensleben und Marie des ERA Morsleben	
9M/ 223 450 11/GHS/ TF/ 0001/00	Stand: 10.03.2004	Seite 140 von 215

6.4.3.2 Dichtmaterialauswahl und hydraulische Kennwerte

Auf Grund der Löslichkeit der Salinargesteine gegenüber den ungesättigten Deckgebirgswässern ist durch die Existenz der Salzlagerstätten stets eine langzeitwirksame, geohydraulische Trennung zwischen Deck- und Salinargebirge nachgewiesen. Diese Trennung erfolgt durch dichtende Schichten innerhalb des Deckgebirgskomplexes, die jedoch beim Schachtabteufen durchbrochen wurden. Durch die Brunnenwirkung des Schachtes erfolgt eine Entwässerung der wasserführenden Schichten im schachtnahen Deckgebirge und dort die Aufhebung der geohydraulischen Trennung zwischen Deckgebirge und Salinar.

Die Beurteilung der hydrogeologischen/geohydraulischen Situation auf der Basis gemessener Zuflussmengen bzw. durch visuelle Begutachtung von Feuchtstellen im Schacht stellt lediglich eine Bestandsaufnahme der zum Zeitpunkt der Messungen/Beobachtungen vorliegenden Situation dar. Die ursprüngliche (vor dem Schachtabteufen) und die langfristig wieder zu erwartende (nach Einbau des Dichtelementes) hydrogeologische/geohydraulische Situation kann nur durch In-Situ-Permeabilitätsmessungen quantitativ erfasst werden. Die In-Situ-Messungen der Permeabilität bzw. hydraulischen Leitfähigkeit und die geologische Erkundung der Schichtmächtigkeiten bilden somit die Grundlagen für den rechnerischen Nachweis zur Gebrauchstauglichkeit (Bemessungsziel 2 m³/a) des Dichtsystems. Die vorliegenden und angesetzten Messwerte zur hydraulischen Leitfähigkeit müssen deshalb vor Bauausführung bestätigt werden.

Die vorliegenden Werte zur hydraulischen Leitfähigkeit der Deckgebirgsschichten ließen den Schluss zu, dass im Deckgebirge nicht von einer technisch dichten Barriere (im Sinne der Vorgehensweise im Salinar) ausgegangen werden konnte. Somit konnte sich bei der Modellierung der Strömungsprozesse nicht nur auf die Dichtung selbst und das unmittelbar angrenzende u.U. aufgelockerte Deckgebirge beschränkt werden, sondern es musste vielmehr der gesamte Einflussbereich des Schachtes untersucht werden. Die Ausdehnung dieses Einflussbereichs ist vom Schachtradius, von den Druckverhältnissen, den hydraulischen Leitfähigkeiten des Gebirges, den durchströmten Schichtmächtigkeiten und der Standzeit des Schachtes abhängig.

Auch die Materialauswahl für ein Dichtelement im Deckgebirge musste den genannten Grundsätzen Rechnung tragen. Innerhalb des Deckgebirges ist keine absolut dichte Quer-

BfS	Konzeptplanung der Schachtverschlüsse für die Schächte Bartensleben und Marie des ERA Morsleben	
9M/ 223 450 11/GHS/ TF/ 0001/00	Stand: 10.03.2004	Seite 141 von 215

schnittsabdichtung erforderlich. Vielmehr ist im Sinne einer Nachbildung der ehemals bestehenden natürlichen Situation vorzugehen und ein Dichtmaterial auszuwählen, dass die Wiederherstellung dieser geohydraulischen Ausgangsverhältnisse auch im Schachteinflussbereich garantiert.

Dieser Grundsatz war durch die gezielte Materialauswahl bzw. die Einstellung von Materialeigenschaften realisierbar. Für die Dichtelemente gegen Deckgebirgswässer wurden Bentonitmaterialien ausgewählt. Durch eine Vielzahl internationaler wissenschaftlicher Untersuchungen u.a. in [78], [113], [114] und nicht zuletzt durch die breite Anwendung dieser Materialien in der geotechnischen Praxis als Dichtmaterial in über- und untertägigen Absperrbauwerken u.a. in [10], [115] konnte die prinzipielle Eignung dieser Bentonite nachgewiesen werden.

Die entscheidenden Bemessungsgrößen (hydraulische Leitfähigkeit und Quelldruck) sind für die ausgewählten Bentonitmaterialien stets abhängig von der gewählten Einbautrockendichte und der Art der angreifenden Flüssigkeit. Diese Zusammenhänge wurden in einer ganzen Reihe wissenschaftlicher Publikationen veröffentlicht [16], [34], [78], [113], [116]. Insbesondere im Zusammenhang mit salinaren Lösungen wurde durch deutsche und amerikanische Arbeiten der Wissensstand erweitert und die Datenbasis ergänzt [23], [29].

Als die für Abdichtungsaufgaben entscheidende Einflussgröße muss die Quelldruckausbildung des Bentonits unter Flüssigkeitszutritt identifiziert werden. In Folge dieses Quelldrucks stellen sich in der Kontaktfuge zum Gebirge stets Flächenpressungen ein, die über dem angreifenden Flüssigkeitsdruck liegen. Somit wird die vollständige Abdichtung der Fuge zwischen Dichtung und Gebirge durch den Überdruck zum angreifenden Flüssigkeitsdruck gewährleistet. Die Zusammenhänge zwischen angreifenden Flüssigkeitsdrücken und gemessenen Gesamtdrücken sind u.a. ausführlich in [23] diskutiert.

Für die Auslegung der Dichtelemente hinsichtlich der Ausbildung eines Quelldruckes wird im Folgenden die Veröffentlichung von DIXON [113] herangezogen. Dieser Quelle liegen die wichtigsten Literaturstellen [78], [79], [80], [81], [82], [83], [84], [85], [86], [87], [88], [89], [90], [91], [92], [93] zur Quelldruckproblematik im nichtsalinaren Umfeld zu Grunde.

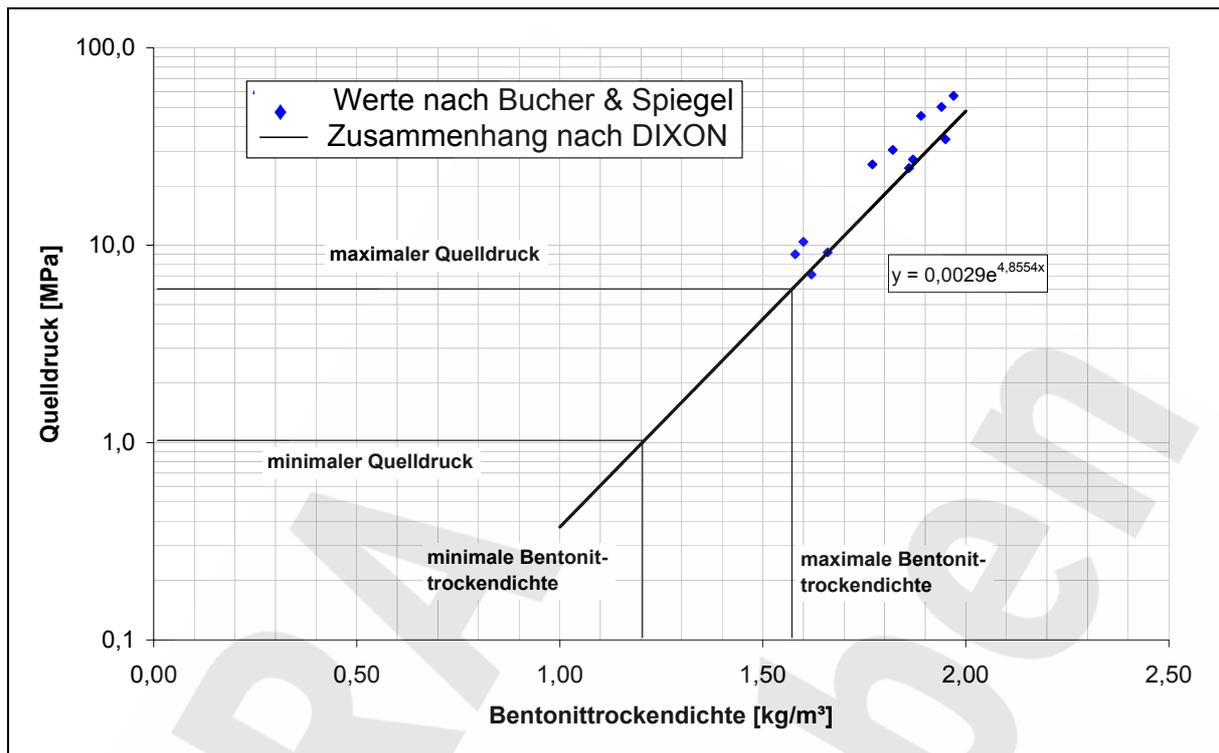


Abbildung 28: Zusammenhang zwischen Quelldruck und Bentonittrockendichte gegenüber Wasser nach [113]

Entscheidend für die Gewährleistung der Gebrauchstauglichkeit des Verschlussystems ist die Einhaltung des Quelldrucks in zu definierenden Grenzen. Der in Abbildung 28 empirisch gefundene Zusammenhang zwischen dem Quelldruck und der Trockendichte ist neben der ausgewählten Bentonitart und dem quelldruckinduzierenden Fluid auch von den versuchstechnischen Randbedingungen im Labor (Quelldruckapparat, Oedometer, Temperatur, etc.) abhängig.

Generell ist anzumerken, dass der bei Flüssigkeitszutritt im Bentonit sich aufbauende Quelldruck empfindlich auf die Änderung der Trockendichte reagiert. Aus diesem Grunde ist in den weiteren Planungsphasen (Entwurfs-, Ausführungsplanung) ein geeignetes Qualitätssicherungssystem zu entwickeln, welches den qualitätsgerechten Einbau des Bentonits hinsichtlich der Einhaltung der Trockendichte über den gesamten abzudichtenden Schachtquerschnitt überwacht und somit auch die Ausbildung des Quelldruckes bei Flüssigkeitszutritten in den vorgegebenen Grenzen gewährleistet.

BfS	Konzeptplanung der Schachtverschlüsse für die Schächte Bartensleben und Marie des ERA Morsleben	
9M/ 223 450 11/GHS/ TF/ 0001/00	Stand: 10.03.2004	Seite 143 von 215

Der in Abbildung 28 angegebene Zusammenhang zwischen Bentonittrockendichte und Quelldruck nach [113] wurde empirisch für verschiedene Bentonitarten bestimmt. Untersuchungen zum Quelldruckverhalten in Abhängigkeit von der Bentonittrockendichte wurden für MONTIGEL (MONTIGEL früherer Handelsname von CALCIGEL) von BUCHER & SPIEGEL [78] durchgeführt. Diese ebenfalls in Abbildung 28 mitaufgetragenen Versuchsergebnisse liegen im Bereich des in [113] ermittelten Zusammenhanges zwischen Bentonittrockendichte und Quelldruck. Im Rahmen der Konzeptplanung wurde daher der in [113] angegebene Zusammenhang:

$$p_Q = 0,0029 \cdot \exp(4,8554 \cdot \rho_{tr}) \quad (1)$$

mit p_Q - Quelldruck in [MPa] und
 ρ_{tr} - Bentonittrockendichte in [g/cm³].

zur Auslegung des Dichtelement DE 1 (Dichtmaterial Calcigel-Granulat) genutzt. Auch bei anderen internationalen Projekten [117] wird der Ansatz aus [113] verfolgt.

Zur vollständigen Abdichtung der Kontaktfuge zwischen Gebirge und Dichtelement wurde in Technikum- und In-Situ-Versuchen ein Mindestquelldruck von 1 MPa ermittelt [16], [23]. Neben der Abhängigkeit des Quelldrucks von der Einbautrockendichte des Bentonits spielt auch die angreifende Flüssigkeit bzw. deren Mineralisation eine entscheidende Rolle. Die Reduzierung der Quelldrücke bei angreifenden salinaren Lösungen gegenüber den Referenzwerten für Wasser wurde bereits in früheren Untersuchungen [23] festgestellt und konnte auch durch internationale Forschungen bestätigt [29], [113] werden.

Neben dem Mindestquelldruck zur sicheren Abdichtung der Kontaktfuge muss als oberer Grenzwert der Fracdruck des umgebenden Gebirges beachtet werden. Der Quelldruck des Bentonits wirkt als Flächenpressung auf die Schachtstöße. Die aus den in [5] angegebenen primären Gebirgsdrücken resultierenden minimalen Tangentialspannungen bilden somit das obere Grenzkriterium für die anzusetzenden Quelldrücke.

In der Tabelle 21 sind die Horizontalkomponenten der Primärspannungen nach den Vorgaben [5] in den ersten beiden Spalten enthalten. Nach der elastischen Lösung der Spannungen um kreisförmige Hohlräume ergeben sich bei diesen Primärspannungen die in der 3. Spalte ange-

fürten minimalen Tangentialspannungen (M - Marie; B - Bartensleben) an der Kontur (vgl. hierzu Kapitel 5.1.2 in [73]).

Tabelle 21 : Gebirgsdrücke aus [5] und berechnete minimale Tangentialspannung als Fracdruck-Kriterium

Homogenbereich	Gebirgsdruck horizontal max.	Gebirgsdruck horizontal min.	Tangentialspannung am Ausbruch min.
	MPa	MPa	MPa
M 2	10,10	6,30	8,80
M 3	20,6	11,6	14,20
B 8	7,27	5,13	8,12
B 9	keine Angabe	keine Angabe	8,12*
B 10	8,18	7,01	12,85
B 11	14,47	8,81	10,06

* minimaler Wert der umgebenden Homogenbereiche

Für die Dichtelemente gegen zufließende Deckgebirgsässer wird ein CALCIGEL-GRANULAT (0 bis 10 mm) mit einer Bentonittrockendichte bei Einbau von 1,45 g/cm³ gewählt. Nach Gleichung (1) ergibt sich damit ein Quelldruck von 3,3 MPa. Dieser Wert deckt auch Unsicherheiten ab, die aus einer teilweisen Mineralisation der zufließenden Deckgebirgsässer (vgl. [5]) und aus Auflockerungen des Dichtelementes infolge von Setzungen der Widerlager säule resultieren können.

Ein Vergleich mit den in Tabelle 21 dokumentierten minimalen Tangentialspannungen an der Schachtkontur beweist, dass ein FRAC infolge des Quelldruckes von 3,3 MPa nicht auftritt.

Bei der angesetzten Bentonittrockendichte von 1,45 g/cm³ ist eine hydraulische Leitfähigkeit von etwa $2 \cdot 10^{-12}$ m/s zu erwarten. Dieser Wert liegt oberhalb der in [113] angegebenen Werte, stellt dadurch jedoch eine konservative Annahme gegenüber zu erwartenden negativen Einflüssen (Mineralisation der Deckgebirgsässer, Auflockerung, Imperfektionen) dar. Abschließend sind die Kennwerte für die Deckgebirgsdichtungen der Schächte Marie und Bartensleben in Tabelle 22 zusammengefasst.

Vereinfachend wird für die Dichtelemente DE 1 ein homogener Aufbau angenommen.

Tabelle 22 : Kennwerte des Dichtmaterials (Calcigel-Granulat 0 – 10 mm) für das Dichtelement DE 1

Bentonittrockendichte	Quelldruck	hydraulische Leitfähigkeit
[g/cm ³]	[MPa]	[m/s]
1,45	3,3	2*10 ⁻¹²

6.4.3.3 Geohydraulische Modellrechnungen

Wie bereits beschrieben, ist die geohydraulische Situation im Deckgebirge anders als die Situation im Salinarbereich der Schächte zu beurteilen. Während im Salinar von einer begrenzten Umströmung der Dichtelemente durch die konturnahe Auflockerungszone ausgegangen wird (ungestörte Bereiche des Salinargebirges sind technisch dicht), muss im Deckgebirge von einer großräumigen Um- und Anströmung des Dichtelementes bzw. des Schachteinflussbereiches ausgegangen werden. Der Schacht wirkt als entwässernder Brunnen, so dass die großräumige, hydrogeologische Gesamtsituation gestört ist.

6.4.3.3.1 Referenzmodell

Berechnungen, die sowohl die Volumenströme durch und um das Dichtelement als auch die Anströmvorgänge aus den umgebenden Deckgebirgshorizonten berücksichtigen, können auf Grund der komplexen und gekoppelten Geoströmungsvorgänge nur mit Hilfe numerischer Modelle durchgeführt werden.

Für die Simulation wurde das Programmsystem MODCALIF verwendet. Das Programm ermöglicht die Simulation dreidimensionaler, dichtebeeinflusster Strömungs- und Stofftransportprozesse. Das Programm wurde an mehreren Benchmark-Modellen verifiziert (Bsp.: Hydrocoin [118]) und findet Anwendung für die Abbildung und Prognose großräumiger Strömungs- und Stofftransportprozesse [118], [119].

Zunächst wurde zur Untersuchung verschiedener Einflussgrößen ein dreidimensionales Referenzmodell entwickelt. Untersucht wurde der Einfluss unterschiedlicher hydraulischer Druckgradienten, verschiedener Dichtelementlängen, unterschiedlicher hydraulischer Leitfähigkeiten des Dichtelementes und der Einfluss der Größe des offenen Schachtabchnittes

BfS	Konzeptplanung der Schachtverschlüsse für die Schächte Bartensleben und Marie des ERA Morsleben	
9M/ 223 450 11/GHS/ TF/ 0001/00	Stand: 10.03.2004	Seite 146 von 215

unterhalb des Deckgebirgsdichteelementes DE 1 bei Vernachlässigung der nachgeschalteten Dichtelemente.

Als wesentliche Ergebnisse aus den Berechnungen mit dem Referenzmodell können zusammengefasst werden:

1. Der kritische Volumenstrom von $2 \text{ m}^3/\text{a}$ kann bei ausschließlicher Betrachtung des Dichtelementes (ohne Um- und Anströmung durch und aus dem Gebirge) und dem Ansatz der unter Absatz 6.4.3.2 eingeführten hydraulischen Kennwerte bereits bei Dichtelementlängen von weniger als 10 m eingehalten werden.
2. Der Gesamtvolumenstrom durch das Dichtelement und der Um- bzw. Anströmung aus dem umgebenden Gebirge hängt im Wesentlichen von der Länge des theoretisch angenommenen, offenen Schachtabschnittes unterhalb des Deckgebirgsdichteelementes DE 1 und damit entscheidend von der angesetzten Deckgebirgs- bzw. Hutgesteinspermeabilität ab.

6.4.3.3.2 Berechnungen Schacht Marie

In Abbildung 29 ist das entworfene Modell für den Schacht Marie dargestellt. Es wurden der Schacht und ein Gebirgsausschnitt mit den in Abbildung 29 dokumentierten geometrischen Abmessungen in ein rotationssymmetrisches Berechnungsmodell überführt. Die Druckbelastung am oberen Modellrand beträgt entsprechend der Teufenlage 148,80 m Wassersäule. Die Dichte der strömenden Deckgebirgswasser wurde mit $1,078 \text{ g/cm}^3$ als konservativer Höchstwert der in [5] dokumentierten Dichten angesetzt. Die Kennwerte für das Dichtmaterial bzw. für das umgebende Gebirge wurden, wie in den Abschnitten 6.4.3.1 und 6.4.3.2 beschrieben, in das Berechnungsmodell übernommen. Für das Hutgestein wurde von einer einheitlichen hydraulischen Leitfähigkeit von $4,5 \cdot 10^{-11} \text{ m/s}$ für beide Schächte ausgegangen. Für den oberhalb des Dichtelementes liegenden Schachtabschnitt wurde ein Verfüllmaterial mit einer hydraulischen Leitfähigkeit von $k_f = 1 \cdot 10^{-8} \text{ m/s}$ (Mineralgemisch) simuliert. Der offene Schachtbereich unterhalb des Dichtelementes wurde mit einem Luftdruck von 0,10 MPa beaufschlagt. Die Vorgabe der Randbedingung von 0,1 MPa (Luftdruck) im Schachtbereich unterhalb der Deckgebirgsdichtung simuliert konservativ (kein Dichtelement, kein Druckausgleich durch Flüssigkeitszulauf) einen maximalen Druckgradienten

zwischen Deckgebirge und Grubengebäude. Modellunterschiede zum vorliegenden Bauwerksentwurf beruhen lediglich auf den Längen der nicht berücksichtigten Filter- und Übergangsschichten.

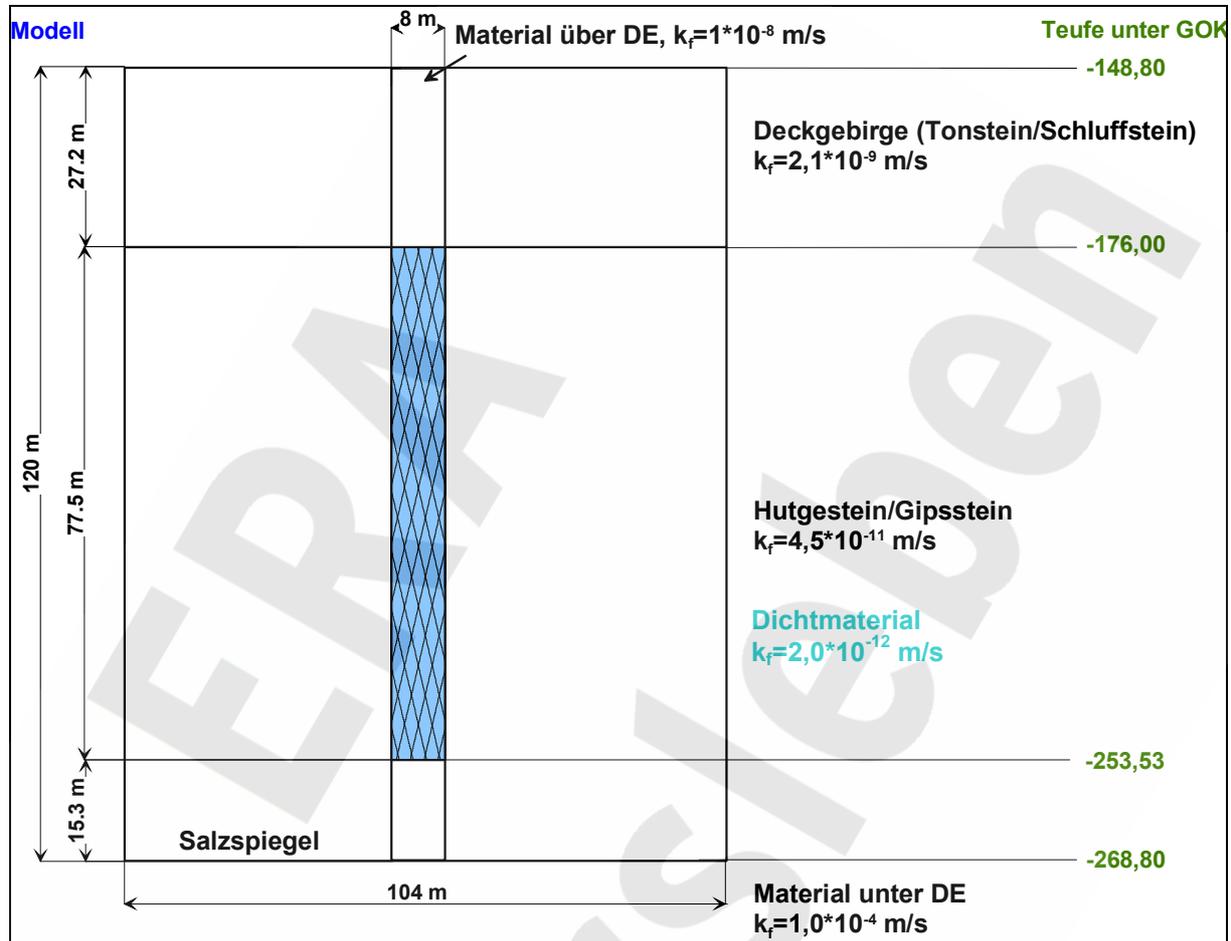


Abbildung 29: Schematische Darstellung des Modellaufbaus für den Schacht Marie

In Auswertung der Modellrechnungen für den Schacht Marie ergab sich ein Volumenstrom, der mit $4,0 \text{ m}^3/\text{a}$ über dem Grenzkriterium des zulässigen Volumenstroms von $2 \text{ m}^3/\text{a}$ liegt. Die Verteilung der Strömungsgeschwindigkeiten in Abbildung 30 bzw. in Abbildung 31 zeigt, dass die größte Strömungsgeschwindigkeit unterhalb des Dichtelementes am offenen Schachtabschnitt auf Grund des dort vorliegenden maximalen Druckgradienten auftritt. Der vertikale Zufluss durch das Dichtelement fällt wesentlich geringer als die horizontale Anströmung des offenen Schachtbereiches aus. Entscheidend dafür sind die im Verhältnis zum Dichtmaterial großen hydraulischen Leitfähigkeiten des umgebenden Gebirges (Hutgestein), die die Werte des Dichtmaterials um das 22,5fache übersteigen. In den Abbildungen ist zu-

sätzlich zu den Strömungsgeschwindigkeiten das Stromliniennetz dargestellt. Die Stromlinien münden in den offenen Schachtabschnitt an der unmittelbaren Unterkante des Dichtelementes DE 1.

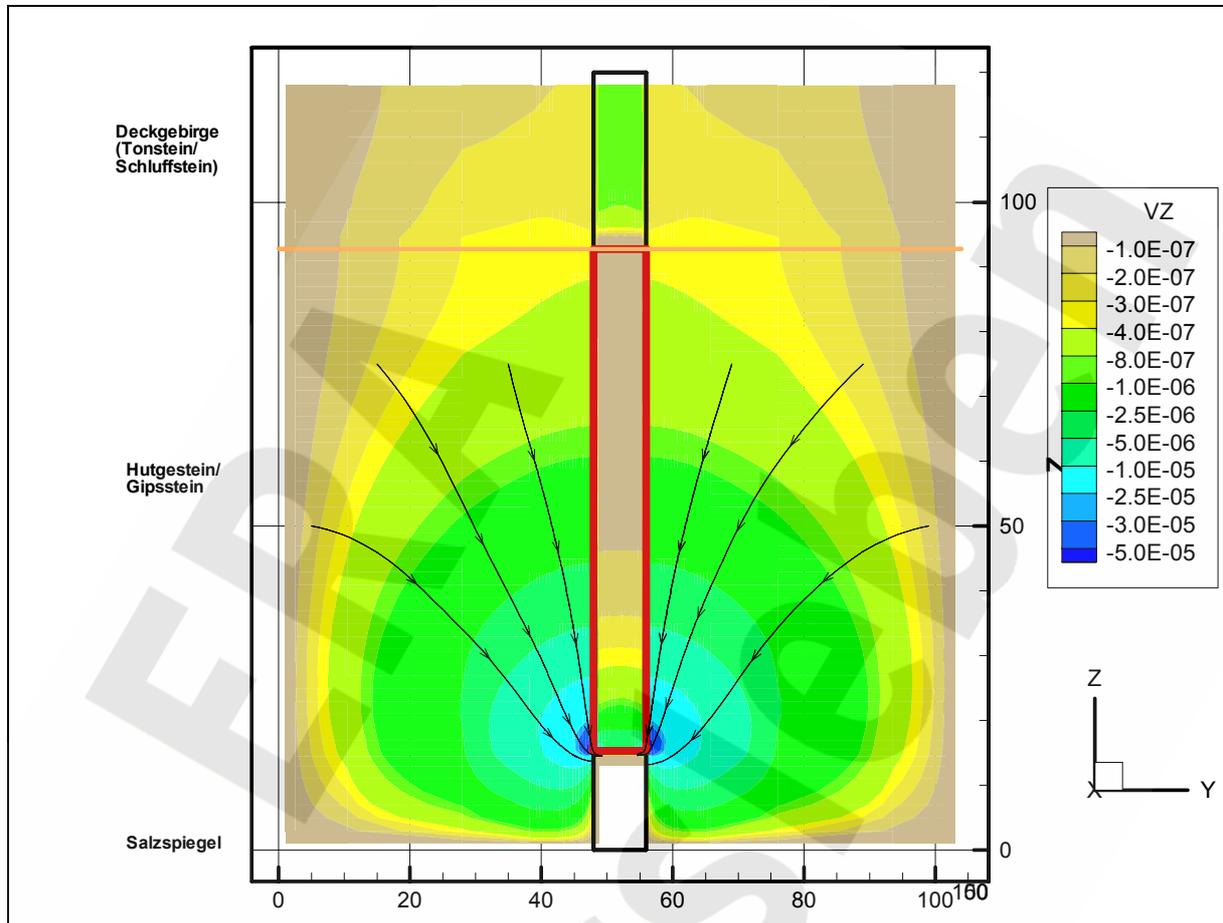


Abbildung 30: Vertikalschnitt, Darcy-Geschwindigkeit in z-Richtung (m/d) und Stromliniennetz, Schacht Marie

Wird die Deckgebirgsdichtung unabhängig vom umgebenden Gebirge betrachtet, so ergeben sich nur wenige Meter an Dichtungslänge, die das geforderte Grenzkriterium erfüllen. Die Berechnungen belegen somit, dass für die Deckgebirgsdichtung als wesentlichster Einflussparameter die hydraulische Leitfähigkeit des Gebirges zu betrachten ist.

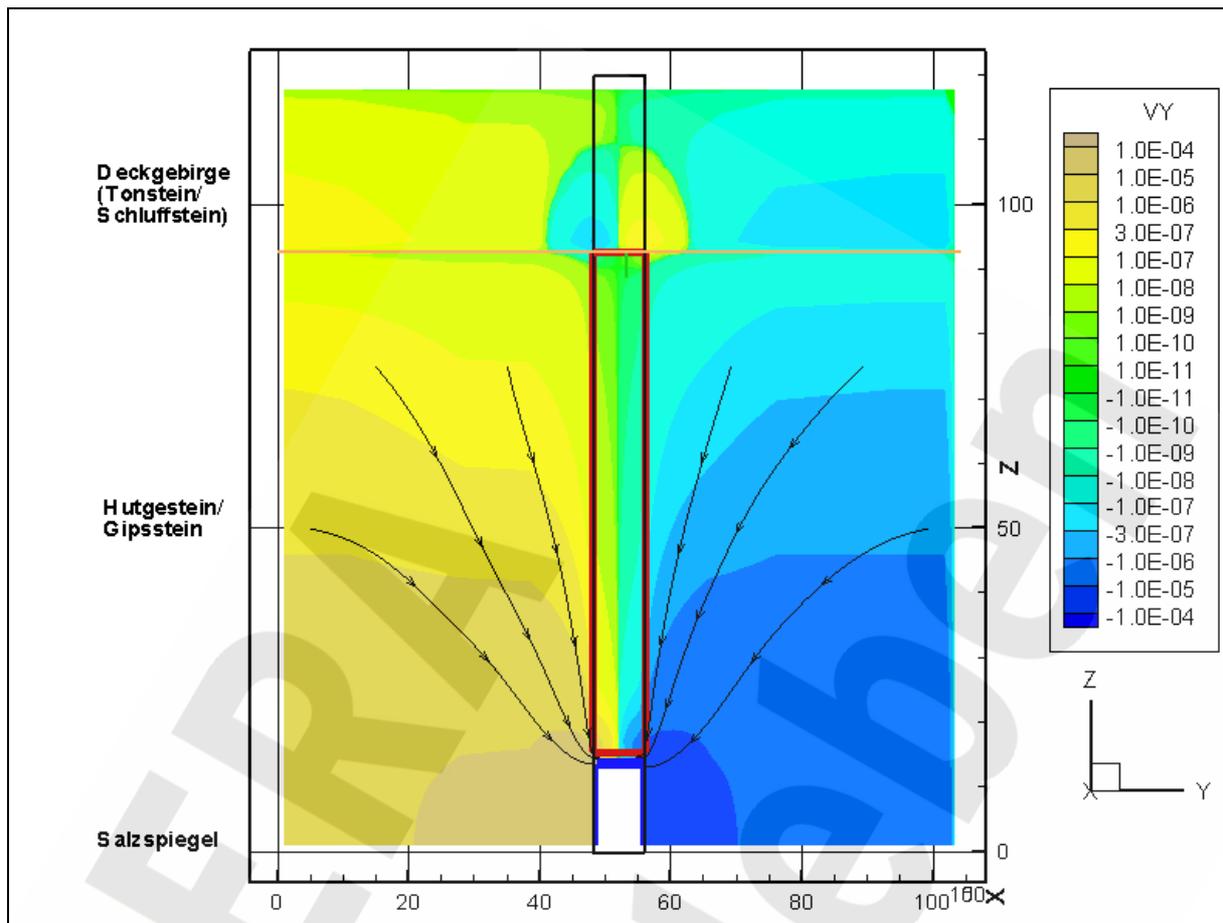


Abbildung 31: Vertikalschnitt, Darcy-Geschwindigkeit in x- bzw. y-Richtung (m/d) und Stromliniennetz, Schacht Marie

6.4.3.3 Berechnungen Schacht Bartensleben

Unter Beachtung der geometrischen Vorgaben aus dem Bauwerksentwurf wurde für den Schacht Bartensleben das in Abbildung 32 dargestellte Berechnungsmodell entwickelt.

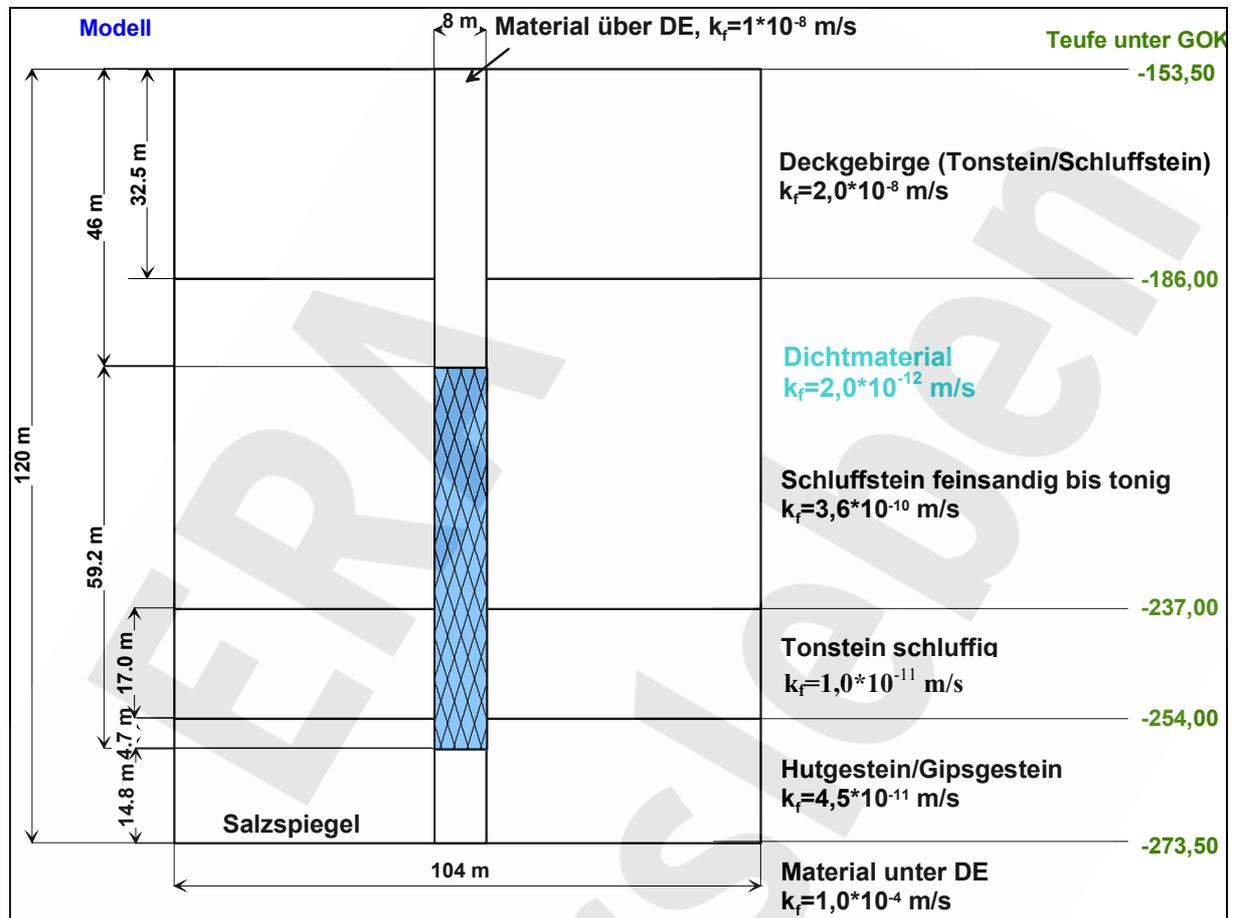


Abbildung 32: Schematische Darstellung des Modellaufbaus für den Schacht Bartensleben

Im Vergleich mit den vorliegenden geologischen Schachtprofilen in [5] wurde im Berechnungsmodell die Feinsandschicht nicht abgebildet. Vielmehr wurde vereinfachend und konservativ das Gebirge oberhalb des Dichtelementes als Homogenkomplex mit einer mittleren hydraulischen Leitfähigkeit von $k_f = 2 \cdot 10^{-8}$ m/s abgebildet. Die Füllsäule oberhalb des Dichtelementes wurde konservativ mit einem durchlässigeren Material modelliert und die an das Dichtelement anschließende redundante/diversitäre Asphaltabdichtung vernachlässigt, so dass unterhalb des Dichtelementes ein offener Schachtbereich angesetzt wurde. Für diesen Schachtbereich wurde wiederum ein Luftdruck von 0,1 MPa angesetzt. Die hydraulische Leit-

fähigkeit des Hutgesteins wurde aus konservativen Gründen entgegen den Angaben in [49] auf $4,5 \cdot 10^{-11}$ m/s festgelegt.

Als Ergebnis der Modellrechnungen für den Schacht Bartensleben ergab sich für das beschriebene Modell ein Gesamtvolumenstrom in den offenen Schachtbereich von $3,00 \text{ m}^3/\text{a}$. Die Strömungsgeschwindigkeiten nach DARCY (Abbildung 33 und Abbildung 34) belegen, dass der wesentliche Anteil des Gesamtvolumenstroms über das Gebirge in den offenen Schachtbereich strömt.

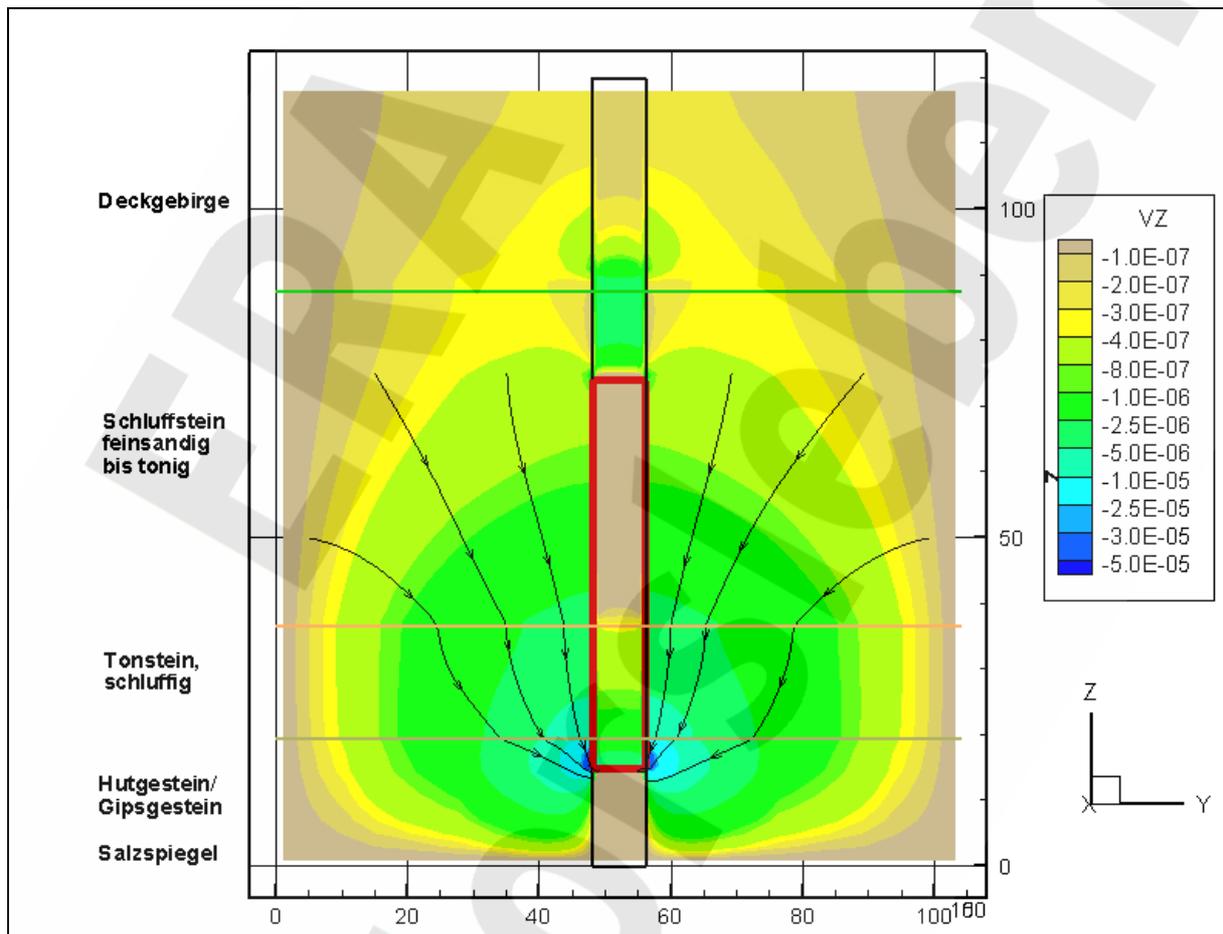


Abbildung 33: Vertikalschnitt, Darcy-Geschwindigkeit in z-Richtung (m/d) und Stromliniennetz, Schacht Bartensleben

Wie die Berechnungen für die beiden Schächte zeigen, ist der zufließende Volumenstrom nur bedingt von der hydraulischen Leitfähigkeit des Dichtmaterials und der Länge der Dichtung abhängig, sondern resultiert im Wesentlichen aus dem Zusammenwirken verschiedener Geostromungsprozesse, die sich überlagern. Die in [49] und [50] angegebenen hydraulischen

Leitfähigkeiten des Hutgesteins weichen für beide Schächte sehr stark (Faktor 90) voneinander ab. In den Modellrechnungen wurde deshalb konservativ vom ungünstigsten Größtwert der hydraulischen Leitfähigkeit ($k_f = 4,5 \cdot 10^{-11}$ m/s) ausgegangen.

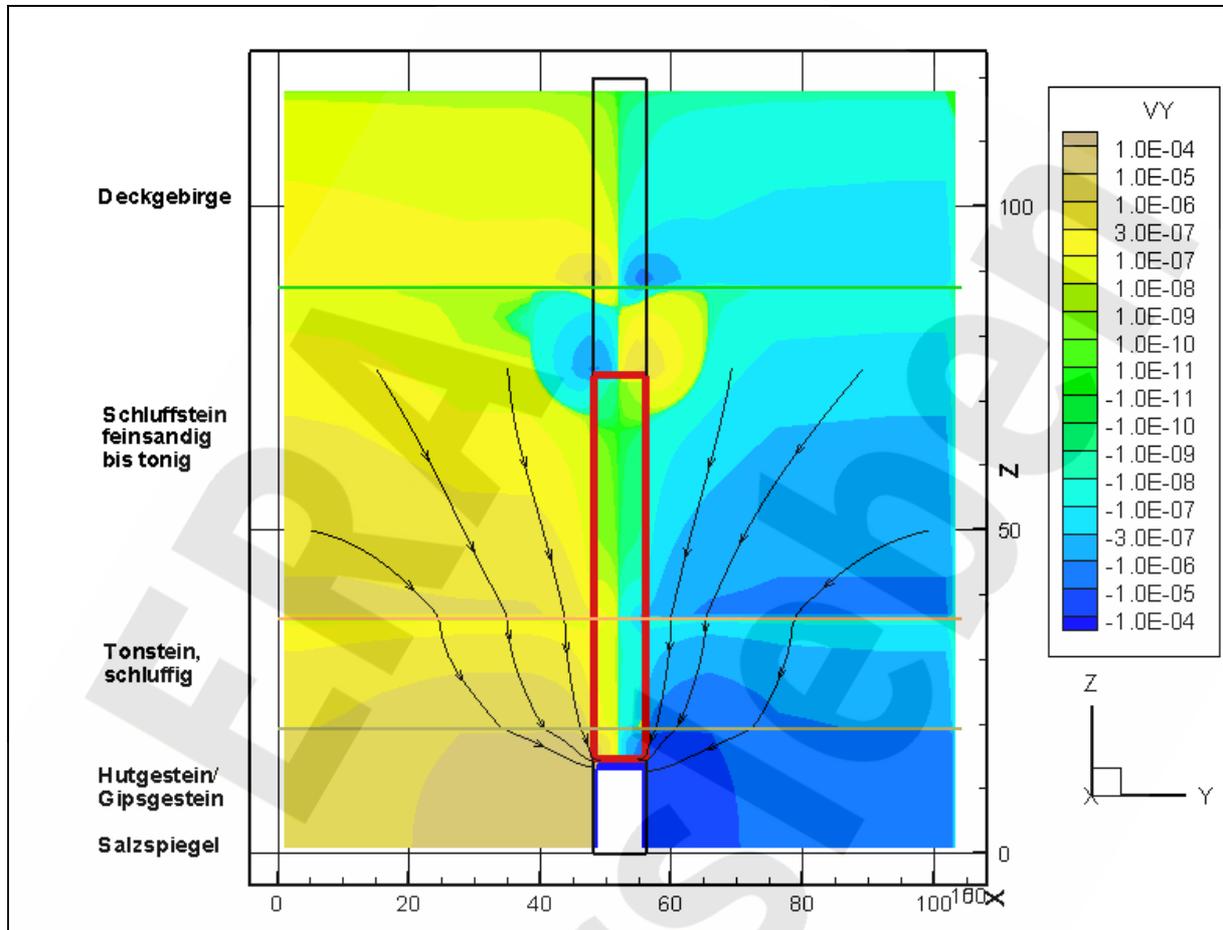


Abbildung 34: Vertikalschnitt, Darcy-Geschwindigkeit in x, bzw. y-Richtung (m/d) und Stromliniennetz, Schacht Bartensleben

6.4.3.4 *Einschätzung des Sicherheitsniveaus*

Trotz der in den numerischen Berechnungen auf Grund der vorgegebenen hydraulischen Leitfähigkeiten im Deckgebirge ermittelten Volumenströme, die das als Bemessungsziel vorgegebene Grenzkriterium ($2 \text{ m}^3/\text{a}$) überschreiten, wurde die Konstruktion des Schachtverschlusses für beide Schächte als ausreichend sicher eingeschätzt. Folgende Gesichtspunkte, die wesentlich für die Einschätzung der vorangegangenen Berechnungen sind, jedoch nicht in diese eingingen, lassen diese Aussage zu:

BfS	Konzeptplanung der Schachtverschlüsse für die Schächte Bartensleben und Marie des ERA Morsleben	
9M/ 223 450 11/GHS/ TF/ 0001/00	Stand: 10.03.2004	Seite 153 von 215

- Das jeweilige Dichtelement im Deckgebirge wurde als Einzelement ohne nachgeschaltete Dichtelemente betrachtet. Nur so konnte sich ein radialer Zustrom aus dem umgebenden Gebirge hin zum „offenen Schacht“ ausbilden, der schließlich auf Grund der verhältnismäßig hohen hydraulischen Leitfähigkeit des Deckgebirges zum Überschreiten des Grenzvolumenstromes von 2 m³/a führt. In der Realität existiert kein offener Schachtbereich (anschließendes kombiniertes Widerlager-Dichtelement DE 2). Ein sich durch evtl. abfließendes Bitumen verursachtes „offenes Fenster“ würde nach kurzer Zeit mit Deckgebirgswässern zulaufen und es käme zum Druckausgleich.
- Die angegebenen hydraulischen Leitfähigkeiten des Deckgebirges müssen im Bereich der Dichtelemente einer Prüfung unterzogen werden, die direkt aus dem Schacht heraus erfolgen sollte. Die Randbedingungen am ERA Morsleben lassen auf relativ begrenztem Raum derartige Unterschiede (Faktor 90) zwischen den Standorten Marie und Bartensleben nicht erwarten. Eine Neubestimmung dieses stark auf die Auslegung der Dichtsysteme einflussnehmenden Parameters, sollte auch im Sinne einer Kostenreduzierung (Länge der Dichtelemente) durchgeführt werden.
- Selbst bei Bestätigung der angesetzten Kennwerte für die hydraulische Leitfähigkeit im Deckgebirge durch In-situ-Permeabilitätsmessungen, sind die berechneten Zuflussmengen nur bei vorhandenem Flüssigkeitsangebot realistisch. Weder beim Abteufen noch innerhalb der etwa einhundertjährigen Standzeit der Schächte wurden in den betreffenden Hutgesteinskomplexen Zuflüsse registriert, die eine solche Erwartung rechtfertigen würden.
- Die unter Abschnitt 6.4.3.2 abgeleiteten hydraulischen Eigenschaften des Dichtmaterials genügen den Anforderungen bzw. garantieren auch bei nicht auszuschließenden Schwankungen der Einflussgrößen eine langzeitfunktionsfähige Schachtabdichtung. Solche Einflüsse können Auflockerungen des Dichtelementes durch Setzungen oder Dichteimperfektionen beim Einbau und erhöhte Mineralisationen der zuzitenden Deckgebirgswässer sein.

Der sich unter Normalbedingungen einstellende Quelldruck von ca. 3 MPa liegt um das dreifache über dem zur vollständigen Abdichtung der Kontaktzone zwischen Dichtung und

BfS	Konzeptplanung der Schachtverschlüsse für die Schächte Bartensleben und Marie des ERA Morsleben	
9M/ 223 450 11/GHS/ TF/ 0001/00	Stand: 10.03.2004	Seite 154 von 215

Gebirge erforderlichen Mindestwert. Der Nachweis, dass ein derartiger Quelldruck nicht zum Aufreißen des Gebirges (FRAC) führt, wurde erbracht.

6.4.4 Durch- bzw. Umströmung der Asphalt-dichtelemente

6.4.4.1 Angreifende Wässer und saline Lösungen

Ergebnisse zu Dichtebestimmungen der Deckgebirgswässer sind in [5] zusammengefasst. Es liegen Dichtemessergebnisse der Deckgebirgswässer für alle Homogenbereiche des Deckgebirges der Schächte vor. Als unterer Grenzwert für nicht mineralisierte Wässer wurde eine Dichte von $1,000 \text{ g/cm}^3$ angenommen. Als mittlerer Wert wurde in [5] eine Dichte von $1,078 \text{ g/cm}^3$ für die Wässer im Hutgestein des Schachtes Marie angegeben. Auch die Lösungen im Hutgestein können eine NaCl-Sättigung erreichen.

Im Gegensatz zum Deckgebirge lagen für die aus dem Salinar angreifenden Lösungen keine eindeutigen Vorgaben hinsichtlich der Zusammensetzung bzw. der Eigenschaften vor. Aus diesem Grund musste von verschiedenen möglichen Lösungszusammensetzungen ausgegangen werden. Allerdings kann sich langfristig nur eine Lösung im Grubengebäude einstellen, die sich zwischen einer NaCl-Lösung und einer IP21-Lösung bewegt. Für diese Lösungen werden folgende Dichten angenommen [72]:

IP21-Lösung: $1,292 \text{ g/cm}^3$

NaCl-Lösung: $1,198 \text{ g/cm}^3$.

Die Dichten für die Lösungen wurden bei einer Temperatur von 25 °C bestimmt [72].

In den weiteren Betrachtungen wurde von einer IP21-Lösung ausgegangen, die mit einer Dichte von $1,292 \text{ g/cm}^3$ zum Ansatz gebracht wurde.

6.4.4.2 Gebirgstemperaturen

Im Hinblick auf die hydraulischen Berechnungen und die Betrachtungen zu möglichen Asphaltverlusten spielen die vorherrschenden Gebirgstemperaturen eine wesentliche Rolle. Insbesondere sind die Viskositäten der eingesetzten Bitumen/Asphalte und der anstehenden Laugen stark temperaturabhängig.

BfS	Konzeptplanung der Schachtverschlüsse für die Schächte Bartensleben und Marie des ERA Morsleben	
9M/ 223 450 11/GHS/ TF/ 0001/00	Stand: 10.03.2004	Seite 156 von 215

6.4.4.3 Materialauswahl Asphalt/Bitumen

Bitumen stellen komplexe, natürliche oder künstlich hergestellte Kohlenwasserstoffverbindungen dar. Bitumen können als schwerlösliche Rückstände bei der Erdölaufbereitung gewonnen oder aber als Rohstoff abgebaut werden.

Asphalte dagegen stellen Gemische aus Bitumen mit Mineralstoffen dar, die ggf. auch weitere Zuschläge enthalten können. Die Begriffe Bitumen und Bitumenmischungen sind in [121] genormt.

Bitumen ist gegenüber Wasser und Salzlösungen undurchlässig und nicht löslich. Die Eignung von Bitumen und Asphalten für bergbauliche und andere Aufgaben ist unbestritten und wurde in Abschnitt 6.1.3 nachgewiesen.

Auf Grund der großen Adhäsionskräfte zwischen Bitumen und Salzoberfläche (Stein- und Kalisalze) wirkt das Bitumen als benetzendes Fluid, so dass sich bei ggf. einstellenden Bitumenverlusten eine kugelförmige, konkav gekrümmte Oberfläche einstellt, die eine vollständige Abdichtung der Kontaktfugen garantiert. Versuche zu dieser Problematik wurden in [12] beschrieben.

Die üblicherweise im Straßenbau zur Anwendung gebrachten Kennwerte für die Charakterisierung der Bitumen sind für eine langzeitige Einschätzung des Bitumenverhaltens nicht ausreichend. Bei langzeitiger Beanspruchung verhalten sich Bitumen wie zähfließende Flüssigkeiten. Dichte und Viskosität im zutreffenden Temperaturbereich sind deshalb als maßgebende Kennwerte zu bewerten.

Zur Herstellung der kombinierten Widerlager-Dichtelemente werden Bitumen der Sorte B 200 und B 80 ausgewählt. Auf Grund der verhältnismäßig geringen Viskosität bei der unter 6.4.4.2 ermittelten Umgebungstemperatur ist für diese Bitumen ein gleichmäßiges Einbringen in das „Schottergerüst“ sowie darüber hinaus ein Abdichten höherpermeabler Gebirgsbereiche zu erwarten.

Für den Asphalt des kombinierten Widerlager-Dichtelementes DE 2 ist ein Beschweren durch Kalksteinmehlfüller vorzusehen, um mit ausreichender Sicherheit ein Aufschwimmen auf den gering mineralisierten Deckgebirgschwässern zu verhindern. Auf Grund des Feststoffanteils im Bitumen erhöht sich dessen Viskosität, wie nachfolgend beschrieben wird. Um für beide

Dichtelemente annähernd gleiche Viskositätswerte zu erhalten, wurde für das obere, zu beschwerende Dichtmaterial ein B 200 ausgewählt. Dabei wird für das Rohbitumen im Ausgangszustand von den in [12] angegebenen und in [95] bestätigten Viskositäten ausgegangen.

Tabelle 23 : Dynamische Viskositäten für Bitumen B 80 und B 200 [12], [95]

Temperatur	Viskosität B 80	Viskosität B 200
[°C]	[Pa*s]	[Pa*s]
20	200.000	100.000
30	20.000	10.000
40	2.400	1.200
50	480	230
60	130	60
80	18	9
100	5	2,5

Wie aus Tabelle 23 erkennbar ist, ist die Viskosität der Bitumen stark temperaturabhängig. Aus diesem Grund ist eine Interpolation auf die anzusetzende Gebirgstemperatur erforderlich. In Abbildung 36 sind die Viskositäten über die Temperaturen aufgetragen und entsprechende Ausgleichskurven angegeben. Auf Basis dieser Ausgleichskurven wurden für die Gebirgstemperatur von 25°C folgende dynamische Viskositäten interpoliert:

B 200: 26.212 Pa*s

B 80: 52.982 Pa*s.

Die Viskositätsänderung infolge der Zugabe von Füllern wird durch Gleichung (2) theoretisch beschrieben. In Gleichung (2) wird die relative Viskosität als das Verhältnis zwischen Asphaltviskosität (gefüllertes Bitumen) und der ursprünglichen Bitumenviskosität dargestellt. Die Gleichung basiert auf praktischen Untersuchungen in [122]. Auf Grund der empirischen Herleitung der Gleichung und der getroffenen Annahmen (u.a. Füllerstoff als Kugeln gleichen Durchmessers), wird die Erarbeitung eines Qualitätssicherungsprogrammes vor dem Einbau empfohlen.

$$\eta_{rel} = \frac{\eta_{Asphalt}}{\eta_{Bitumen}} = \left(1 + \frac{1,25 \cdot c_v}{1 - 1,35 \cdot c_v} \right)^2 \quad (2)$$

mit $\eta_{Asphalt}$ - dynamische Viskosität des Asphalts
 $\eta_{Bitumen}$ - dynamische Viskosität des Bitumens
 c_v - Volumenanteil des Füllers

Die Dichte des Asphaltes im kombinierten Widerlager-Dichtelement DE 2 (gefüllertes Bitumen) soll 1.300 kg/m³ betragen, um das Aufschwimmen von geringmineralisierten Deckgebirgschwässern (vgl. Gliederungspunkt 6.4.4.4) zu garantieren.

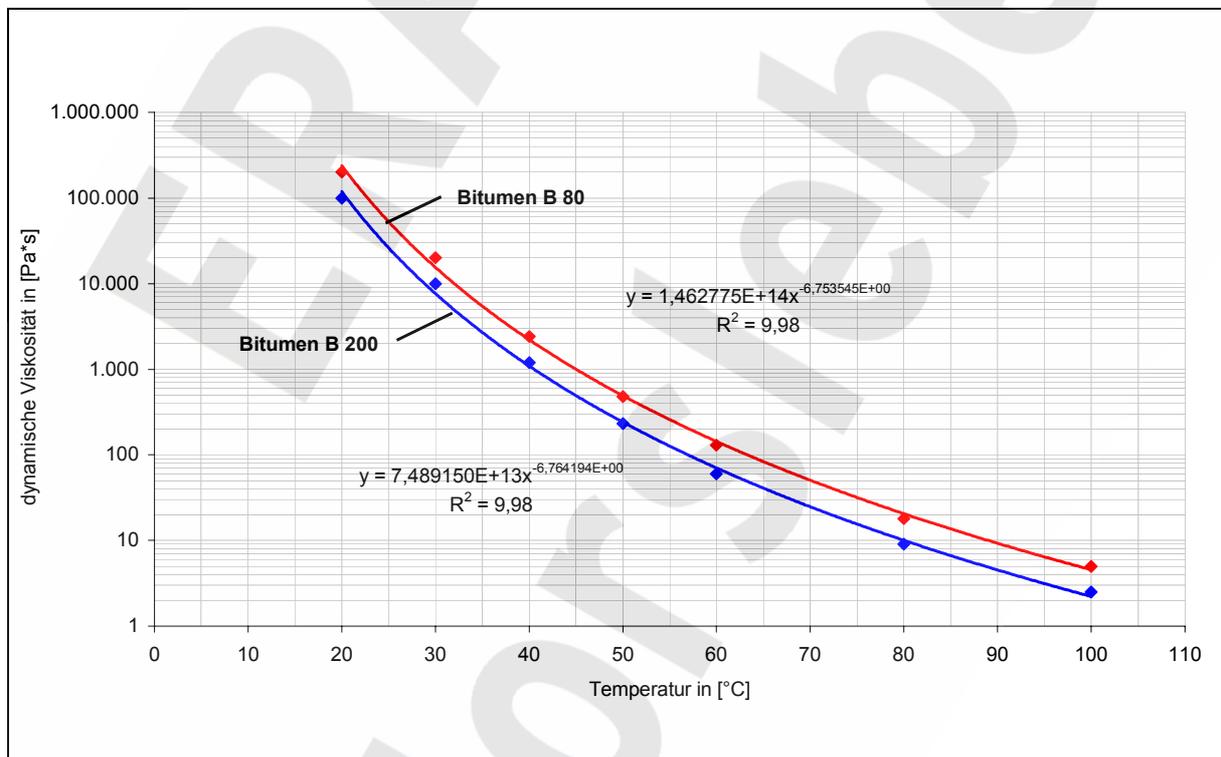


Abbildung 36: Dynamische Viskositäten von Bitumen B 200 und B 80 in Abhängigkeit von der Temperatur nach [12]

Entsprechend der Dichte des eingesetzten Bitumens B 200 ($\rho_{Bitumen} = 1.000 \text{ kg/m}^3$) ergibt sich die zuzugebende Füllermenge nach Gleichung (3). Die mittlere Dichte eines Bitumen-Mineralstoff-Gemisches (Asphalt) ergibt sich zu:

BfS	Konzeptplanung der Schachtverschlüsse für die Schächte Bartensleben und Marie des ERA Morsleben	
9M/ 223 450 11/GHS/ TF/ 0001/00	Stand: 10.03.2004	Seite 159 von 215

$$\rho_{Asphalt} = \frac{m_{Bitumen} + m_{Füller}}{V_{Bitumen} + V_{Füller}} \quad (3)$$

Mit $V_{Bitumen} = \frac{m_{Bitumen}}{\rho_{Bitumen}}$ und $V_{Füller} = \frac{m_{Füller}}{\rho_{Füller}}$ erhält man:

$$\rho_{Asphalt} = \frac{\rho_{Bitumen} \cdot \rho_{Füller} \cdot (m_{Bitumen} + m_{Füller})}{\rho_{Füller} \cdot m_{Bitumen} + \rho_{Bitumen} \cdot m_{Füller}} \quad (4)$$

Aus Gleichung (4) kann der Ausdruck zur Berechnung der zuzugebenden Füllermenge abgeleitet werden. Als Füllermaterial wird ein Kalksteinmehl (z.B.: Saxolith®2 HE der Firma GEOMIN Erzgebirgische Kalkwerke GmbH mit einer Körnung von 0 bis 12 µm und einer Korndichte von 2.860 kg/m³ oder vergleichbar) vorgeschlagen.

$$m_{Füller} = \frac{\rho_{Füller} \cdot m_{Bitumen} \cdot (\rho_{Asphalt} - \rho_{Bitumen})}{\rho_{Bitumen} \cdot (\rho_{Füller} - \rho_{Asphalt})} \quad (5)$$

Damit ergibt sich beispielhaft als zuzugebende Füllermasse auf 1.000 kg Bitumen nach (5) ein Wert von:

$$m_{Füller} = \frac{2.860 \cdot 1.000 \cdot (1.300 - 1.000)}{1.000 \cdot (2.860 - 1.300)} \cdot \left[\frac{kg \cdot kg \cdot kg \cdot m^3 \cdot m^3}{m^3 \cdot m^3 \cdot kg \cdot kg} \right] = 550 kg.$$

Dementsprechend kann der Volumenanteil des Füllers am Gesamtvolumen bestimmt werden. Der Anteil beträgt $c_v = 16\%$. Damit ergibt sich nach Gleichung (2) bei einer Temperatur von 25 °C eine Viskosität des Asphalt (Basisbitumen B 200) von

$$\eta_{Asphalt} = 26.212 \cdot \left(1 + \frac{1.25 \cdot 0.16}{1 - 1.35 \cdot 0.16} \right)^2 \cdot [Pa \cdot s] = 26.212 \cdot 1.58 \cdot [Pa \cdot s] = 41.291 \cdot [Pa \cdot s]$$

Damit liegt die Viskosität des Asphalt (Basis B 200, $\rho_{Asphalt} = 1.300 \text{ kg/m}^3$) des kombinierten Widerlager-Dichtelementes DE 2 im Bereich der Viskosität des Bitumens (Basis B 80) des kombinierten Widerlager-Dichtelementes DE 3.

6.4.4.4 Bemessung der Asphalt dichtungen

Die Bemessung der Asphalt dichtungen erfolgte nach dem Prinzip eines einzuhaltenden Gesamtvolumenstroms. Dieser Gesamtvolumenstrom setzt sich aus den Teilvolumenströmen durch den abzudichtenden Querschnitt, durch die Kontaktfuge zwischen Gebirge und Dichtung sowie dem Teilvolumenstrom durch die aufgelockerte ausbruchsnahе Gebirgszone zusammen (vgl. Gleichung (6)).

Durch die absolute Dichtigkeit des Bitumens und durch die vollständige Abdichtung der Kontaktfuge zwischen dem Dichtelement und dem Gebirge verbleibt als einzige für die Dimensionierung relevante Größe der durch den aufgelockerten Gebirgsbereich strömende Volumenstrom. Beim Ansatz der hydraulischen Höhe H wird die geodätische Höhe (z-Koordinate) vernachlässigt.

$$\dot{V} = \dot{V}_{\text{Querschnitt}} + \dot{V}_{\text{Kontakt}} + \dot{V}_g \quad (6)$$

$$\dot{V}_{\text{Querschnitt}} = 0$$

$$\dot{V}_{\text{Kontakt}} = 0$$

$$\dot{V}_g = \frac{k_{\text{fgeff}} \cdot A_g \cdot H}{L} \quad (7)$$

$$\dot{V}_g = \frac{k_{\text{fgeff}} \cdot \pi \cdot (r_g^2 - r_d^2) \cdot H}{L} \quad (8)$$

- mit k_{fgeff} - effektive hydraulische Leitfähigkeit in der Auflockerungszone in [m/s]
 r_g - Radius der Auflockerungszone (ALZ) in [m]
 r_d - Radius der Querschnittsabdichtung in [m]
H - Druckhöhe in [m]
L - Länge der Dichtung in [m].

Für die Dimensionierung der Dichtelemente im Salinargebirge ist es zunächst notwendig, den späteren Einbaureich d.h. das Steinsalz hydraulisch zu charakterisieren. Als Parameter für diese Charakterisierung dienen die Permeabilität bzw. die hydraulische Leitfähigkeit.

BfS	Konzeptplanung der Schachtverschlüsse für die Schächte Bartensleben und Marie des ERA Morsleben	
9M/ 223 450 11/GHS/ TF/ 0001/00	Stand: 10.03.2004	Seite 161 von 215

In der Literatur werden für Steinsalz im ungestörten Zustand verschiedene Permeabilitäten angegeben [20], [54], [123], [124], [125], [126]. So wurden z.B. bei In-Situ-Messungen in Salzdettfurth und in Sondershausen Permeabilitäten zwischen $k = 10^{-22} \text{ m}^2$ und $k = 10^{-24} \text{ m}^2$ in ca. 750 m Teufe [20], [123] gemessen. Messungen im Forschungsbergwerk Asse ergaben Werte von $k < 10^{-21} \text{ m}^2$ [124], [125]. Direkt am Standort des ERA Morsleben in 370 m Teufe im Schacht Marie ergab eine Messung einen Wert von $k = 10^{-19} \text{ m}^2$ [54].

In Auswertung der genannten Literaturquellen kann festgestellt werden, dass die Permeabilität des Steinsalzes unter den jeweiligen technischen Randbedingungen (Mess- und Auswerteverfahren) betrachtet werden muss. Die Permeabilitäten sind dabei so gering, dass sie in der Regel vernachlässigbar sind und das ungestörte Steinsalz als **technisch dicht** bezeichnet werden kann. Des Weiteren kann beim Vergleich der o.a. Messergebnisse festgestellt werden, dass sich die Permeabilität im Grundspannungszustand mit zunehmender Teufe (zunehmende Belastung = zunehmende Verdichtung) weiter verringert.

Für die hydraulische Leitfähigkeit des Salinargebirges am Standort ERA Morsleben wurde in [5] ein einheitlicher Wert von $k_{fg} = 2,0 * 10^{-14} \text{ m/s}$ (nach überschlägiger Umrechnung $k = 2,0 * 10^{-21} \text{ m}^2$) angegeben. Es ist anzunehmen, dass dieser Wert für den Grundspannungszustand, also für das ungestörte Steinsalz gilt. Ein entsprechender Verweis fehlt jedoch in den zur Verfügung stehenden Arbeitsunterlagen [5]. Für die Wahl der in den Dichtelement- Dimensionierungsrechnungen anzusetzenden Steinsalz-Permeabilitäten gelten folgende Aussagen/Annahmen:

- Die Untersuchung in [54] liefert den einzigen standortbezogenen In-Situ-Messwert für das Steinsalz im Bereich der Schächte. Es wurde ein Permeabilitätswert von $k = 10^{-19} \text{ m}^2$ angegeben.
- Die Untersuchungen in [49] und [50] beziehen sich auf abweichende Messverfahren. Die Permeabilität wird mit $k = 10^{-21} \text{ m}^2$ angegeben.
- Die Permeabilität nimmt mit zunehmender Teufe ab.

Aus den vorliegenden Fakten und unter Beachtung des geforderten hohen Sicherheitsniveaus wurde konservativ für die Steinsalzpermeabilität im Grundspannungszustand am Standort

ERA Morsleben ein Wert von $k = 1,0 \cdot 10^{-19} \text{ m}^2$ im Teufenbereich zwischen 270 m und 370 m angesetzt.

Der Grundspannungszustand wird durch Hohlräumeauffahrungen gestört, und es stellt sich ein sekundärer Spannungszustand um den Hohlraum ein. Mit der Änderung des Spannungszustandes ändert sich auf Grund des dilatanten Gebirgsverhaltens von Steinsalz auch die Permeabilität. Aus Abbildung 37 wird deutlich, dass für die Auslegung von Dichtbauwerken im technisch dichten Salinargebirge die Ausdehnung der ALZ und deren gegenüber dem Grundspannungszustand erhöhte Permeabilität zwingend erforderlich sind.

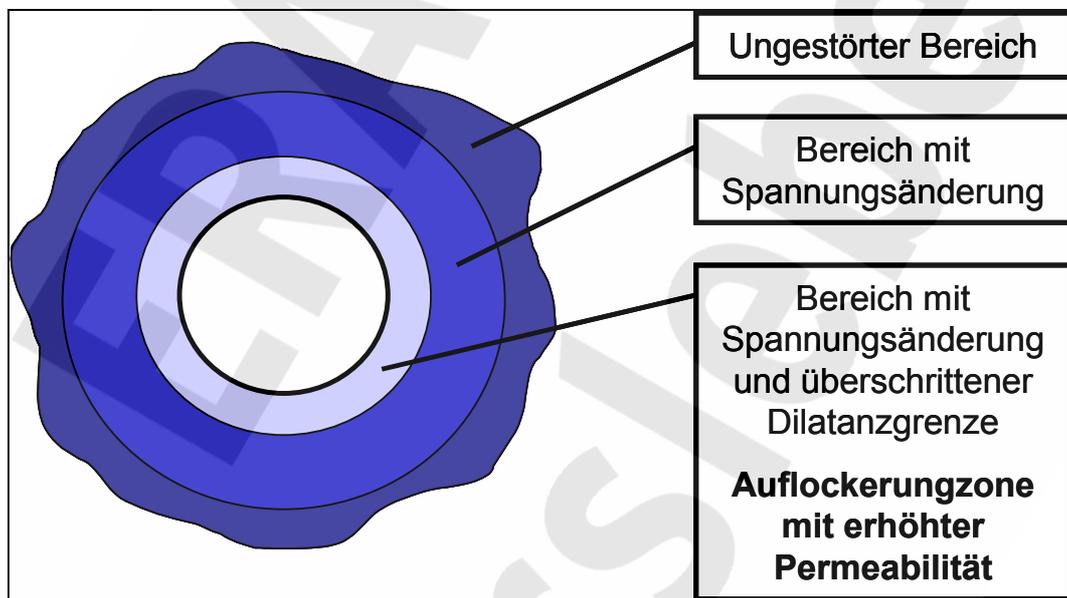


Abbildung 37: Prinzipskizze zur Permeabilitätserhöhung durch Änderung des Spannungszustandes bei Ansatz eines ebenen, isotropen Grundspannungszustandes im Schacht

Es ist weiterhin zu bemerken, dass die Art und Weise der Hohlraumherstellung einen wesentlichen Einfluss auf die Ausdehnung der Auflockerungszone hat. Die für das Schachtabteufen der Schächte des ERA Morsleben angewandte Bohr- und Sprengtechnologie im Salinar [51] ist auf Grund der beim Sprengprozess erzeugten dynamischen Beanspruchung ein Verfahren mit hoher Gebirgsbeanspruchung. Aus diesem Grund ist die Entstehung von Auflockerungszonen in den Schächten des ERA Morsleben sowohl auf die angewandte Bohr- und

BfS	Konzeptplanung der Schachtverschlüsse für die Schächte Bartensleben und Marie des ERA Morsleben	
9M/ 223 450 11/GHS/ TF/ 0001/00	Stand: 10.03.2004	Seite 163 von 215

Sprengtechnologie als auch auf das gebirgsmechanische Verhalten von Steinsalz zurückzuführen.

Während die vortriebstechnologisch bedingte ALZ durch schonende Beraubearbeit entfernbar ist, wird sich die gebirgsmechanisch bedingte ALZ auf Grund der zwischen Hohlraum und Grundspannungszustand vorliegenden Spannungsdifferenz immer wieder einstellen. Wie jedoch die Modellrechnungen unter Anwendung des in [109] und [110] aufgestellten Dilatanzkriteriums gezeigt haben, erfolgte innerhalb der etwa einhundertjährigen Standzeit des Schachtes ein derartiger Spannungsabbau infolge Hohlraumkonvergenz, dass nach Herausnahme der ALZ mit neuerlichen Dilatanz- und damit Auflockerungserscheinungen nicht zu rechnen ist (siehe Abschnitt 6.3.6

Weiterhin ist als zusätzliche Sicherheitsreserve ein unmittelbar nach Herausnahme der ALZ erfolgreicher Einbau des Schachtverschlusses vorgesehen, der zu einer Verringerung von Dilatanzerscheinungen führt.

Bei der Dimensionierung der Dichtelemente wird trotzdem konservativ eine Umströmung des Dichtelementes durch die beschriebene aufgelockerte, ausbruchnahe Steinsalzzone unterstellt.

Da die Ausdehnung sowohl der vortriebstechnologisch bedingten als auch der gebirgsmechanisch induzierten ALZ sowie deren hydraulische Leitfähigkeiten erst in späteren Planungsphasen bestimmt werden, ist es notwendig, für diese Größen begründete Annahmen zu treffen.

Verschiedene Veröffentlichungen zu den Ergebnissen von Permeabilitätsmessungen [20], [54], [123], [125], [126] bestätigen, dass die größten Permeabilitäten unmittelbar an der Ausbruchskontur zu erwarten sind und in Abhängigkeit vom Abstand zur Kontur bis auf das Permeabilitätsniveau im Grundspannungszustand abfallen. Die o.g. Forschungsergebnisse rechtfertigen den Ansatz eines linear logarithmischen Zusammenhanges zwischen Konturabstand und Steinsalzpermeabilität, wobei die größte Permeabilität am Ausbruchsrand liegt.

Für die vortriebstechnologisch und gebirgsmechanisch bedingten Auflockerungszonen der Schächte des ERA Morsleben wurden aus Analogieschlüssen von anderen Standorten folgende konservativen Annahmen getroffen:

- Die zu beraubende Auflockerungszone wird mit einer Tiefe von 0,75 m angenommen.
- Die Permeabilität am Ausbruchsrund (nach Entfernung der ALZ) wird mit $5 * 10^{-18} m^2$ angesetzt.
- Die Ausdehnung der gebirgsmechanisch bedingten ALZ beträgt 0,75 m.
- Die Permeabilität im Grundspannungszustand, d.h. im ungestörten Steinsalz beträgt $1 * 10^{-19} m^2$.

Zur Berechnung der Permeabilität in der verbleibenden Auflockerungszone wird unter Ansatz eines linear logarithmischen Zusammenhangs zwischen den Randwerten an der Kontur und im ungestörten Gebirge ein mittlerer effektiver Wert der hydraulischen Leitfähigkeit berechnet. Nachfolgend wird die Vorgehensweise geschildert. Für die Randwerte wurden folgende bereits erläuterte Annahmen getroffen:

$$k_g(r_g) = 1 * 10^{-19} m^2$$

$$k_g(r_d) = 5 * 10^{-18} m^2$$

mit $k_g(r_g)$ - Permeabilität im ungestörten Steinsalz [m^2]
 $k_g(r_d)$ - Permeabilität der ALZ am Ausbruchsrund [m^2].

Alle Eingangsgrößen sind in Tabelle 24 zusammengefasst.

Tabelle 24 : Zusammenfassung der Eingangsgrößen

Eingangswert	Formelzeichen	Einheit	Wert
Radius des Dichtelementes	r_d	[m]	4,00
Radius der Auflockerungszone	r_g	[m]	4,75
Permeabilität im ungestörten Zustand	$k_g(r_g)$	[m^2]	$1,0 * 10^{-19}$
Permeabilität an der Kontur	$k_g(r_d)$	[m^2]	$5,0 * 10^{-18}$

Zunächst sind die vorliegenden Permeabilitätswerte in Werte der hydraulischen Leitfähigkeit umzurechnen. Der Zusammenhang zwischen Permeabilität und hydraulischer Leitfähigkeit wird über die dynamische Viskosität und die Dichte der durchströmenden Flüssigkeit nach Gleichung (9) hergestellt.

BfS	Konzeptplanung der Schachtverschlüsse für die Schächte Bartensleben und Marie des ERA Morsleben	
9M/ 223 450 11/GHS/ TF/ 0001/00	Stand: 10.03.2004	Seite 165 von 215

$$k_f = k \cdot \frac{\rho_F \cdot g}{\eta_F} \quad (9)$$

- mit k_f - hydraulische Leitfähigkeit [m/s],
 k - Permeabilität [m²],
 ρ_F - Flüssigkeitsdichte [kg/m³],
 η_F - dynamische Viskosität der Flüssigkeit [Pa*s].

Als Flüssigkeit wird eine „Q-Lauge“ (IP21-Lösung) angenommen, deren Dichte und dynamische Viskosität nachfolgend angegeben sind:

$$\rho_F = 1.292 \text{ kg/m}^3$$

$$\eta_F = 5,6 \cdot 10^{-3} \text{ Pa*s}$$

Es ergeben sich nach Gleichung (9) für die hydraulische Leitfähigkeit an der Kontur und an der Grenze der ALZ zum ungestörten Grundspannungszustand folgende Werte:

$$k_{fg}(r_g) = 2 \cdot 10^{-13} \text{ m/s}$$

$$k_{fg}(r_d) = 1 \cdot 10^{-11} \text{ m/s}.$$

Aus den Randwerten der hydraulischen Leitfähigkeit an der Kontur $k_{fg}(r_d)$ und an der Grenze der ALZ zum ungestörten Grundspannungszustand $k_{fg}(r_g)$ kann über den linear-logarithmischen Ansatz nach Gleichung (10) die effektive hydraulische Leitfähigkeit über die gesamte Breite der ALZ berechnet werden.

$$\frac{k_{fgeff}}{[m \cdot s^{-1}]} = e^{ar+b} \quad (10)$$

$$k_{fgeff} = \int_{r_d}^{r_g} k_{fg}(r) \cdot dA(r) \quad (11)$$

- mit k_{fgeff} - effektive hydraulische Leitfähigkeit in der ALZ
 $dA(r)$ - Fläche der ALZ
 a - Parameter aus linear-logarithmischem Ansatz
 b - Parameter aus linear-logarithmischem Ansatz.

$$\frac{k_{\text{fgeff}}}{[\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]} = \frac{1}{\pi(r_g^2 - r_d^2)} \cdot \int_{r_d}^{r_g} 2\pi r e^{ar+b} dr = \frac{2}{(r_g^2 - r_d^2)} \cdot \int_{r_d}^{r_g} r e^{ar+b} dr \quad (12)$$

$$\frac{k_{\text{fgeff}}}{[\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]} = \frac{2}{a^2(r_g^2 - r_d^2)} \cdot e^b \cdot (e^{ar_d} - e^{ar_g} + ar_g e^{ar_g} - ar_d e^{ar_d}) \quad (13)$$

Die Parameter a und b können folgendermaßen bestimmt werden:

$$a = \frac{\ln[k_{\text{fg}}(r_g)] - \ln[k_{\text{fg}}(r_d)]}{r_g - r_d} \quad (14)$$

$$b = \ln[k_{\text{fg}}(r_g)] - ar_g = \ln[k_{\text{fg}}(r_d)] - ar_d \quad (15)$$

Die vollständigen Berechnungsergebnisse zur effektiven hydraulischen Leitfähigkeit enthält Tabelle 25.

Tabelle 25 : Berechnungsergebnisse zur effektiven hydraulischen Leitfähigkeit – bezogen auf „Q-Lauge“ (IP 21-Lösung)

Bezeichnung	Formelzeichen	Einheit	Wert
Permeabilität im ungestörten Zustand	$k_g(r_g)$	[m ²]	1,0*10 ⁻¹⁹
Permeabilität an der Kontur	$k_g(r_d)$	[m ²]	5,0*10 ⁻¹⁸
Dichte der Lösung	ρ_L	[kg/m ³]	1.292
dynamische Viskosität der Lösung	η_L	[Pa*s]	5,6*10 ⁻³
hydraulische Leitfähigkeit im ungestörten Zustand	$k_{\text{fg}}(r_g)$	[m/s]	2,0*10 ⁻¹³
hydraulische Leitfähigkeit an der Kontur	$k_{\text{fg}}(r_d)$	[m/s]	1,0*10 ⁻¹¹
Radius des Dichtelementes	r_d	[m]	4,00
Radius der Auflockerungszone	r_g	[m]	4,75
Parameter	a	[m ⁻¹]	-5,21603067
Parameter	b	[/]	-4,34063343
Effektive hydraulische Leitfähigkeit in der ALZ	k_{fgeff}	[m/s]	2,71*10 ⁻¹²

Für die Dimensionierung der Dichtelemente ist weiterhin die hydraulische Druckhöhe erforderlich. Als sich maximal einstellende Druckbelastung auf das kombinierte Widerlager-Dichtelement DE 3 gegen aus dem Grubengebäude aufsteigende Lösungen wurde ein Flu-

BfS	Konzeptplanung der Schachtverschlüsse für die Schächte Bartensleben und Marie des ERA Morsleben	
9M/ 223 450 11/GHS/ TF/ 0001/00	Stand: 10.03.2004	Seite 167 von 215

idddruck von $p = 6,0 \text{ MPa}$ vorgegeben. Dieser Fluiddruck kann in eine äquivalente Höhe der Flüssigkeitssäule nach Gleichung (16) umgerechnet werden.

$$p = \rho_F \cdot g \cdot H_F \quad (16)$$

$$H_F = \frac{p}{\rho_F \cdot g} \quad (17)$$

mit p - Flüssigkeitsdruck in [Pa],
 ρ_F - Flüssigkeitsdichte in [kg/m^3],
 H_F - Höhe der Flüssigkeitssäule, Druckhöhe in [m],
 g - Erdbeschleunigung in [m/s^2].

Aus der vorgegebenen Flüssigkeitsdruckbelastung von $p = 6 \text{ MPa}$ und der Dichte der IP 21-Lösung $\rho_F = 1.292 \text{ kg}/\text{m}^3$ ergibt sich nach Gleichung (17) eine Höhe der Flüssigkeitssäule (Druckhöhe) von $H_F = 473,39 \text{ m}$.

Auf Grund der vollständigen Abdichtung des Querschnitts und der Kontaktfuge kann, wie bereits erörtert, die Gleichung (6) zu den einfachen Gleichungen (7) bzw. (8) reduziert werden.

Die Gleichung (8) ist nur von der Länge der Dichtung abhängig. Alle anderen Einflussgrößen müssen bei der Dimensionierungsaufgabe vorgegeben werden.

Mit dem geforderten Grenzwert des einzuhaltenden Grenzvolumenstroms von $2 \text{ m}^3/\text{a}$ kann Gleichung (8) in folgender Form geschrieben werden:

$$\dot{V}_{\text{Grenz}} = \frac{k_{\text{geff}} \cdot \pi \cdot (r_g^2 - r_d^2) \cdot H_F}{L_{\text{erf}}} \quad (18).$$

Die erforderliche Länge des Dichtelementes ergibt sich dann zu

$$L_{\text{erf}} = \frac{k_{\text{geff}} \cdot \pi \cdot (r_g^2 - r_d^2) \cdot H_F}{\dot{V}_{\text{Grenz}}} \quad (19).$$

In Gleichung (19) bedeuten:

mit \dot{V}_{Grenz} - Grenzvolumenstrom nach Vorgabe $2 \text{ m}^3/\text{a}$

BfS	Konzeptplanung der Schachtverschlüsse für die Schächte Bartensleben und Marie des ERA Morsleben	
9M/ 223 450 11/GHS/ TF/ 0001/00	Stand: 10.03.2004	Seite 168 von 215

L_{erf} - erforderliche Länge des Dichtelementes in [m].

Mit den oben beschriebenen Eingangsgrößen erhält man nach Gleichung (19):

$$L_{\text{erf}} = \frac{2,71 \cdot 10^{-12} \cdot \pi \cdot [(4,75)^2 - (4,00)^2] \cdot 473,39}{[2/(60 \cdot 60 \cdot 24 \cdot 365,25)]} \cdot \left[\frac{\text{m} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{m} \cdot \text{s}}{\text{s} \cdot \text{m}^3} \right] = 0,42 \text{ m}.$$

Die Berechnung demonstriert, dass eine geringmächtige Bitumen-/Asphaltschicht ausreicht, um den geforderten Volumenstrom, der auf Grund der absoluten Dichtheit von Bitumen und Asphalt nur auf der Gebirgsumströmung beruht, einzuhalten. Es wird vorgeschlagen, die Asphaltschichten auch unter Berücksichtigung von Verlusten (Abfließen in das Gebirge und mikrobielle Degradation) auf eine Mindestlänge von 15 m zu konzipieren.

Die nachfolgende Sicherheitsbetrachtung widerspiegelt das sehr hohe Sicherheitsniveau, das auf die vollständige Querschnitts- und Kontaktfugenabdichtung durch das Bitumen sowie auf die geringe effektive, hydraulische Leitfähigkeit der Auflockerungszone zurückzuführen ist.

In Abbildung 38 sind der Volumenstrom durch die aufgelockerten Gebirgsbereiche um das Dichtelement und der Sicherheitsfaktor als Quotient zwischen einzuhaltendem und berechnetem Volumenstrom über die Länge des Dichtelementes aufgetragen.

Die Berechnungen beziehen sich lediglich auf das kombinierte Widerlager-Dichtelement DE 3 gegenüber aus dem Grubengebäude aufsteigende Lösungen. Um den gegebenenfalls (bei vollständigen Ausfall des Dichtelementes DE 1) über das kombinierte Widerlager-Dichtelement DE 2 in den Schacht strömenden Volumenstrom zu erfassen, sind die hydraulischen Parameter und die Druckverhältnisse zu erörtern.

Wenn innerhalb der Hutgesteinskomplexe des ERA Morsleben überhaupt ausreichende Wasser- bzw. Lösungsvorkommen existieren (trockener Schacht beim Ausbruch, einhundertjährige Standzeit ohne wasserdichten Ausbau, keine Zuflüsse), die eine Umströmung des Dichtelementes DE 1 bewirken (in den hydraulischen Modellrechnungen angesetzt), dann erfolgt deren Aufsättigung an Steinsalz direkt am Salzspiegel. Die einsetzende Laugendichteschichtung verhindert weitere Lösungsprozesse.

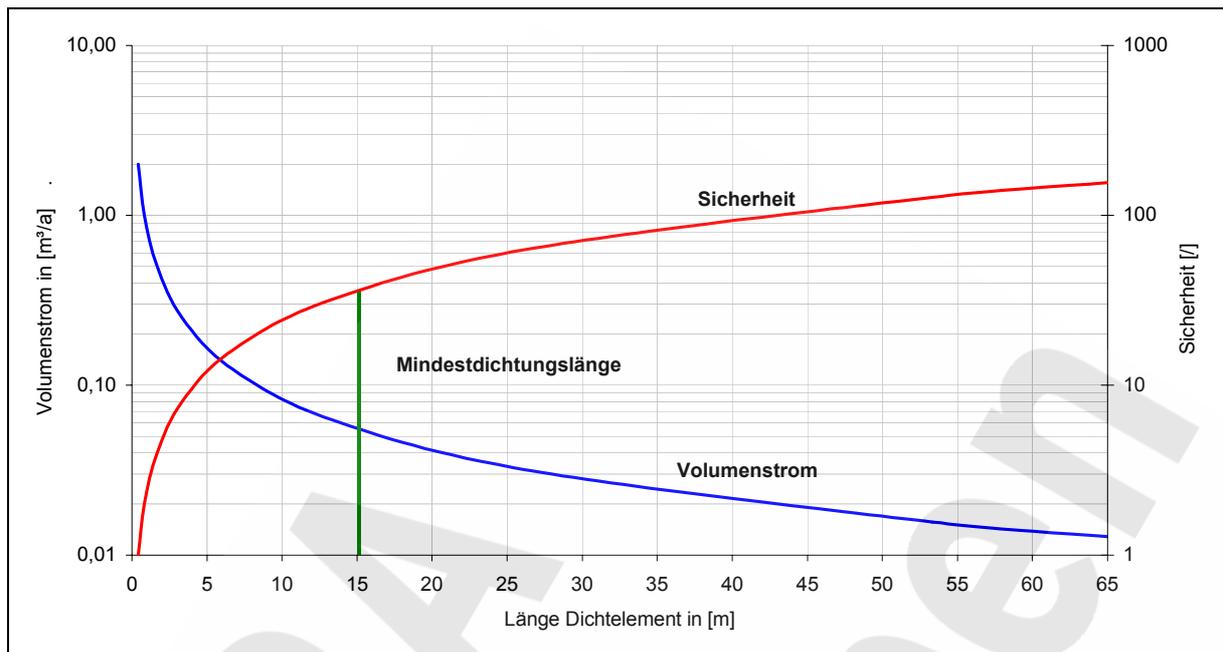


Abbildung 38: Volumenstrom durch die aufgelockerten Gebirgsbereiche um das kombinierte Widerlager-Dichtelement DE 3 und der dazugehörige Sicherheitskoeffizient aufgetragen über die Länge des Dichtelementes

Das Bitumen des kombinierten Widerlager-Dichtelementes DE 2 verhindert das Eindringen wässriger, ggf. untersättigter Lösungen in den Schachtinnenbereich, so dass es an der Oberkante des kombinierten Widerlager-Dichtelementes DE 2 zum Druckaufbau kommt.

Für die hydraulischen Betrachtungen wird deshalb die Druckbelastung die, wie oben erwähnt, von der Lage der Oberkante des kombinierten Widerlager-Dichtelements DE 2 abhängt, konservativ auch auf eine Salzlösung bezogen. Dieser Ansatz stellt eine konservative, aber sehr unwahrscheinliche (Steinsalzlösung bis Geländeoberkante) Annahme dar.

Wie die nachfolgende Rechnung zeigt, spielen die Druckunterschiede an dieser Stelle ohnehin eine untergeordnete Rolle. Für die Steinsalzlösung wird eine Dichte von 1.198 kg/m^3 angesetzt.

Für den Schacht Marie errechnen sich folgende Werte:

für Steinsalzlösung:

$$p = \rho_F \cdot g \cdot H_F = 1.198 \cdot 9,81 \cdot 256,5 = 3,0 \cdot 10^6 \left[\frac{\text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{m}}{\text{m}^3 \cdot \text{s}^2} = \text{Pa} \right].$$

Für den Schacht Bartensleben liegen die Werte in ähnlichen Bereichen

für Steinsalzlösung:

$$p = \rho_F \cdot g \cdot H_F = 1.198 \cdot 9,81 \cdot 262 = 3,1 \cdot 10^6 \left[\frac{\text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{m}}{\text{m}^3 \cdot \text{s}^2} = \text{Pa} \right].$$

Für die weiteren Berechnungen zum kombinierten Widerlager-Dichtelement DE 2 wird konservativ von der maximalen Druckhöhe $H = 262 \text{ m}$ ausgegangen. Unter Anwendung der bereits beschriebenen Vorgehensweise kann eine effektive hydraulische Leitfähigkeit für die aufgelockerten Steinsalzbereiche berechnet werden. Das Hutgestein im Bereich des kombinierten Widerlager-Dichtelementes DE 2 bleibt unberücksichtigt. Die Daten in Tabelle 26 entsprechen prinzipiell den Werten in Tabelle 25. Änderungen ergeben sich lediglich bei der Dichte und Viskosität der angreifenden Lösung und damit abschließend auch bei der effektiven hydraulischen Leitfähigkeit.

Tabelle 26 : Berechnungsergebnisse zur effektiven hydraulischen Leitfähigkeit – bezogen auf Steinsalzlösung

Bezeichnung	Formelzeichen	Einheit	Wert
Permeabilität im ungestörten Zustand	$k_g(r_g)$	[m ²]	$1,0 \cdot 10^{-19}$
Permeabilität an der Kontur	$k_g(r_d)$	[m ²]	$5,0 \cdot 10^{-18}$
Dichte der Lösung	ρ_L	[kg/m ³]	1.198
dynamische Viskosität der Lösung	η_L	[Pa*s]	$2,04 \cdot 10^{-3}$
hydraulische Leitfähigkeit im ungestörten Zustand	$k_{fg}(r_g)$	[m/s]	$5,8 \cdot 10^{-13}$
hydraulische Leitfähigkeit an der Kontur	$k_{fg}(r_d)$	[m/s]	$2,9 \cdot 10^{-11}$
Radius des Dichtelementes	r_d	[m]	4,00
Radius der Auflockerungszone	r_g	[m]	4,75
Parameter	a	[m ⁻¹]	-5,21603067
Parameter	b	[/]	-3,40635454
effektive hydraulische Leitfähigkeit in der ALZ	$k_{f\text{eff}}$	[m/s]	$6,89 \cdot 10^{-12}$

In Anlehnung an Abbildung 38 kann auch für das kombinierte Widerlager-Dichtelemente DE 2 auf Schotter-Asphalt-Basis ein Zusammenhang zwischen Dichtelementlänge, Volumenstrom und Sicherheit angegeben werden. Im Diagramm Abbildung 39 sind die Zusammenhänge grafisch dargestellt.

Des Weiteren fehlt noch eine Berechnung zum Volumenstrom über die projizierten Längen. Die projizierten Dichtelementlängen und die berechneten Volumenströme für die Schotter-Asphalt-Dichtelemente sind in Tabelle 27 aufgelistet. Sie ergeben sich jeweils bei einer isolierten Betrachtung des entsprechenden Dichtelementes.

Tabelle 27 : Projizierte Dichtelementlängen und berechnete Volumenströme

Bezeichnung	Dichtelementlänge	Volumenstrom	Sicherheit
	[m]	[m ³ /a]	
Marie Deckgebirgszuflüsse	47,0	0,02	80
Marie Lösungen aus Grubenbau	25,0	0,03	60
Bartensleben Deckgebirgszuflüsse	47,0	0,02	80
Bartensleben Lösungen aus Grubenbau	42,5	0,02	102

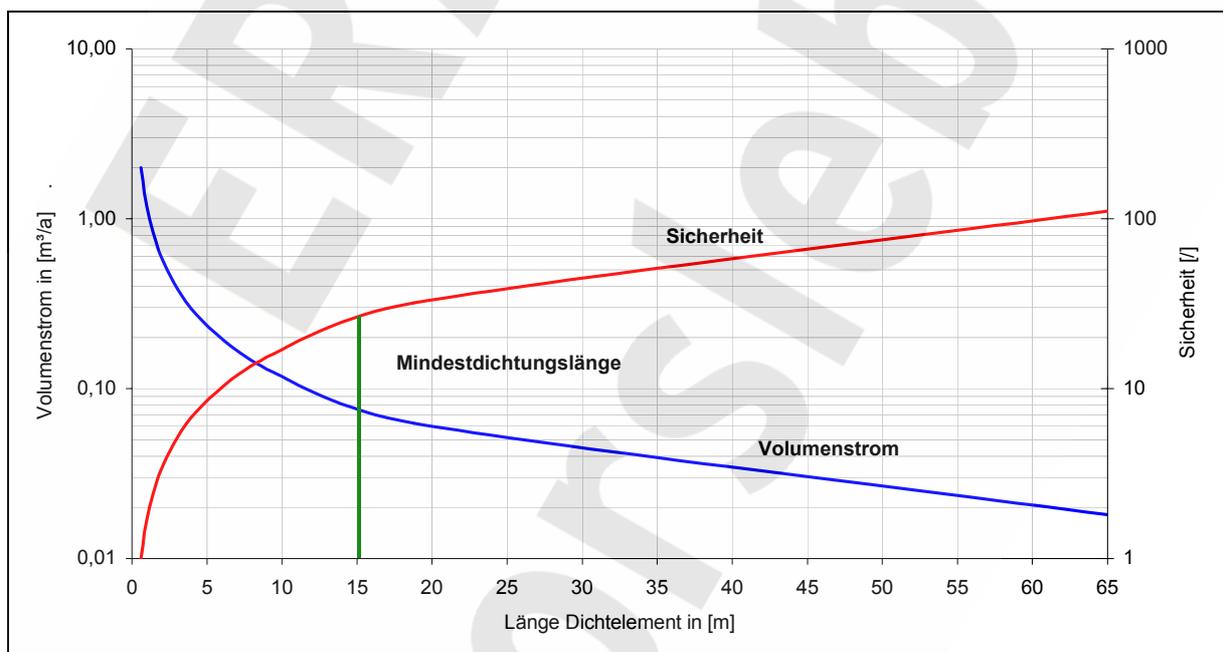


Abbildung 39: Volumenstrom durch die aufgelockerten Gebirgsbereiche um das kombinierte Widerlager-Dichtelement DE 2 und der dazugehörige Sicherheitskoeffizient aufgetragen über die Länge des Dichtelementes

Letztendlich sind noch die benötigten Asphaltvolumina für die kombinierten Widerlager-Dichtelemente zu bestimmen. Als Richtwert für die erreichbare Einbaudichte der Schottersäule wird ein Wert $\rho_s = 1.700 \text{ kg/m}^3$ angesetzt. Dieser Wert konnte durch die umfangreichen In-Situ-Großversuche innerhalb des Forschungsprojektes Schachtverschluss Salzdettfurth

[127] bestätigt werden. Die Einbringtechnologie über Fördergefäße mit Bodenentleerung und festgeschriebener Fallhöhe ist dabei einzuhalten, u.U. ist auch ein qualitätsmäßig überwachter Versturz durch Fallrohre möglich.

Das Porenvolumen je laufenden Meter Schachtquerschnitt berechnet sich nach Gleichung (21).

$$n = \left[1 - \frac{\rho_{\text{Einbau}}}{\rho_{\text{Schotter}}} \right] \quad (20)$$

$$V_{\text{Bitumen}}(h) = n \cdot V_{\text{Gesamt}} = n \cdot \pi \cdot r^2 \cdot h \quad (21).$$

Die für die einzelnen Dichtelemente benötigten Bitumen- bzw. Asphaltvolumina sind in Tabelle 28 zusammengefasst.

Tabelle 28 : Benötigte Bitumen-/Asphaltvolumina für die kombinierten Widerlager-Dichtelemente

Bezeichnung	Dichtelementlänge	Bitumenvolumen
	[m]	[m³]
Marie Deckgebirgszuflüsse (DE 2)	47,0	978
Marie Lösungen aus Grubenbau (DE 3)	25,0	520
Bartensleben Deckgebirgszuflüsse (DE2)	47,0	978
Bartensleben Lösungen aus Grubenbau (DE 3)	42,5	884

6.4.4.5 *Einschätzung des Sicherheitsniveaus*

Das Eindringen von Deckgebirgswässern bzw. von salinaren Lösungen über die Schachtverschlusssysteme in das Grubengebäude ist nur dann möglich, wenn:

1. die für den Schacht Marie in [5] dokumentierten, relativ hohen Kennwerte der Permeabilität bzw. der hydraulischen Leitfähigkeit ($4,5 \cdot 10^{-11} \text{ m/s}$) des Hutgesteins tatsächlich vorliegen sollten,
2. ein ausreichendes Wasser- bzw. Lösungsvorkommen im Deckgebirge zur Verfügung steht (dagegen sprechen der Fakt, dass bei den Abteufarbeiten und danach

BfS	Konzeptplanung der Schachtverschlüsse für die Schächte Bartensleben und Marie des ERA Morsleben	
9M/ 223 450 11/GHS/ TF/ 0001/00	Stand: 10.03.2004	Seite 173 von 215

keine Zuflüsse angeschnitten bzw. festgestellt worden sind sowie die einhundert-jährige Standzeit des Schachtes in Mauerwerk d.h. ohne wasserdichten Ausbau),

3. das obere Dichtelement DE 1 auf Bentonitbasis vollständig versagt,
4. sich im Salinar nach erfolgter gebirgsschonender Beraubung erneut eine ALZ in der in den Rechnungen unterstellten Größenordnung ausbildet

und

5. kein Bitumen/Asphalt als Dichtmaterial in diese ALZ eindringt und diese dauerhaft versiegelt.

Der bei Erfüllung der Punkte 1 bis 5 über das kombinierte Widerlager-Dichtelement DE 2 in das Grubengebäude eindringende Flüssigkeitsvolumenstrom beträgt bei vorliegendem Ausgangsbitumenspiegel (ohne Verluste) lediglich 0,02 m³/a in beiden Schächten. Auch bei einem Absinken des Bitumenspiegels liegt ein ausreichend hohes Sicherheitsniveau vor (vgl. Abbildung 39). Zusätzlich wirken sich alle unterhalb des kombinierten Widerlager-Dichtelementes DE 2 angeordneten Schachtverschlüsselemente zuflusshemmend aus.

Ein *Auspressen von Lösungen aus dem Grubengebäude* ist nur dann möglich, wenn:

1. ein ausreichendes Lösungsvolumen in das Grubengebäude über natürliche Wegsamkeiten eingedrungen ist,
2. die Streckenabdichtungen ihre Aufgaben nicht erfüllen,
3. durch Gasbildung und Konvergenz der angesetzte hohe Fluiddruck auftritt,
4. sich keine Gasblase an der Unterkante des kombinierten Widerlager-Dichtelementes DE 3 befindet,
5. sich im Salinar nach erfolgter gebirgsschonender Beraubung eine neuerliche ALZ in der in den Rechnungen unterstellten Größenordnung ausbildet

und

6. kein Bitumen/Asphalt als Dichtmaterial in diese ALZ eindringt und diese dauerhaft versiegelt.

BfS	Konzeptplanung der Schachtverschlüsse für die Schächte Bartensleben und Marie des ERA Morsleben	
9M/ 223 450 11/GHS/ TF/ 0001/00	Stand: 10.03.2004	Seite 174 von 215

Der bei Erfüllung der Punkte 1 bis 6 über das kombinierte Widerlager-Dichtelement DE 3 aus dem Grubengebäude ausgepresste Volumenstrom beträgt bei vorliegendem Ausgangsbitumenspiegel (ohne Verluste) 0,02 m³/a am Schacht Bartensleben bzw. 0,03 m³/a am Schacht Marie. Bei Absinken des Bitumenspiegels liegt ein ausreichend hohes Sicherheitsniveau vor (vgl. Abbildung 38 und Abbildung 39). Zusätzlich wirken sich alle oberhalb des kombinierten Widerlager-Dichtelementes DE 3 angeordneten Schachtverschlüsselemente austrittshemmend aus.

Die Sicherheitskoeffizienten aus einzuhaltendem und berechnetem Volumenstrom belegen das hohe Sicherheitsniveau. Insbesondere durch die vollständige Abdichtung der Kontaktfuge und des freien Schachtquerschnitts kann ein minimaler Volumenstrom in den und aus dem Grubenbereich garantiert werden. Die Berechnungen basieren auf einer Vielzahl von konservativen Annahmen, die alle erfüllt sein müssen, um die rechnerische Extremwertprognose einzuhalten.

6.4.5 Durchfluss durch das Gesamtsystem

In allen Berechnungen zur Dimensionierung der Dichtelemente wurde auf konservativen Modellannahmen aufgebaut. Zum Teil setzen diese Annahmen das vollständige Versagen anderer Teile des Verschlusses z.B. des Dichtelementes DE 1 voraus.

Diese Gesichtspunkte erschweren die Berechnung eines Volumenstroms über das Gesamtsystem in das bzw. aus dem Grubengebäude. Nachfolgend soll jedoch trotz dieser Umstände eine solche Berechnung durchgeführt werden. Bei der weiteren Behandlung der berechneten Volumenströme sind jedoch sämtliche Modellannahmen zu beachten. In den nachfolgend dargestellten Ergebnissen werden lediglich die Längen der kombinierten Widerlager-Dichtelemente DE 2 und DE 3 berücksichtigt.

Volumenstrom in das Grubengebäude:

Wird wie im Abschnitt 6.4.4.4 von der Aufsättigung der Deckgebirgswässer am Salzspiegel ausgegangen und werden die zu Grunde gelegten Kennwerte (Breite der ALZ, effektive hydraulische Leitfähigkeit) beibehalten, ergeben sich Fluidvolumenströme in das Grubengebäude in der Größenordnung von 0,03 m³/a für den Schacht Marie und 0,02 m³/a für den Schacht Bartensleben. Die hydraulisch wirksame Dichtelementlänge

BfS	Konzeptplanung der Schachtverschlüsse für die Schächte Bartensleben und Marie des ERA Morsleben	
9M/ 223 450 11/GHS/ TF/ 0001/00	Stand: 10.03.2004	Seite 175 von 215

wurde als Summe der Längen beider kombinierter Widerlager-Dichtelemente gewählt bzw. diese Gesamtlänge um 30 m reduziert (maximale Verluste von 15 m an beiden Elementen, vgl. Abschnitt 6.4.6).

Volumenstrom aus dem Grubengebäude:

Wird ebenfalls wie im Abschnitt 6.4.4.4 von den zu Grunde gelegten Kennwerten (Breite der ALZ, effektive hydraulische Leitfähigkeit) ausgegangen, ergeben sich Volumenströme aus dem Grubengebäude über die beiden kombinierten Widerlager-Dichtelemente in der Größenordnung von etwa 0,02 m³/a für beide Schächte. Dabei wurde von einer konstanten Druckhöhe und konstanten hydraulisch wirksamen Längen der Dichtelemente ausgegangen.

Beide Berechnungen belegen, dass das als Bemessungsziel vorgegebene Kriterium eines einzuhaltenden Volumenstroms von 2 m³/a stets erfüllt wird. Die Werte für den Gesamtvolumenstrom sind eher theoretischer Natur. Für den Verschluss ist realistisch mit keinem Durchfluss zu rechnen. Das gilt für Zuflüsse in das Grubengebäude als auch für aufsteigende Lösungen aus der Grube.

6.4.6 Aussagen zu Asphaltverlusten

6.4.6.1 Zusammenstellung von Daten und Richtwerten aus der Praxis

In der bergbaulichen Praxis kommen Bitumen und Asphalt bei gleitfähigen Schachtausbauten mit Bitumen- bzw. Asphaltfugen zum Einsatz. Nach Fertigstellung der Schächte wird bis auf die Anfangsphase (bis zum Abkühlen der heiß eingebrachten Bitumen/Asphalte und den damit verbundenen Volumenkontraktionen) den Füllständen der Bitumen-/Asphaltfugen nur wenig Aufmerksamkeit zugeordnet. Es liegen daher nur wenige vollständige Messreihen vor. Dieser Sachverhalt kann auch der Tatsache geschuldet sein, dass bisher keinerlei Schadensfälle bekannt geworden sind, bei denen ein größeres Absinken des Asphaltspiegels auftrat und dadurch Schäden am Schachtausbau verursacht wurden.

Nur in [128] wurde bislang über Asphaltverluste bei Gleitschächten im Steinkohlenrevier an der Ruhr berichtet, wo jedoch die geologischen Verhältnisse hinsichtlich dieser Verluste (Klüftigkeit, Permeabilität) wesentlich schlechter als im Salinar sind.

In Abbildung 40 sind gemessene Asphaltverluste bezogen jeweils auf 1.000 m² Schachtmantelfläche dargestellt. Interessant ist, dass in [128] als ungefährender Grenzwert der insgesamt auftretenden Asphaltverluste 25 m³ pro 1.000 m² Schachtmantelfläche angegeben wird. Die Spiegelkonstanz der Asphaltsäule wird laut [128] nach etwa 1½ Jahren erreicht.

Zu beachten sind in jedem Fall die Beschaffenheit des umgebenden Gebirges und u.U. die des Außenausbaus, die Viskosität der Bitumen/Asphalte, die Korngrößen der Füller sowie mögliche Temperaturschwankungen im jahreszeitlichen Verlauf (schwankende Spiegel im Sommer und Winter).

Diesbezüglich ist zu bemerken, dass die in [128] angegebenen Asphaltverluste bezogen auf die Beschaffenheit des umgebenden Gebirges (Durchlässigkeit, Klüftigkeit, etc.) für die Schächte am Standort des ERA Morsleben weitaus günstigere Verhältnisse erwarten lassen. Insbesondere übersteigt die Permeabilität der das Steinkohlegebirge überlagernden Schichten (Oberkreide und Quartär) die des Salinargebirges als Einbauhorizonte der kombinierten Widerlager-Dichtelemente um ein Vielfaches.

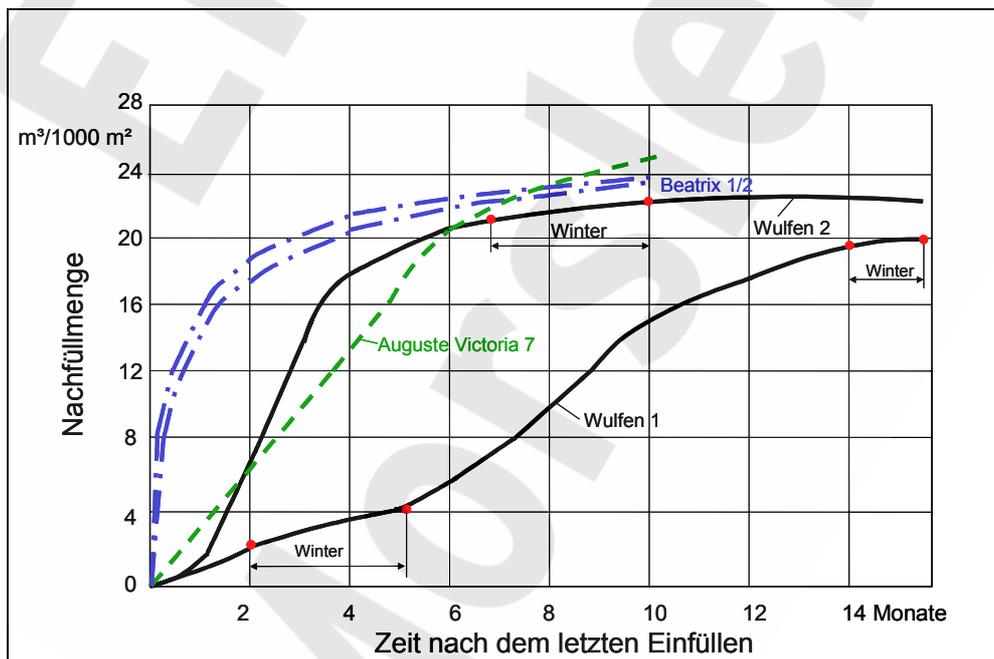


Abbildung 40: Nachfüllmengen an Asphalt in Gleitschächten nach [128] (Nachfüllmengen [m³] sind auf 1.000 m² Mantelfläche umgerechnet)

BfS	Konzeptplanung der Schachtverschlüsse für die Schächte Bartensleben und Marie des ERA Morsleben	
9M/ 223 450 11/GHS/ TF/ 0001/00	Stand: 10.03.2004	Seite 177 von 215

Exakte Messreihen über Asphaltspiegelhöhen in den Schächten der Kali und Salz AG liegen nicht vor. Eine überschlägige Messung am Wetterschacht Riedel des Kali und Steinsalzbergwerks Niedersachsen-Riedel ergab im Zeitraum seit der Ersteinfüllung im Jahr 1975 bis zum 22.09.1990 Verluste von ca. 14,5 m³ über eine Schachtlänge von etwa 150 m. Bei einem mittleren Schachtaußendurchmesser von 5,23 m ergibt das einen Wert von rund 6 m³ je 1.000 m² Schachtmantelfläche. Der Wert liegt damit deutlich unter den Angaben aus dem Steinkohlenbergbau [128].

In [129] sind umfangreiche Messreihen zu Asphaltverlusten an den Schächten des Erkundungsbergwerkes Gorleben dokumentiert. In diesen beiden Schächten befindet sich im Deckgebirgsbereich eine Asphaltfuge zwischen einem zum Gebirge hin befindlichen Betonformsteinausbau und einem Stahl liner. Mögliche Asphaltverluste ergeben sich also durch Ausfüllen der Fugen bzw. durch Abfließen durch die Fugen des Bentonformsteinausbaus in das Deckgebirge (Quartär, Tertiär).

In [129] wurden als maximale Spiegeldifferenz 32 m beobachtet. Das resultierende Verlustvolumen bei einem theoretisch angenommenen Schachtaußendurchmesser von 9 m, bei Asphaltfugenbreiten von 29 cm bzw. 28 cm über etwa eine Teufe von 300 m, bezogen auf die Schachtmantelfläche ergibt ebenfalls Werte, die weit unterhalb der in [128] angegebenen 25 m³ pro 1.000 m² Mantelfläche liegen.

Hypothetische Beispielrechnung für die Schächte Gorleben:

Schacht 1:

$$V_{\text{Verlust}} = \frac{\pi}{4} \cdot (d_a^2 - d_i^2) \cdot h_{\text{Verlust}} = \frac{\pi}{4} \cdot [(9,00 \text{ m})^2 - (8,71 \text{ m})^2] \cdot 32 \text{ m} = 129 \text{ m}^3$$

Schacht 2:

$$V_{\text{Verlust}} = \frac{\pi}{4} \cdot (d_a^2 - d_i^2) \cdot h_{\text{Verlust}} = \frac{\pi}{4} \cdot [(9,00 \text{ m})^2 - (8,72 \text{ m})^2] \cdot 15 \text{ m} = 59 \text{ m}^3$$

Schachtmantelfläche:

$$A_{\text{Mantel}} = \pi \cdot d_a \cdot h_{\text{Mantel}} = \pi \cdot 9,00 \text{ m} \cdot 300 \text{ m} = 8.482 \text{ m}^2$$

BfS	Konzeptplanung der Schachtverschlüsse für die Schächte Bartensleben und Marie des ERA Morsleben	
9M/ 223 450 11/GHS/ TF/ 0001/00	Stand: 10.03.2004	Seite 178 von 215

Maximalverlust (Schacht 1):

$$Q_{\text{Verlust}} = 1.000 \text{ m}^2 \cdot V_{\text{Verlust}} / A_{\text{Mantel}} = 1.000 \text{ m}^2 \cdot 129 \text{ m}^3 / 8.482 \text{ m}^2 = 15 \text{ m}^3 / 1.000 \text{ m}^2$$

6.4.6.2 Eindringen von Asphalt in permeable Gebirgsbereiche

Vor den eigentlichen Berechnungen muss daraufhingewiesen werden, dass es sich um rein hypothetische Betrachtungen handelt. Für das umgebende Gebirge liegt lediglich eine In-Situ Messung zur hydraulischen Leitfähigkeit in [5] vor.

Größere Spalten und Klüfte sind im Salinarteil, den Einbauhorizonten der Schotter-Asphalt-Elemente, nicht zu erwarten und die Permeabilität am Ausbruchsrand gilt als vorsichtiger Überschlagswert. Diese Tatsachen müssen bei der Beurteilung der Endergebnisse berücksichtigt werden.

Zur Berechnung von abfließenden Bitumenvolumina werden die ungünstigsten Bitumenkennwerte zu Grunde gelegt, d.h. es wird von der geringsten Viskosität und der größten Dichte des Bitumens ausgegangen. Stopfeffekte, die ggf. aus der Korngröße der Füller resultieren, werden vernachlässigt.

Um das Eindringen in permeable Gebirgsbereiche zu beurteilen wird die größte Permeabilität des Steinsalzes, die unmittelbar am Ausbruchsrand auftritt, herangezogen. Zunächst erfolgt die Umrechnung der Permeabilität in die hydraulische Leitfähigkeit des Steinsalzes gegenüber dem eindringenden Bitumen/Asphalt mit der bereits erörterten Gleichung (9).

Die in Gleichung (9) beinhalteten Kenngrößen werden wie folgt angesetzt:

- $k = 5 \cdot 10^{-18} \text{ m}^2$ - größte Permeabilität des Steinsalzes am Ausbruchsrand
- $\rho_F = 1.300 \text{ kg/m}^3$ - größte Dichte des Bitumens/Asphalts (konservativ für gefüllten B 200)
- $\eta_F = 26.212 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ - geringste Viskosität des Bitumens/Asphalts (konservativ für ungefüllten B 200).

Damit ergibt sich nach Gleichung (9):

$$k_f = k \cdot \frac{\rho_F \cdot g}{\eta_F} = 5 \cdot 10^{-18} \text{ m}^2 \cdot \frac{1.300 \text{ kg} \cdot 9,81 \text{ m} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^2}{\text{m}^3 \cdot \text{s}^2 \cdot 26.212 \text{ kg} \cdot \text{s}} = 2,43 \cdot 10^{-18} \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

BfS	Konzeptplanung der Schachtverschlüsse für die Schächte Bartensleben und Marie des ERA Morsleben	
9M/ 223 450 11/GHS/ TF/ 0001/00	Stand: 10.03.2004	Seite 179 von 215

Die hypothetische Berechnung der Strömung durch einen Steinsalz Kern mit folgenden Parametern

Durchmesser:	d	= 1 m
Länge:	L	= 1 m
Druckhöhe:	H	= 612 m (6 MPa bezogen auf Wassersäule)
hydraulische Leitfähigkeit:	k_f	= $2,43 \cdot 10^{-18}$ m/s

liefert einen Volumenstrom von

$$\dot{V} = k_f \cdot \frac{A \cdot H}{L} = k_f \cdot \frac{\pi \cdot d^2 \cdot H}{4 \cdot L} = 2,43 \cdot 10^{-18} \frac{m}{s} \cdot \frac{\pi \cdot 1 \text{ m}^2 \cdot 612 \text{ m}}{4 \cdot 1 \text{ m}} = 1,17 \cdot 10^{-15} \text{ m}^3 / \text{s}.$$

Dieser Volumenstrom entspricht $0,00111 \text{ m}^3$ in 30.000 Jahren. Das Eindringen von Bitumen in permeable Gebirgsbereiche des Salinars stellt somit ein rein theoretisches, aber praktisch völlig unbedeutendes Szenario dar.

6.4.6.3 Sedimentationsverhalten der Asphaltfüller

Das Sedimentieren der Füllerbestandteile als maßgebliche Gefährdung der Dichtwirkung im Nachweiszeitraum kann auf Grund vielfacher Untersuchungen ausgeschlossen werden. Umfangreiche Untersuchungen sind u. a. in [95] dokumentiert.

6.4.6.4 Einschätzung des Sicherheitsniveaus

Zunächst wurden an Hand einer Aufstellung über Bitumenverluste in Schachtausbausäulen versucht, Erfahrungs- und Richtwerte aus der praktischen Anwendung bituminöser Dichtmaterialien unter hydrostatischer Druckbelastung zusammenzustellen. Allerdings wurden nur wenige bzw. unregelmäßige Messungen des Bitumenspiegelstandes durchgeführt. Seit den ersten Anwendungen der Schachtausbauten mit Bitumen-/Asphaldfugen [130] sind bisher keine Schäden bekannt geworden. Größere Verluste durch Abfließen in Gebirgsbereiche sind nicht bekannt. Bei allen theoretischen Überlegungen sollte diesen Beobachtungen an praktisch ausgeführten Bauwerken eine gebührende Aufmerksamkeit beigemessen werden.

Die Berechnungen zum Eindringverhalten der Bitumen/Asphalte in permeable Gebirgsbereiche weisen praktisch keinerlei Verluste nach. Dabei wurden bereits äußerst konservative

BfS	Konzeptplanung der Schachtverschlüsse für die Schächte Bartensleben und Marie des ERA Morsleben	
9M/ 223 450 11/GHS/ TF/ 0001/00	Stand: 10.03.2004	Seite 180 von 215

Kennwerte und Ansätze gewählt. Es wurden Bitumen mit der größten Dichte und den geringsten Viskositäten angenommen und die Auflockerung des Steinsalzes mit den Kennwerten des unmittelbaren Konturrandes modelliert. Darüber hinaus haben Versuche gezeigt, dass der Bitumenfluss in Tonen bzw. Ton-Sand-Gemischen mit höheren Permeabilitäten zum Erliegen kommt [12].

Die konservativen Berechnungsannahmen einerseits und die trotz dieser Annahmen erzielten Ergebnisse andererseits lassen auf ein sehr hohes Sicherheitsniveau hinsichtlich der Gestaltung der Abdichtungselemente schließen. Letztlich liefern auch jahrzehntelange Erfahrungen an ausgeführten untertägigen Asphalt- und Bitumendichtungen den notwendigen praktischen Nachweis über die Eignung derartig aufgebauter Dichtelemente.

6.5 Zusammenfassende ingenieurtechnische Einschätzung

Ziel der ingenieurtechnischen Gesamteinschätzung ist es, die für die durchgeführten Berechnungen getroffenen Annahmen noch einmal den erzielten Ergebnissen gegenüber zu stellen. Dadurch erfahren die Ergebnisse eine Wertung, welche Rückschlüsse auf das tatsächliche Verhalten der Konstruktion ermöglicht.

Die Langzeitstabilität aller eingesetzten Schachtverschlussmaterialien (Bitumen/Asphalte, Bentonit, Schotter, Kiese, Sande) konnte unter Einbeziehung natürlicher Analoga nachgewiesen werden.

Für alle relevanten Belastungsszenarien erfolgten die geomechanischen Nachweise von Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit. Das gilt sowohl für die Berechnungsfälle, bei denen die Fluiddruckbelastung vor dem Aufkriechen des Salinargebirges eintritt, als auch für die Fälle, bei denen der aus dem Aufkriechen resultierende Gebirgsdruck berücksichtigt wurde. Der Gebirgsdruck führt zu einem verbesserten Lastabtrag und somit zu einer Erhöhung des Sicherheitsniveaus mit wachsender Standzeit.

Die Füllörter besitzen bei der angegebenen Füllortverfüllung hinsichtlich der Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit der Verfüllsäule nur eine sehr geringe Bedeutung.

BfS	Konzeptplanung der Schachtverschlüsse für die Schächte Bartensleben und Marie des ERA Morsleben	
9M/ 223 450 11/GHS/ TF/ 0001/00	Stand: 10.03.2004	Seite 181 von 215

Für die gewählte Konstruktionsform des Schachtverschlussbauwerkes ergibt sich ein hohes Sicherheitsniveau. Es wurde ein Sicherheitsnachweis mit Teilsicherheiten $\gamma = 1,5$ der wesentlichen Materialparameter erbracht.

Sensitivitätsanalysen zeigen, dass die Eigenschaften der Kontaktfuge (Reibung) und die Festigkeit (innere Reibung) des Verfüllmaterials wesentlich die Tragfähigkeit beeinflussen. Daraus resultieren entsprechende Anforderungen an die Einbauqualität des Schachtverschlussystems. Es ergab sich ebenfalls ein sehr hohes Sicherheitsniveau hinsichtlich des Versagens (Auslaufen) der Füllortböschung (Füllortverfüllung).

Im geohydraulischen Nachweis wurden zunächst Aussagen zum Verhalten der Deckgebirgsdichtungen getroffen. Die Messungen wiesen für beide Schächte im gleichen Hutgestein stark unterschiedliche hydraulische Leitfähigkeiten aus ($4,5 \cdot 10^{-11}$ m/s für den Schacht Marie und $5 \cdot 10^{-13}$ m/s für den Schacht Bartensleben) [5]. Um eine einheitliche Einschätzung vornehmen zu können, wurde von einer einheitlichen hydraulischen Leitfähigkeit von $4,5 \cdot 10^{-11}$ m/s ausgegangen.

Unter Beachtung der getroffenen Annahmen sind die berechneten Zuflussmengen aus dem Deckgebirge in der Größenordnung von $3 \text{ m}^3/\text{a}$ (Bartensleben) bzw. $4 \text{ m}^3/\text{a}$ (Marie) als hinnehmbar zu bezeichnen, da sie unter konservativen Annahmen als Wert für die Einzelemente im Deckgebirge und nicht für das gesamte Verschlussystem berechnet wurden. Diese Zuflussmengen resultieren lediglich aus der Umströmung der Dichtelemente, so dass speziell beim Schacht Bartensleben realistischerweise von wesentlich geringeren Werten auszugehen ist.

Der zweite Schwerpunkt der geohydraulischen Untersuchungen liegt auf den hydraulischen Bemessungen der Schotter-Asphaltdichtelemente. Auf Grund der absoluten Dichtheit der Bitumen/Asphalte und der vollständigen Abdichtung der Kontaktzone verbleibt als einzig bemessungsrelevanter Volumenstrom die Umströmung über aufgelockerte Gebirgsbereiche. Die Permeabilität von Steinsalz im ungestörten Zustand ist so gering, dass von einer Dichtheit ausgegangen werden kann. Auflockerungen ergeben sich lediglich in konturnahen Bereichen. Untersuchungen haben gezeigt, dass die Erhöhung der Permeabilität mit den vorliegenden Spannungszuständen korreliert. Als Spannungskriterium hat sich dabei das Dilatanzkriterium durchgesetzt. Die mechanischen Modellrechnungen mit diesem Dilatanzkriterium ergaben,

BfS	Konzeptplanung der Schachtverschlüsse für die Schächte Bartensleben und Marie des ERA Morsleben	
9M/ 223 450 11/GHS/ TF/ 0001/00	Stand: 10.03.2004	Seite 182 von 215

dass nach etwa einhundertjähriger Standzeit und dem anschließenden Berauben keine neue Auflockerungszone (ALZ) entsteht. Alle hydraulischen Berechnungen basieren jedoch konservativ auf einer ALZ mit einer Breite von 0,75 m.

Beide Berechnungen belegen, dass das als Bemessungsziel vorgegebene Kriterium eines einzuhaltenden Volumenstroms von 2 m³/a stets erfüllt wird. Die Werte für den Gesamtvolumenstrom sind eher theoretischer Natur. Für den Verschluss ist realistisch mit keinem Durchfluss zu rechnen. Das gilt für Zuflüsse in das Grubengebäude als auch für aufsteigende Lösungen aus der Grube.

Abschließend wird auf mögliche Bitumen-/Asphaltverluste eingegangen. Die Berechnungen zeigten, dass keine nennenswerten Verluste durch Abfließen in permeable Gebirgsbereiche auftreten, obwohl auch in diese Rechnungen konservative Parameter eingingen. Dieses Ergebnis ist durch Praxiserfahrungen bestätigt.

Zusammenfassend wird festgestellt, dass für die konzipierten Schachtverschlusssysteme des ERA Morsleben, über den vorgegebenen Zeitraum von 30.000 Jahren, die Tragfähigkeit und die Gebrauchstauglichkeit auf hohem Sicherheitsniveau nachgewiesen wurden. Abschließend wird darauf hingewiesen, dass die Berechnungsergebnisse von den im Modell benutzten Annahmen (u.a. Geometrie, Stoffgesetze, Lastannahmen) und von der Güte der Material- und Gebirgsparameter abhängen. Diesbezüglich sind die angesetzten Gebirgskennwerte, besonders die hohen hydraulischen Leitfähigkeiten des Hutgesteins zu prüfen und die hydraulischen Leitfähigkeiten in der ALZ des Salinars zu ermitteln.

BfS	Konzeptplanung der Schachtverschlüsse für die Schächte Bartensleben und Marie des ERA Morsleben	
9M/ 223 450 11/GHS/ TF/ 0001/00	Stand: 10.03.2004	Seite 183 von 215

7 Bautechnische Hinweise und Erläuterungen zur Qualitätssicherung

7.1 Vorbereitende Maßnahmen

Die Verwahrung der Schächte Marie und Bartensleben kann nur auf der Grundlage von durch die zuständigen Behörden zugelassenen Betriebsplänen bzw. Genehmigungsunterlagen erfolgen. Aus diesem Grunde sind für die Verwahrung im Vorfeld alle erforderlichen Planungen zu erarbeiten bzw. die notwendigen Genehmigungen einzuholen.

Durch das bauausführende Unternehmen ist eine Baustelle einzurichten, welche die besonderen Bedingungen des ERA Morsleben berücksichtigt. In diesem Zusammenhang ist in späteren Planungsphasen zu prüfen, inwieweit die vorhandenen Schacht-, Übertageanlagen und Sonderbewetterungsanlagen im Rahmen der Verwahrung der beiden Schächte des ERA Morsleben genutzt werden können. Ggf. sind Umbauten bzw. Neubauten an den genannten Anlagen einzuplanen.

Die Baustelleneinrichtung muss prinzipiell die Bedingungen erfüllen, wie sie für eine Schachtreparatur bei 5,25 m Durchmesser und bis Teufen von rd. 520 m verwendet wird. Dabei ist zu berücksichtigen, dass sich der Schachtdurchmesser beim Einbau der Dichtungselemente durch die Herausnahme der bergbauinduzierten ALZ bis auf 8 m erweitert.

Die Baustelleneinrichtung schließt das Einrichten, Vorhalten und Räumen aller erforderlichen Maschinen, Anlagen und Ausrüstungen ein. Einzuplanen sind:

- die Schaffung der Baufreiheit im übertägigen Bereich,
- ggf. die Herstellung von Fundamenten für Haspel, Winden und sonstige Anlagen,
- die Montage einer beweglichen Arbeitsbühne,
- das Einrichten der Förderung einschließlich, aller Nebenanlagen,
- die Montage aller Versorgungsleitungen,
- die Einrichtung einer Wasserhaltung

BfS	Konzeptplanung der Schachtverschlüsse für die Schächte Bartensleben und Marie des ERA Morsleben	
9M/ 223 450 11/GHS/ TF/ 0001/00	Stand: 10.03.2004	Seite 184 von 215

und

- die Einrichtung einer Sonderbewetterung.

An Leistungen in der Schachtröhre, die der eigentlichen Verwahrung voraus gehen, sind zu nennen:

- das Rauben/Ausräumen der verbrochenen Massen im Schacht Marie und deren ordnungsgemäße Entsorgung,
- die Sicherung des Schachtkopfes,
- das Rauben aller Schachteinbauten,
- das Rauben des Schachtausbaus über die gesamte Schachtteufe,
- die Ermittlung der Gebirgspermeabilitäten in den Bereichen der Dichtelemente,
- das Rauben der ALZ im Bereich der Dichtelemente

sowie

- die Kontrolle und ggf. der Verschluss von Schachtabgängen.

Bei dem Verschluss von Schachtabgängen sind die im Schacht Marie bei 310 m Teufe angeschlossene Korkenzieherwendel und in beiden Schächten die Schachtwasserhaltungsanlagen zu verdämmen. Durch die Verdämmung muss sichergestellt werden, dass diese verdämmten Bereiche vergleichbare Eigenschaften hinsichtlich des mechanischen und hydraulischen Verhaltens wie das umgebende Gebirge aufweisen. Aus diesem Grunde ist anzustreben, die genannten Schachtabgänge bereits während des Stilllegungsbetriebes zu verfüllen und zu überwachen.

7.2 Erforderliche Maßnahmen zur Qualitätssicherung

Aufgabe eines Qualitätssicherungsprogramms ist die Gewährleistung einer garantierten Einhaltung der projektierten konstruktiven und materialtechnischen Vorgaben sowie die Umsetzung der projektierten technischen Abläufe bei der Ausführung des Schachtverschlussbauwerkes. Grundlage für ein solches Programm bildet stets eine Ausführungsplanung aus der die o.g. Vorgaben resultieren. Es kann also im Rahmen einer Konzeptplanung nicht das Ziel

BfS	Konzeptplanung der Schachtverschlüsse für die Schächte Bartensleben und Marie des ERA Morsleben	
9M/ 223 450 11/GHS/ TF/ 0001/00	Stand: 10.03.2004	Seite 185 von 215

verfolgt werden, ein detailliertes Qualitätssicherungsprogramm vorzulegen. Es können aber durchaus die Grundzüge eines Konzeptes zur Sicherstellung der qualitätsgerechten Bauausführung dargelegt werden. Die Basis eines Qualitätssicherungsprogramms bildet die Ausführungsplanung mit Angaben über Abmessungen, Materialien, Arbeitsmittel und technische Abläufe. Auf dieser Grundlage aufbauend, können für die verschiedenen Arbeitsabläufe exakte Arbeitsanweisungen entworfen werden. Dies ist insbesondere für Besonderheiten am Bau (spezielle Technologien etc.) zwingend erforderlich. Diese Arbeitsanweisungen dienen den ausführenden Firmen als Grundlage für die praktischen Arbeiten bei der Errichtung des Verschlussbauwerkes.

Bei der Ausschreibung und Vergabe der Arbeiten ist darauf zu achten, dass nur Unternehmen mit Erfahrung und entsprechend geschultem Personal zum Einsatz kommen. Die Besonderheit eines Schachtverschlussbauwerkes, darüber hinaus die eines Endlagerschachtverschlusses, erfordert explizit die Qualifikation und die damit verbundene Sensibilisierung des Personals für das Projekt vor und während der Arbeiten. Diese Projekterläuterungen sollten durch das projektierende Unternehmen durchgeführt werden. Dadurch wird ebenfalls eine Art „Feedback“ zwischen Planern und Ausführenden geschaffen, die dem Gesamtvorhaben förderlich sein kann. Jeder der in den Arbeitsanweisungen beschriebenen Arbeitsschritte ist durch den jeweiligen projektverantwortlichen Bearbeiter zu protokollieren und zu dokumentieren.

7.3 Einbau der unteren Widerlagersäule

Der jeweils untere Teil der Schachtröhren, aber auch die schachtnahen Grubenbaue sind mit setzungsarmem Material gemäß den in Kapitel 3.2.5 genannten Richtlinien zur Verwahrung von Tagesschächten zu verfüllen.

Die Auswahl des Materials und der Einbautechnologie hat unter dem Gesichtspunkt der möglichst geringen Volumenverringerng durch nachträgliche Setzungen in der Widerlagersäule zu erfolgen. Durch diese Anforderung werden die Dichtungen lagestabil gehalten und somit ihre Gebrauchstauglichkeit gewährleistet. Untersuchungen zum Setzungsverhalten in einer aus Schotter bestehenden und durch Versturz hergestellten Widerlagersäule wurden in [77] durchgeführt.

BfS	Konzeptplanung der Schachtverschlüsse für die Schächte Bartensleben und Marie des ERA Morsleben	
9M/ 223 450 11/GHS/ TF/ 0001/00	Stand: 10.03.2004	Seite 186 von 215

Als Material für die untere Widerlagersäule ist ein setzungsarmer Schotter einzusetzen. Für die Auswahl des Schotters sind die in den Nachweisführungen eingesetzten Parameter des Schotters einzuhalten bzw. in den folgenden Planungsstufen weitere Anforderungen an den Schotter entsprechend gültiger Vorschriften zu definieren. Diese Anforderungen sind dann durch vorliegende Erfahrungen bzw. halbtechnische und/oder In-situ-Versuche zu belegen. Bei der Auswahl der Einbringtechnologie des Schotters in den Schacht ist der Stand der Technik zu berücksichtigen.

Als Besonderheit der unteren Widerlagersäule ist das Verfüllen des Porenraumes von der Oberkante der unteren Widerlagersäule bis zur Sohle des obersten angeschlagenen Schachtabganges in dem jeweiligen Schacht mit einer Solezementsteinsuspension zu nennen. Diese Auffüllung des Porenraumes dient zur Lagestabilisierung des Bitumens/Asphaltes des kombinierten Widerlager-Dichtelementes DE 3. Die Solezementsteinsuspension sollte aus den gleichen stofflichen Komponenten wie der zur Verfüllung der Grubenhohlräume eingesetzte Salzbeton bestehen. Der Zuschlagstoff des Salzbetons wird durch den Schotter ersetzt.

Zur Gewährleistung der Tragfähigkeit und der Gebrauchstauglichkeit der unteren Widerlagersäule ist entsprechend dem Kapitel 7.2 ein Qualitätssicherungsprogramm in der Ausführungsplanung zu entwickeln.

7.4 Einbau der kombinierten Widerlager-Dichtelemente DE 2 und 3

Als vorbereitende Maßnahmen hat wie im Kapitel 7.1 beschrieben (i) das Rauben der Schachteinbauten sowie des Schachtausbaus, (ii) die Ermittlung der Gebirgspermeabilität des Salinars in der ALZ sowie im ungestörten Bereich und (iii) das gebirgsschonende Rauben der Auflockerungszone (die Festlegung der Mindesttiefe der zu raubenden ALZ ist auf der Grundlage der Messungen zur Gebirgspermeabilität im Steinsalz vorzunehmen) zu erfolgen. Die ausgewählten Dichtungshorizonte sind anschließend durch einen erfahrenen Geologen zu bemustern und zu bewerten.

Der Widerlagerbaustoff der kombinierten Widerlager-Dichtelemente DE 2 und DE 3 muss die gleichen Anforderungen hinsichtlich der Setzungsstabilität sowie des Materialverhaltens wie der unter Punkt 7.3 beschriebene Schotter erfüllen. Bei Einbau des Schottergerüsts in den geplanten Widerlagerbereich ist ebenfalls der Stand der Technik zu beachten.

BfS	Konzeptplanung der Schachtverschlüsse für die Schächte Bartensleben und Marie des ERA Morsleben	
9M/ 223 450 11/GHS/ TF/ 0001/00	Stand: 10.03.2004	Seite 187 von 215

Bei dem Einbringen von Bitumen/Asphalt in die Zwischenräume des Schotters ist darauf zu achten, dass die Restporosität in den kombinierten Widerlager-Dichtelementen minimiert wird.

Als Mindestanforderungen an die Materialeigenschaften der Baustoffe der kombinierten Widerlager-Dichtelemente, Bitumen/Asphalt sowie Schotter, sind die in den Kapiteln 6.3.3 und 6.4.4.3 angegebenen und den Nachweisführungen zu Grunde liegenden Parameter zur Gewährleistung der Tragfähigkeit und der Gebrauchstauglichkeit der kombinierten Widerlager-Dichtelemente einzuhalten.

Die Einbringtechnologie des Bitumen/Asphaltes in den Schotter ist auf der Grundlage vorliegender Erfahrungen bzw. durch halbtechnische und/oder In-situ-Versuche zu ermitteln.

Zur Gewährleistung der Tragfähigkeit und der Gebrauchstauglichkeit der kombinierten Widerlager-Dichtelemente ist entsprechend dem Kapitel 7.2 ein Qualitätssicherungsprogramm in der Ausführungsplanung zu entwickeln.

7.5 Einbau des asphaltlichten Kerns

Als vorbereitende Maßnahmen hat wie im Kapitel 7.1 beschrieben (i) das Rauben der Schachteinbauten sowie des Schachtausbaus, (ii) die Ermittlung der Gebirgspermeabilität des Salinars in der ALZ sowie im ungestörten Bereich und (iii) das gebirgsschonende Rauben der Auflockerungszone (die Festlegung der Mindesttiefe der zu raubenden ALZ ist auf der Grundlage der Messungen zur Gebirgspermeabilität im Steinsalz vorzunehmen) zu erfolgen. Die ausgewählten Einbauhorizonte der asphaltlichten Kerne sind anschließend durch einen erfahrenen Geologen zu bemustern und zu bewerten.

Der Aufbau, die Funktionsweise sowie die Materialauswahl für die asphaltlichten Kerne wurden in Kapitel 6.2 beschrieben.

Bei dem Einbau der aus Feinsand bestehenden Filterschicht ist eine ständige Qualitätsüberwachung des lagenweise einzubauenden und zu verdichtenden Feinsandes durchzuführen.

Anforderungen an die Materialeigenschaften der Baustoffe der asphaltlichten Kerne, des Feinsandes, des Gussasphalts sowie der abgestuften Sande, Kiese und Schotter sind in den weiteren Planungsstufen festzulegen.

BfS	Konzeptplanung der Schachtverschlüsse für die Schächte Bartensleben und Marie des ERA Morsleben	
9M/ 223 450 11/GHS/ TF/ 0001/00	Stand: 10.03.2004	Seite 188 von 215

Die Einbringtechnologien der genannten Baustoffe sind auf der Grundlage vorliegender Erfahrungen zu ermitteln. Dabei müssen die Zielstellungen hinsichtlich der Tragfähigkeit und der Gebrauchstauglichkeit berücksichtigt werden.

Bei den Arbeiten zum Einbau des Tonkerns ist eine ständige Qualitätsüberwachung des lagenweise einzubauenden und zu verdichtenden Tones durchzuführen.

Zur Gewährleistung der Tragfähigkeit und der Gebrauchstauglichkeit des asphaltlichten Kerns ist entsprechend dem Kapitel 7.2 ein Qualitätssicherungsprogramm in der Ausführungsplanung zu entwickeln.

7.6 Einbau des Dichtelementes DE 1

Als vorbereitende Maßnahmen hat wie im Kapitel 7.1 beschrieben (i) das Rauben der Schachteinbauten sowie des Schachtausbaus, (ii) die Ermittlung der Gebirgspermeabilität des Hutgesteins und (iii) das gebirgsschonende Rauben der Auflockerungszone zu erfolgen. Die ausgewählten Dichtungshorizonte sind anschließend durch einen erfahrenen Geologen zu bemustern und zu bewerten.

Als Dichtmaterial für die im Deckgebirge mit sofortiger Flüssigkeitsbelastung positionierte und bis ins Hutgestein reichende Dichtung ist ein Calcigel-Granulat vorgesehen. Die hydraulische Leitfähigkeit des Calcigel-Granulats ist in Abhängigkeit mit der noch zu bestimmenden Hutgesteinspermeabilität einzustellen, sollte mindestens aber nach derzeitigem Kenntnisstand $2 * 10^{-12}$ m/s betragen.

Als Mindestanforderung an die Materialeigenschaften des Calcigel-Granulats sind die in den Kapiteln 6.3.3 und 6.4.3.2 angegebenen und den Nachweisführungen zu Grunde liegenden Parameter zur Gewährleistung der Tragfähigkeit und der Gebrauchstauglichkeit der Dichtelemente DE 1 einzuhalten.

Bei den Arbeiten zum Dichtungseinbau ist eine ständige Qualitätsüberwachung des lagenweise einzubauenden und zu verdichtenden Calcigel-Granulats durchzuführen.

Zur Gewährleistung der Tragfähigkeit und der Gebrauchstauglichkeit des Dichtelementes DE 1 ist entsprechend dem Kapitel 7.2 ein Qualitätssicherungsprogramm in der Ausführungsplanung zu entwickeln.

BfS	Konzeptplanung der Schachtverschlüsse für die Schächte Bartensleben und Marie des ERA Morsleben	
9M/ 223 450 11/GHS/ TF/ 0001/00	Stand: 10.03.2004	Seite 189 von 215

7.7 Einbau der oberen Widerlagersäule

Als vorbereitende Maßnahmen hat wie im Kapitel 7.1 beschrieben das Rauben der Schachteinbauten sowie des Schachtausbaus zu erfolgen. Durch das Rauben der Schachtein- und ausbauten und unter Verwendung eines Mineralgemisches zur Verfüllung des Schachtes werden

- die Wiederherstellung des Aufbaus des Deckgebirges (Trennung der einzelnen Grundwasserstockwerke voneinander)

sowie

- die Verringerung des hydraulischen Druckgradienten auf das Dichtelement DE 1

erreicht.

Das Mineralgemisch ist so einzubauen, dass Setzungen in diesem Teil der Verfüllsäule minimiert werden. Bei der Auswahl der Einbringtechnologie des Mineralgemisches in den Schacht ist der Stand der Technik zu berücksichtigen.

Zur Gewährleistung der Tragfähigkeit der oberen Widerlagersäule ist entsprechend dem Kapitel 7.2 ein Qualitätssicherungsprogramm in der Ausführungsplanung zu entwickeln.

7.8 Abdeckplatte

Den übertägigen Abschluss bildet eine Abdeckplatte. Diese Stahlbetonkonstruktion wird bei vollständig verfüllten Schächten auf das Schachtkopfmauerwerk aufgelegt. Da Setzungen der Verfüllsäule während des Betoniervorganges nicht auszuschließen sind, erfolgt zuvor der Einbau einer Schalungsbühne. Wenn keine anderen Forderungen erhoben werden, wird eine solche Platte für eine Belastung von 20 kN/m^2 ausgelegt. Die Bemessung erfolgt in der Regel für eine zweiachsig gespannte Platte ohne Drillbewehrung.

In der Platte wird eine Kontroll- und Nachfüllöffnung vorgesehen und durch einen Kanal-Schachtdeckel verschlossen.

Zur Gewährleistung der Tragfähigkeit und der Gebrauchstauglichkeit der Abdeckplatte ist entsprechend dem Kapitel 7.2 ein Qualitätssicherungsprogramm in der Ausführungsplanung zu entwickeln.

BfS	Konzeptplanung der Schachtverschlüsse für die Schächte Bartensleben und Marie des ERA Morsleben	
9M/ 223 450 11/GHS/ TF/ 0001/00	Stand: 10.03.2004	Seite 190 von 215

QUELLENVERZEICHNIS

- [1] EBEL, K. (Leiter Autorengruppe), Slotta, R. (Redaktion); 100 Jahre Schacht Marie, Salzbergbau im Oberen Allertal“; Hrsg. Knappenverein „Oberes Allertal“ Morsleben 1990 e.V. Druck: Meiling Druck, Haldensleben
- [2] EBEL, K.; „Das Endlager für radioaktive Abfälle Morsleben (ERAM)“; aus „Zur Geschichte der Kernenergie in der DDR“; Hrsg. Verein für Kernverfahrenstechnik und Analytik Rossendorf e.V.; Seiten 309 bis 333
- [3] STORCK, R.; BIRTHLER, H.; HAGEMANN, S.; HIRSEKORN, R.-P.; KRÖHN, K.-P.; KÜHLE, T.; (2001): Untersuchungen zur Entwicklung und Bewertung von Stilllegungsmaßnahmen nach dem Abdichtungskonzept; Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit mbH; Braunschweig, 20.04.2001; 9M 232 100-51
- [4] BUNDESBERGGESETZ (BBergG); (1980): vom 13. August 1980 (BGBl. I S. 1310) – zuletzt geändert durch Gesetz vom 18. Juni 1997 (BGBl. I S. 1430); 9.Auflage, Verlag Glückauf GmbH Essen
- [5] PREUSS, J.; WELLMANN, P. L.; (2000): Planungsstudie zum Schachtverschluss der Schächte Bartensleben und Marie, Bundesamt für Strahlenschutz
- [6] Honorarordnung für Architekten und Ingenieure (HOAI); (1991): in der Fassung der Bekanntmachung vom 4. März 1991 (BGBl. I S. 533) – zuletzt geändert durch Art. 5 Neuntes Euro-Einführungsg v. 10.11.2001 (BGBl. I S. 2992)
- [7] OELLERS, T.; SITZ, P.; (1985): Entwurf und Berechnung gas- und flüssigkeitsdichter Schachtverschlüsse“; Sonderabdruck aus „Schacht- und Tunnelbaukolloquium 1985“; Seiten 48 bis 56
- [8] MRAZ, D.Z. (1987): Proposed design for high pressure isolation structure in saltrock“; Presentation at 6th International ISRM Congress, Montreal, Quebec, August 30 - September 3, 1987

BfS	Konzeptplanung der Schachtverschlüsse für die Schächte Bartensleben und Marie des ERA Morsleben	
9M/ 223 450 11/GHS/ TF/ 0001/00	Stand: 10.03.2004	Seite 191 von 215

- [9] STRECKDENFINGER, M. (1999): The Stocamine underground waste storage, Mining for Tomorrow's World"; MINETIME Congress 99, Düsseldorf, Germany, June 8- 10, 1999, Proceedings, 233-238
- [10] SITZ, P.; KRAUSSE, A.; EULENBERGER, K.-H.; SCHLEINIG, J.-P. (1995): Darstellung des gegenwärtigen Standes von Wissenschaft und Technik für Schachtverschlüsse von Salzbergwerken"; Schachtverschlüsse für untertägige Deponien in Salzbergwerken – Vorprojekt -; GSF – Bericht 32/ 95
- [11] TGL 11 388/02; (1989): Bauten unter Tage, Projektierung und Ausführung von Schutzbauten gegen Standwasser";
- [12] SITZ, P.; (1981): Querschnittsabdichtungen untertägiger Hohlräume durch Dämme und Pfropfen; Dissertation B an der TU Bergakademie Freiberg
- [13] MESSENBRINK, H.; SITZ, P.; ZIPPER, H.; (1994): Zur Planung von Gasspeichern in stillgelegten Kali- und Steinsalzwerken"; Vorträge und Kurzfassungen des Internationalen Kolloquiums „20 Jahre Untergrundspeicher Bernburg"; Freiberg
- [14] KLEMME, J.; (1978): Die Umwandlung des stillgelegten Kalibergwerkes Wilhelmine-Carls Glück in Hülsen bei Verden/ Aller in einen Rohölspeicher"; Kali und Steinsalz, Bd. 7 (1978), Heft 7
- [15] KRAUKAU U.; KÖCKRITZ, V.; SITZ, P.; (1990): Querschnittsabdichtung von untertägigen Hohlräumen und von Bohrlöchern unter besonderer Berücksichtigung der Endlagerung radioaktiver Abfälle, Teil IV: Auswahl, Eigenschaften und Untersuchungen von Abdichtmaterialien"; Neue Bergbautechnik, 20. Jg., Heft 5, Mai 1990; Seiten 171 bis 176
- [16] EHRHARDT, K.; (2001): Entwicklung und Eigenschaftsuntersuchung von schüttfähigen Bentonit-Zuschlagstoff- und Bentonit-Gemischen für den untertägigen Einsatz als Dichtmaterial"; Dissertation TU BAF

BfS	Konzeptplanung der Schachtverschlüsse für die Schächte Bartensleben und Marie des ERA Morsleben	
9M/ 223 450 11/GHS/ TF/ 0001/00	Stand: 10.03.2004	Seite 192 von 215

- [17] BREIDUNG, K.P.; (2001): Betreuung und Regulierung des Altbergbaus der Kaliindustrie in der K+S-Gruppe“; Tagungsvortrag, Aspekte der Langzeitsicherheit bei der Nachnutzung und Stilllegung von Kali- und Steinsalzbergwerken; Sondershausen
- [18] SKRZYPPEK, J.; HEIMER, S.; PIEPER, C.; (1998): Zur sicherheitlichen Beurteilung untertägiger Bauwerke in der Entwurfs- und Optimierungsphase; Erzmetall 51 (1998) Nr. 7/8, Seiten 513 bis 522
- [19] GREER, W. B.; DAEMEN, J. J. K. (1991): Analyses and Field Tests of the Hydraulic Performance of Cement Grout Borehole seals, Technical Report NUREG/CR-5684, Department of Mining and Geological Engineering University of Arizona 1991
- [20] HÄFNER, F., BEHR, A., FÖRSTER, S., BELOHLAVEK, K. U., POHL, A.; (1999): In-Situ-Ermittlung von Strömungskennwerten in Auflockerungszonen gegenüber Gas unter den gegebenen Spannungsbedingungen im Gebirge. Untertägige Entsorgung, 4. Statusgespräch, 14./15. September 1999, Clausthal-Zellerfeld. Forschungszentrum Karlsruhe, Wissenschaftliche Berichte, FZKA-PTE Nr. 6, S. 91 – 120
- [21] SITZ, P.; GRUNER, M.; (1994): Untertägiger Entsorgungsbergbau - Versiegelungskonzepte und Versiegelungsmaterialien; Vortrag zum Berg- und Hüttenmännischen Tag 1994 in Freiberg EMC'94 - Tagungsband, Seiten 488 bis 500
- [22] SITZ, P.; GRUNER, M.; (1994): Materialien für untertägige Abdicht- und Verschlussbauwerke - Anforderungen, Einsatzmöglichkeiten und Erfahrungen; Vortrag zur Tagung "Untertägige Bauwerke" in Mährisch Ostrau; Tagungsband 1994 S. 57 – 60
- [23] SITZ, P.; GRUNER, M. (1997): Verschlussbauwerke für Untertagedeponien - Eignungsuntersuchungen an Bentoniten. Vortrag zum Geomechanischen Kolloquium 1997 in Salzburg/Österreich - Felsbau 15 (1997) 6, S. 473 – 476

BfS	Konzeptplanung der Schachtverschlüsse für die Schächte Bartensleben und Marie des ERA Morsleben	
9M/ 223 450 11/GHS/ TF/ 0001/00	Stand: 10.03.2004	Seite 193 von 215

- [24] SITZ, P.; GRUNER, M.; (1997): Materialuntersuchung für Mehrkomponentensysteme auf Ton/Bentonit-Basis für Dichtung und Lastabtrag, mit hohem Rückhaltevermögen, für den langzeitsicheren Verschluss von UTD und Endlagern im Salinar; Abschlussbericht zum BMBF-Vorhaben 02 C 0193; TU Bergakademie Freiberg
- [25] US DEPARTMENT OF COMMERCE; (1995): Waste Isolation Pilot Plant Sealing System Design Report National Technical Information Service, Springfield
- [26] STORMONT, J. C. (1984): Plugging and sealing Program for the Waste isolation Pilot Plant (WIPP)”, Sandia National Laboratories, SAND 84-1057
- [27] NOWAK, E. J.; STORMONT, J. C. (1987): Scoping Model Calculations of the Reconsolidation of Crushed Salt in WIPP Shafts”, Sandia National Laboratories, SAND 87-0879
- [28] SJAARDEMA, G. D.; KRIEG, R. D. (1987): A Constitutive Model for the Consolidation of WIPP Crushed Salt and Its Use in Analyses of Backfill Shaft and Drift Configurations”, Sandia National Laboratories, SAND 87-1977
- [29] DAEMEN, J. J. K., RAN, C. (1996): “Bentonit as a Waste Isolation Pilot Plant Shaft Sealing Material”, Sandia National Laboratories, SAND 96-1968
- [30] Gesamtfassung der Zweiten allgemeinen Verwaltungsvorschrift zum Abfallgesetz (TA Abfall), Köln: Bundesanzeiger, 42-51, 1991
- [31] FÖRSTER, W.; SITZ, P.; KÖCKRITZ, V.; (1990): Querschnittsabdichtung von untertägigen Hohlräumen und von Bohrlöchern unter besonderer Berücksichtigung der Endlagerung radioaktiver Abfälle, Teil I: Anforderungen an die Abdichtung und prinzipielle konstruktive Möglichkeiten“; Neue Bergbautechnik, 20. Jg., Heft 5, Mai 1990; Seiten 171 bis 176
- [32] SALZER, K.; SCHMIDT, M.W.; (1992): Gebirgsmechanische und geotechnische Empfehlungen und Grundsätze zur sicheren Verwahrung von Tagesschächten des Salzbergbaus im Südharz-Kalirevier“; Institut für Gebirgsmechanik GmbH, Leipzig; GSF – Forschungszentrum für Umwelt und Gesundheit mbH, Institut für Tieflagerung; Braunschweig, Juli 1992

BfS	Konzeptplanung der Schachtverschlüsse für die Schächte Bartensleben und Marie des ERA Morsleben	
9M/ 223 450 11/GHS/ TF/ 0001/00	Stand: 10.03.2004	Seite 194 von 215

- [33] OELLERS, TH.; (1990): „Asphaltdichtungen für untertägige Hohlräume“; 9th National Rock Mechanics Symposium, Aachen
- [34] SITZ, P.; SCHMIDT, W.; KESSLER, J.; (1992): „Physikalische und Chemische Eigenschaften von Bentonit als Verfüll- und Versiegelungsmaterial bei der Endlagerung radioaktiver Abfälle“; NAGRA: Technischer Bericht 93-37; November 1992
- [35] KRUMHANSL, J. L. (1984): „Observations Regarding the Stability of Bentonit Backfill in a High-Level Waste (HLW) Repository in Rock Salt, Sandia National Laboratories, SAND 83-1293
- [36] GREINACHER, J.; PIEPENBREIER, G.; (1992): „Langzeitsicherung unterirdisch einzulagernder Abfälle mit mineralischen Abdichtungsmaterialien“; Glückauf 128 (1992) Nr. 4 Seiten 276 bis 281
- [37] DYWIDAG Umweltschutztechnik; „DYWIDAG-Mineralgemisch das flexibel einsetzbare Abdichtungsmaterial auf mineralischer Basis“; Firmenprospekt
- [38] GIERENZ, S.; (1990): „Verfüllung von stillgelegten Schächten der Kali und Salz AG“; Kali und Steinsalz, Band 10, Heft 7/ 8, Mai 1990 Seiten 257 bis 261
- [39] Oberbergamt Clausthal-Zellerfeld; „Richtlinie für das Verfüllen und Abdecken von Tagesschächten“; Verfügung vom 14.07.1989–0.3.–1/89–B II f. 5.2–I–
- [40] Landesoberbergamt Nordrhein-Westfalen; „Richtlinie des Landesoberbergamts NW für das Verfüllen und Abdecken von Tagesschächten“; Verlag Glückauf, 1983
- [41] SIA 160: „Einwirkungen auf Tragwerke“; Schweizerischer Ingenieur- und Architekten-Verein; 1989
- [42] SIA 260: „Sicherheit und Gebrauchsfähigkeit von Tragwerken“; Schweizerischer Ingenieur- und Architekten-Verein; 1982
- [43] DIN V ENV 1991-1: „Grundlagen der Tragwerksplanung und Einwirkungen auf Tragwerke, Teil 1: Grundlagen der Tragwerksplanung“; Deutsche Fassung ENV 1991-1, 1994

BfS	Konzeptplanung der Schachtverschlüsse für die Schächte Bartensleben und Marie des ERA Morsleben	
9M/ 223 450 11/GHS/ TF/ 0001/00	Stand: 10.03.2004	Seite 195 von 215

- [44] DIN V ENV 1997-1: Auslegung von Bauwerken gegen Erdbeben; 1994
- [45] DIN V ENV 1998 -1: Entwurf, Berechnung und Bemessung in der Geotechnik; 1996
- [46] DIN 1054-100: Sicherheitsnachweise im Erd- und Grundbau, Berechnung nach dem Konzept mit Teilsicherheitsbewertungen; 1996
- [47] ARBEITSKREIS „SALZMECHANIK“; (1993): Empfehlungen des Arbeitskreises „Salzmechanik“ der Deutschen Gesellschaft für Erd- und Grundbau e.V. zur Geotechnik der Untertagedeponierung von besonders überwachungsbedürftigen Abfällen im Salzgebirge – Ablagerung in Bergwerken“; Bautechnik 70 (1993), Heft 12; Verlag Ernst & Sohn
- [48] Bundesanzeiger 35, 2: Sicherheitskriterien für die Endlagerung radioaktiver Abfälle in einem Bergwerk“; vom 05.01.1983
- [49] GFE, CPE; (1999): Geologische und hydrogeologische Situation des schachtnahen Bereiches Schacht Bartensleben im Oberen Allertal“; Abschlussbericht der Geologischen Forschung und Erkundung –GFE- GmbH, Colenco Power Engineering AG; 192 Seiten; Halle und Baden (Schweiz)
- [50] GFE, CPE; (1999): Geologische und hydrogeologische Situation des schachtnahen Bereiches Schacht Marie im Oberen Allertal“; Abschlussbericht der Geologischen Forschung und Erkundung –GFE- GmbH, Colenco Power Engineering AG; 166 Seiten; Halle und Baden (Schweiz)
- [51] SITZ, P. (1971): Gutachten über die Standsicherheit des Ausbaues der Schächte Bartensleben und Marie und Maßnahmen zur Verbesserung des Ausbauzustandes“; unveröffentlicht, TU Bergakademie Freiberg 1971
- [52] ABERLE, B; KLEIN, J; STADIE, U.; GÄRTNER, D. (1999): Standsicherheitsnachweis für Schacht Bartensleben und Schacht Marie“, Abschlußbericht U 461 M4 vom 12.08.1999, Deutsche Montan Technologie GmbH, Essen, 286 Seiten

BfS	Konzeptplanung der Schachtverschlüsse für die Schächte Bartensleben und Marie des ERA Morsleben	
9M/ 223 450 11/GHS/ TF/ 0001/00	Stand: 10.03.2004	Seite 196 von 215

- [53] RANFT, M. & STIER-FRIEDLAND, G. (1999): Erkundungsarbeiten zur geologischen Neubearbeitung der Schächte Bartensleben und Marie im oberen Allertal: Planung, Ausführung, Ergebnisse“; Vortrag im Rahmen der 66. Tagung der NWDG. Salzwedel
- [54] WITTKER, B. (1999): Permeabilität von Steinsalz – Theorie und Experiment. WBI-Print 3, Verlag Glückauf Essen, 1999
- [55] DBE: Geomechanische Betriebüberwachung – Bartensleben
- [56] Sohlenriss, Bartensleben S253
- [57] Sohlenriss, Bartensleben S291
- [58] Sohlenriss, Bartensleben S332
- [59] Sohlenriss, Bartensleben S365
- [60] Sohlenriss, Bartensleben S372
- [61] Endlager für radioaktive Abfälle Morsleben; Zwischensohlenriß –185 m NN, 310-315 m Sohle Marie; 9M01YGBRG000113
- [62] Endlager für radioaktive Abfälle Morsleben; Zwischensohlenriß –195 m NN, 320-331 m Sohle Marie; 9M02YGBRG000112
- [63] DBE: Geomechanische Betriebüberwachung – Marie
- [64] Sohlenriss, Marie S231
- [65] Sohlenriss, Marie S372
- [66] Sohlenriss, Marie S225
- [67] Sohlenriss, Marie S253
- [68] HARVIE, C.E.; MØLLER, N.; WEARE, J.H. (1984): The prediction of mineral solubilities in natural waters: The Na-K-Mg-Ca-Cl-SO₄-OH-HCO₃-CO₃-CO₂-H₂O system at high ionic strengths at 25°C -Geochimica et cosmochimica Acta, 48, (1984), 723-751

BfS	Konzeptplanung der Schachtverschlüsse für die Schächte Bartensleben und Marie des ERA Morsleben	
9M/ 223 450 11/GHS/ TF/ 0001/00	Stand: 10.03.2004	Seite 197 von 215

- [69] DBE; (2001a): Salzbetoneigenschaften und Materialkennwerte (Referenzmaterial M2); 9M 223 430 11 GH RB 0031
- [70] DBE; (2001b): Ergänzende Untersuchungen – Referenzmaterial Salzbeton M2; 9M 223 430 21 GH RB 0042
- [71] Sicherheitskriterien für die Endlagerung radioaktiver Abfälle in einem Bergwerk. Bundesanzeiger 1983, Nr. 2 vom 05.01.1983.
- [72] HERBERT, H.-J.; MEYER, T.; SCHMIDT-DÖHL, F.; DETTMER, F.; (2002): Zementkorrosion, geochemische, geomechanische und strömungstechnische Untersuchungen zur Absicherung der Modellansätze von Langzeitsicherheitsanalysen; Abschlussbericht von GRS und iBMB; GRS – A - 3034; Braunschweig, 01.04.2002; PSP Element 9M 232 200 -11/12
- [73] ARGE (2003): Nachweisführungen zur Langzeitstabilität, zur Tragfähigkeit und zur Gebrauchstauglichkeit der Schachtverschlüsse ERA Morsleben; Zwischenbericht von TU Bergakademie Freiberg, K+S Consulting GmbH, ERCOSPLAN Ingenieurgesellschaft Geotechnik und Bergbau mbH; 9M/ 223 450 11/ GHS/ RA/ 0004/ 00; 11.11.2003
- [74] SITZ, P; GRUNER, M. (1993): Möglichkeiten der Bewertung der Langzeitstabilität von Bentonit durch natürliche Analoga, Sammlung der Vorträge anlässlich des Workshops „Natürliche Analoga zur Endlagerung radioaktiver Abfälle“ am 04. und 05. November 1993 im Kernforschungszentrum Karlsruhe, S. 215-224
- [75] SITZ, P., ERHARDT, K. (2002): Forschungsprojekt Schachtverschluss Salzdetfurth, Abschlussbericht zum Dichtelement, Teilbericht des Institutes für Bergbau der TU Bergakademie Freiberg im Auftrag der Kali und Salz AG Kassel, unveröffentlicht
- [76] PROJEKT GEWÄHR 1985 (1985): Endlager für Hochaktive Abfälle: Das System der Sicherheitsbarrieren, Projektbericht der NAGRA, NGB 85-04, Baden (Schweiz)

BfS	Konzeptplanung der Schachtverschlüsse für die Schächte Bartensleben und Marie des ERA Morsleben	
9M/ 223 450 11/GHS/ TF/ 0001/00	Stand: 10.03.2004	Seite 198 von 215

- [77] K+S KALI GMBH (2002): Forschungsprojekt Schachtverschluss Salzdettfurth Schacht II (Kurzfassung), Kurzfassung des Abschlussberichtes zum BMBF-Vorhaben 02C0516
- [78] BUCHER, F.; SPIEGEL, U. (1984): Quelldruck von hochverdichteten Bentoniten, NAGRA Technischer Bericht, Institut für Grundbau und Bodenmechanik, ETH Zürich 1984
- [79] ALLISON, J., A.; WILSON, J.; MAWDITT, J., M; HURT, J., C. (1990): Research on swelling clays and bitumen as sealing materials for radioactive waste repositories; UK Department of Environment: HMIP-commissioned research report; DoE/HMIP/RR/91/009
- [80] DIXON, D. A.; CHANDLER, N. A.; WAN, A. W-L.; STROES-GASCOYNE, S.; GRAHAM, J.; OSCARSON, D. W. (1998): Pre- and Post –Test properties of the buffer, backfill, sand, and rock components of the Buffer/Container Experiment. Atomic Energy of Canada Limited Report, AECL-11786, COG-97-287-I, 121 p.
- [81] GRAHAM, J.; GRAY, M. N.; SUN, B. C.-C.; DIXON, D. A. (1986): Strength and volume change characteristics of a sand-bentonite buffer. Proc. Canadian Nuclear Society 2nd Int. Conf. On Radioactive Waste Management, Winnipeg, pp. 188-194.
- [82] GRAY, M. N., CHEUNG, S. C. H.; DIXON, D. A. (1984): The influence of sand content on swelling pressures and structure developed in statically compacted Na-bentonite. Atomic Energy of Canada Limited Report, AECL-7825.
- [83] GRAY, M. N., CHEUNG, S. C. H.; DIXON, D. A. (1986): Swelling pressures of compacted bentonite/sand mixtures. Materials Res. Soc. Symposium Proceedings, Vol. 44, pp. 523-530
- [84] KARNLAND, H. (1998): Bentonite swelling pressure in strong NaCl solutions. Helsinki, Posiva Oy Report, POSIVA 98-01

BfS	Konzeptplanung der Schachtverschlüsse für die Schächte Bartensleben und Marie des ERA Morsleben	
9M/ 223 450 11/GHS/ TF/ 0001/00	Stand: 10.03.2004	Seite 199 von 215

- [85] OSCARSON, D. W.; DIXON, D. A.; GRAY, M. N. (1990): Swelling capacity and permeability of an unprocessed and a processed bentonite clay. *Engineering Geology*, Vol. 28, pp. 281-289.
- [86] OUYANG, S.; DAEMEN, J. J. K. (1992): Sealing performance of bentonite and bentonite/crushed rock borehole plugs. United States Nuclear Regulatory Commission Report, NUREG/CR-5685.
- [87] PETERSON, E.; KELKAR, S. (1982): Laboratory tests to determine hydraulic and thermal properties of bentonite-based backfill materials. Albuquerque, NM., Sandia National Laboratories Contractor Report, SAND 82-7221, 64 p.
- [88] PFEIFLE, T. W.; BRODSKY, N. A. (1991): Swelling pressure, water uptake and permeability of 70/30 crushed salt/bentonite. Albuquerque NM, Sandia National Laboratories Report, SAND91-7070.
- [89] PUSCH, R. (1980): Water uptake, migration and swelling characteristics of unsaturated and saturated, highly compacted bentonite. Stockholm, Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Company (SKB), Technical Report 80-11.
- [90] PUSCH, R. (1980): Swelling pressures of highly compacted bentonite. Stockholm, Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Company (SKB), Technical Report 80-13.
- [91] STORMONT, J. C.; HOWARD, C. L. (1987): Development, implementation and early results: Test series C of the small-scale seal performance tests. Albuquerque, NM, Sandia National Laboratory Report, SAND87-2203, UC-70.
- [92] WARKENTIN, B. P.; SCHOFIELD, R. K. (1962): Swelling pressure of Namontmorillonite in NaCl solutions, *J. of Soil Science*, Vol. 13, No. 1, pp. 98-105.
- [93] YAN, L.; LOW, P. F.; ROTH, C. B. (1996): Swelling pressure of montmorillonite layers versus H-O-H bending frequency of the interlayer water, *Clays and Clay Minerals*, Vol. 44. No. 6, pp. 749-756
- [94] SCHÖNIAN; E. (1999): *The Shell Bitumen Hydraulic Engineering Handbook*, Design and Print Partnership New Malden

BfS	Konzeptplanung der Schachtverschlüsse für die Schächte Bartensleben und Marie des ERA Morsleben	
9M/ 223 450 11/GHS/ TF/ 0001/00	Stand: 10.03.2004	Seite 200 von 215

- [95] KRAKAU, U. (1990): Untersuchungen zu physikalischen und physikochemischen Wechselwirkungen beim Einsatz von Bitumen und Asphalt zur Abdichtung und Verwahrung untertägiger Hohlräume, Dissertation TU Bergakademie Freiberg
- [96] KRAKAU, U.; SITZ, P. (1991): Auswahl von Bitumen und Asphalt für untertägige Verwendung, Zeitschrift Glückauf 127, 11/12, S. 459-464
- [97] NAGRA TECHNISCHER BERICHT 83-18 (1983): Literaturstudie über den Abbau von Bitumen durch Mikroorganismen, Dezember 1984, Institut für Pflanzenbiologie, Universität Zürich
- [98] OELLERS, T. (1983): Asphalt als aktives Dichtungsmittel für den Schachtbau, Glückauf 119, 1983
- [99] DVWK 237 (1996): Deponieabdichtungen in Asphaltbauweise, Merkblätter 237/1996 des Deutschen Verbandes für Wasserwirtschaft und Kulturbau e.V. (DVWK)
- [100] STEFFEN, H.: Asphaltdichtungen für Abfalldeponien, unveröffentlicht, ERCOSPLAN, 19xx?
- [101] NAGRA TECHNISCHER BERICHT 83-11 (1983): Bitumen, ein Verfestigungsmaterial für radioaktive Abfälle, und seine historischen Analoga, August 1983; ELEKTROWATT Ingenieurunternehmung AG Abteilung Ökologie, Zürich
- [102] NAGRA TECHNISCHER BERICHT 89-14 (1989): Mikrobieller Abbau von Bitumen, Institut für Pflanzenbiologie der Universität Zürich, April 1989
- [103] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY (1986): Sealing of Underground Repositories for Radioactive Wastes, IAEA, Division of Nuclear Fuel Cycle, August 1986

BfS	Konzeptplanung der Schachtverschlüsse für die Schächte Bartensleben und Marie des ERA Morsleben	
9M/ 223 450 11/GHS/ TF/ 0001/00	Stand: 10.03.2004	Seite 201 von 215

- [104] KRAKAU, U.; KÖCKRITZ, V. (1993): Langzeitbeständigkeit von Bitumen und Asphalten aus geologischer und historischer Sicht, Sammlung der Vorträge anlässlich des Workshops „Natürliche Analoga zur Endlagerung radioaktiver Abfälle“ am 04. und 05. November 1993 im Kernforschungszentrum Karlsruhe, S. 210-211
- [105] JACOBS, G. (1994): Chemische Analyse der Stoffwechselprodukte anaerober Bakterienkulturen in MIOR-Laborversuchen unter Berücksichtigung norddeutscher Lagerstättenbedingungen, Dissertation, Fakultät für Bergbau, Hüttenwesen und Maschinenwesen, TU Clausthal, ISBN 3-930697-46-7
- [106] DIN 4022: Baugrund und Grundwasser, Benennen und Beschreiben von Boden und Fels
- [107] DEUTSCHE BAHN AG: Technische Lieferbedingungen Gleisschotter, TL 918 061
- [108] KNIPPING, B. (1989): Basalt Intrusions in Evaporits, Lecture Notes in Earth Sciences, 24, VI, 132 pages, Berlin
- [109] SCHULZE, O.; POPP, T. (2002): Untersuchungen zum Dilatanzkriterium und zum Laugendruckkriterium für die Beurteilung der Integrität eines Endlagerbergwerks in einer Steinsalzformation, Zeitschrift für angewandte Geologie 2/2002
- [110] CRISTESCU, N.; HUNSCHE, U. (1998): Time effects in rock mechanics.- Series: Materials, modelling and computation; 342 pp.; John Wiley & Sons, Chichester (UK) 1998
- [111] ITASCA (2000): FLAC Fast Lagrangian Analysis of Continua, Itasca Consultants Group, Minneapolis, 2000
- [112] LAUTERBACH, M. (2001): Möglichkeiten zur direkten Untersuchung der Durchlässigkeit im Deckgebirge von Kali- und Steinsalzlagerstätten, Tagungsvortrag, Aspekte der Langzeitsicherheit bei der Nachnutzung und Stilllegung von Kali- und Steinsalzwerken, Sondershausen 30./31. März 2001

BfS	Konzeptplanung der Schachtverschlüsse für die Schächte Bartensleben und Marie des ERA Morsleben	
9M/ 223 450 11/GHS/ TF/ 0001/00	Stand: 10.03.2004	Seite 202 von 215

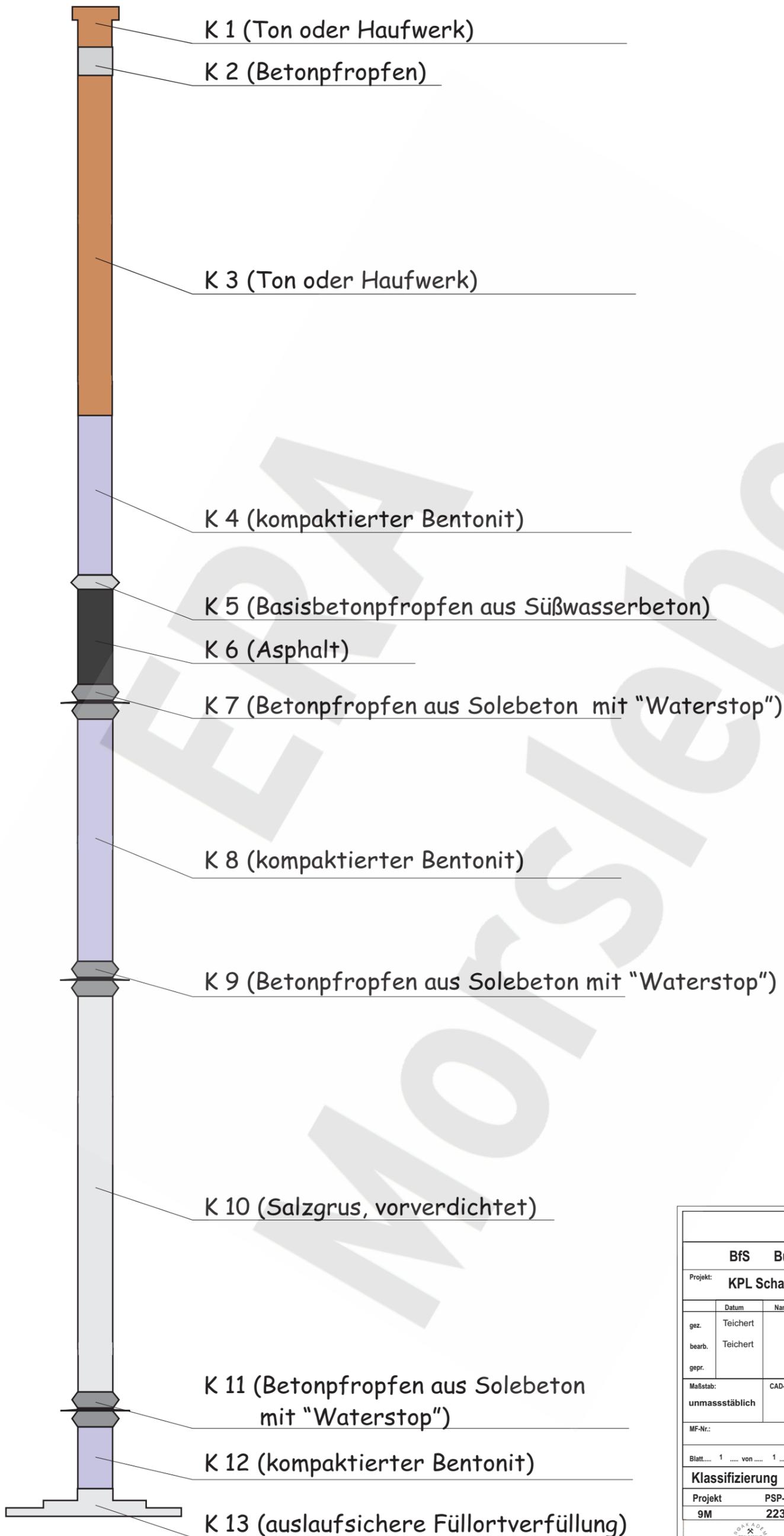
- [113] DIXON, D. A. (2000): Porewater salinity and the development of swelling pressure in bentonite-based buffer and backfill materials, Posiva Report Helsinki Finnland 2000
- [114] MADSON, F. T. (1998): Clay mineralogical investigations related to nuclear waste disposal. Clay minerals 33 (1998) S. 109 – 129
- [115] SITZ, P. (2002): Erstellung von Konzepten für die flüssigkeitsdichte, dauerhafte Verwahrung der Schächte 1, 2 und 3 des Werkes Salzdettfurth, IBWa-Ingenieurgesellschaft Wilsnack & Partner Freiberg im Auftrag der Kali und Salz AG, Freiberg 2002, unveröffentlicht
- [116] BUCHER, F.; JEDELHAUSER, P.; MAYOR, P.-A. : (1986): Quell-, Durchlässigkeits- und Schrumpfversuche an Quarzsand-Bentonit-Gemischen; NAGRA Technischer Bericht, Institut für Grundbau und Bodenmechanik, ETH Zürich 1986
- [117] NAGRA (2002): Technical Report 02-05; Projekt Opalinuston; Safety Report; Demonstration of disposal feasibility for spent fuel, vitrified high-level waste and long-lived intermediate-level waste; (Entsorgungsnachweis), Nagra, Wettingen, Schweiz 2002
- [118] BOY, S., HÄFNER, F., HOTH, N., WILSNACK, T. (2001): Simulation dichteabhängiger Stofftransportprozesse. Grundwasser, Heft 1, Band 6
- [119] HÄFNER, F., BOY, S. (2002): An Adaptive Grid Refinement and Other Methods of Acceleration in Variable Density Flow and Transport Modeling with MODCALIF, Proceedings of the conference MODFLOW '01, Colorado School of Mine, Sept.
- [120] GRISSEMANN, C.; CZORA, C.; KOSS, G. (1998): Untertägige Temperaturmessungen im Rahmen der geowissenschaftlichen Standorterkundung des Endlagers für radioaktive Abfälle in Morsleben, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe BGR, Hannover 1998
- [121] DIN 55946 Teil 1 (1983): Bitumen und Steinkohlenteerpech, Begriffe für Bitumen und Zubereitungen aus Bitumen

BfS	Konzeptplanung der Schachtverschlüsse für die Schächte Bartensleben und Marie des ERA Morsleben	
9M/ 223 450 11/GHS/ TF/ 0001/00	Stand: 10.03.2004	Seite 203 von 215

- [122] EILERS, H. (1941): Die Viskosität von Emulsionen hochviskoser Stoffe als Funktion der Konzentration, Kolloid-Zeitschrift, Band 97, Heft 3 (1941), S. 313-321
- [123] IBEWA (1999): Permeabilitätsmessungen im Bohrschacht Salzdetfurth, Bericht im Auftrag der Kali und Salz GmbH, IBeWa – Ingenieurgesellschaft für Bergbau, Wasser- und Deponietechnik Wilsnack und Partner, Freiberg, Dezember 1999
- [124] MIEHE, R.; HARBORTH, B.; KLARR, K.; OSTROWSKI, L. (1993): Permeabilitätsbestimmungen im Staßfurt-Steinsalz in Abhängigkeit von einer Streckenauffahrung. Kali und Steinsalz, Band 11, Heft 5/6, 12/1993
- [125] WIECZOREK, K. (1999): Untersuchungen zur hydraulisch wirksamen Auflockerungszone um Endlagerbereiche im Salinar in Abhängigkeit vom Hohlraumabstand und Spannungszustand. Untertägige Entsorgung, 4. Statusgespräch zu F/E-Vorhaben, 14./15. 09. 1999, S. 79 – 90, Forschungszentrum Karlsruhe, Technik und Umwelt, Wissenschaftliche Berichte FZKA-PTE, Nr. 6
- [126] STORMONT, J. C.; HOWARD, C. H.; DAEMEN, J. J. K.(1991): In situ measurements of rock permeability changes due to nearly excavation. Sandia Report Sand 90-3134, 1991, Albuquerque
- [127] BREIDUNG, K.-P. (2002): Verwahrung von Kali- und Steinsalzbergwerken einschließlich langzeitsicherer Schachtabdichtungen, Kali und Steinsalz 02/2002
- [128] KAMPSCHULTE, R., M.; LEHMANN, W.; LINK, H. (1964): Das Abteufen und Ausbauen der Gefrierschächte Wulfen 1 und Wulfen 2.- Glückauf 100, Heft 25, S. 1473 –1495, Essen 1964
- [129] DBE (2003): Messungen der Asphaltspiegelhöhen in den Schächten Gorleben 1 und 2 im Erkundungsbergwerk Gorleben; Unterlage der DBE im Auftrag des BfS, Peine 2003
- [130] DALEBOUDT, C., H.; WEEHUIZEN, J., M. (1958): Eine Schachtauskleidung aus Stahlbeton, Glückauf 94 (1958) Heft ½

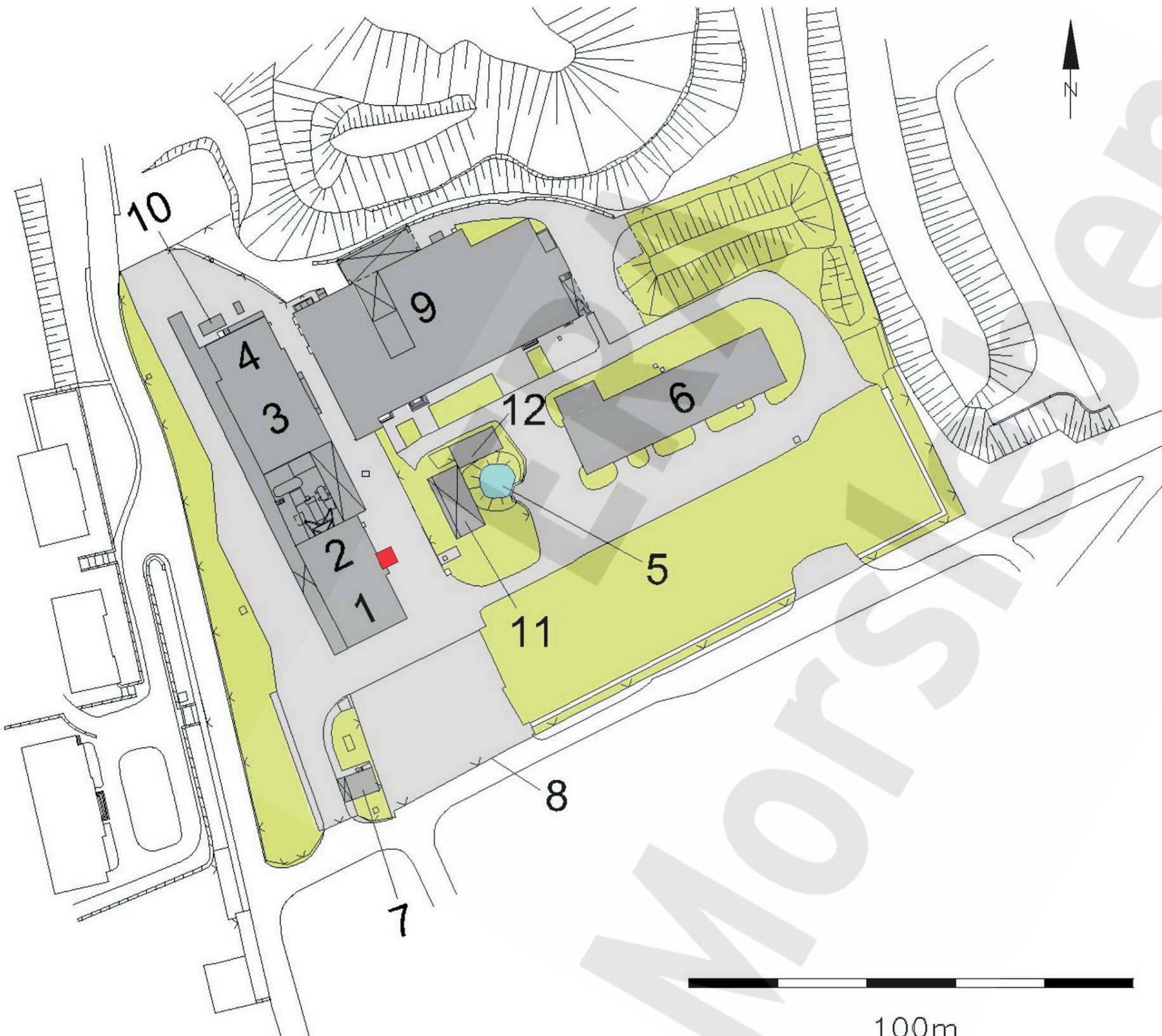
BfS	Konzeptplanung der Schachtverschlüsse für die Schächte Bartensleben und Marie des ERA Morsleben	
9M/ 223 450 11/GHS/ TF/ 0001/00	Stand: 10.03.2004	Seite 204 von 215

- [131] GROß, U.; (1999): Memorandum zur 9. Fachsitzung zu den Schächten Bartensleben und Marie am 02.02.1999; GTP; unveröffentlicht, erstellt im Auftrag des BfS



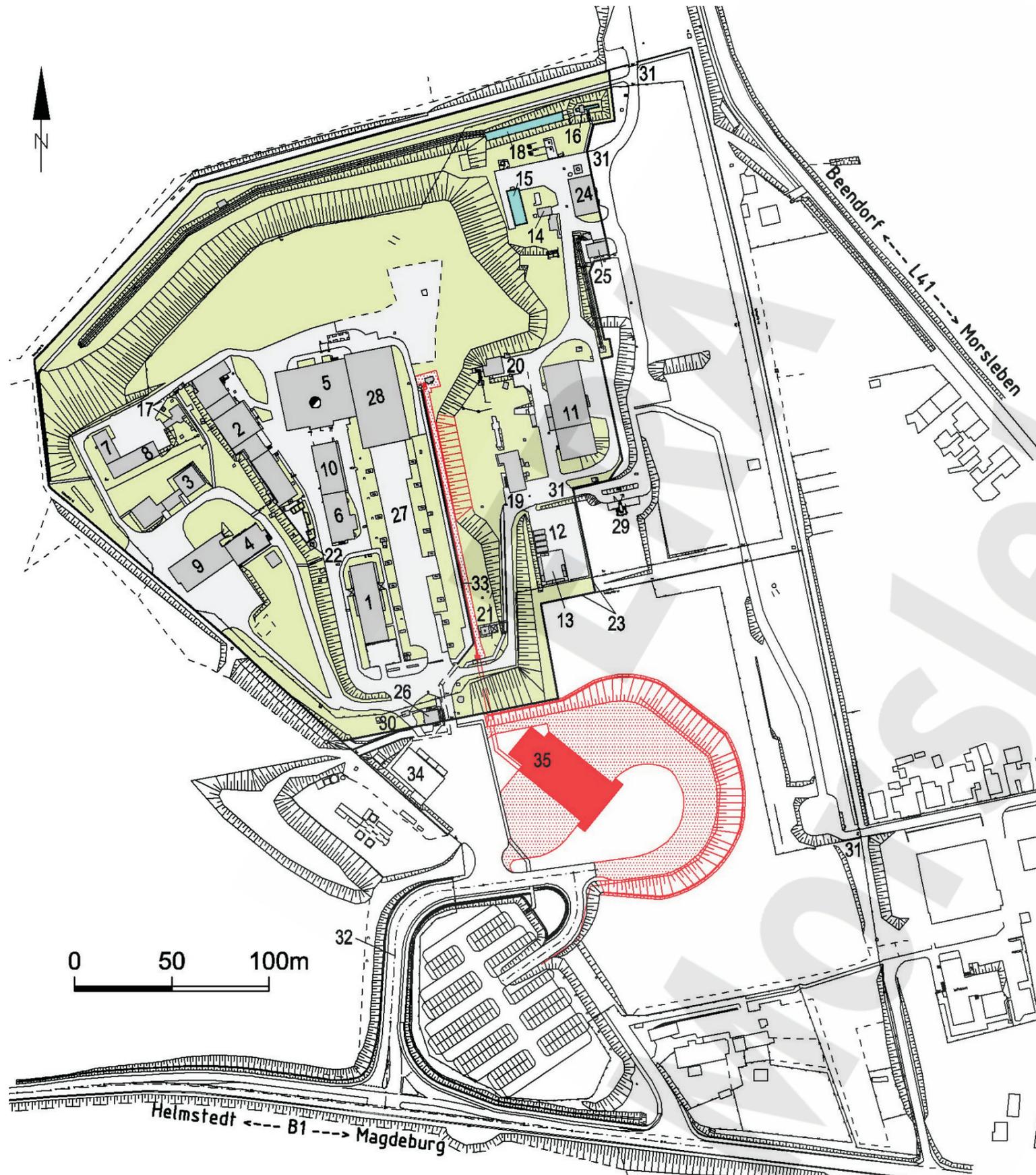
Quelle: [25]

Anlage 1					
BfS Bundesamt für Strahlenschutz					
Projekt: KPL Schachtverschlüsse ERA Morsleben					
gez.	Teichert	Name /Unterschrift	Ersteller und Zeichnungsnummer Fremd		
bearb.	Teichert				
gepr.			Projekt_Nr.:		
Maßstab:	CAD-Nr.:	Titel:			
unmaßstäblich		Verschlusskonzept WIPP-Site			
MF-Nr.:					
Blatt..... 1 von 1 Blatt					
Klassifizierung					
Projekt	PSP-Element	Obj. Kenn.	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.: Rev.
9M	223 450 11		GHS	TF	0001 00



- 1 Umladehalle
 - 2 Schachthalle mit Fördergerüst
 - 3 Fördermaschinengebäude
 - 4 Trafo-/Schaltstation
 - 5 Zisterne
 - 6 Werkstatt
 - 7 Wachhaus
 - 8 Einfriedung
 - 9 Sozialgebäude
 - 10 Wärmeversorgungsanlage
 - 11 Schuppen
 - 12 Garagen
- Bauwerke
 - Innerbetriebliche Straßen und Plätze
 - Grünflächen und sonstige nicht versiegelte Flächen
 - Wasserführende Anlagen
 - Bauwerke geplant

Anlage 2					
BfS Bundesamt für Strahlenschutz					
Projekt: KPL Schachtverschlüsse ERA Morsleben					
	Datum	Name /Unterschrift	Ersteller und Zeichnungsnummer Fremd		
gez.	Teichert				
bearb.	Teichert				
gepr.			Projekt_Nr.:		
Maßstab:	CAD-Nr.:	Titel:			
		Darstellung der geplanten übertägigen Situation der Schacht- anlage Marie			
MF-Nr.:					
Blatt... 1 ... von ... 1 ... Blatt					
Klassifizierung					
Projekt	PSP-Element	Obj. Kenn.	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.: Rev.
9M	223 450 11		GHS	TF	0001 00
					



- 1 Verwaltungs- und Sozialgebäude
- 2 Bürogebäude I (Alte Verwaltung), Notfahrtgebäude
Alte Kaue, Radiologische Messungen, Kantine
- 3 Bürogebäude (Büro- und Polizeicontainer),
Laborgebäude (Container)
- 4 Bürogebäude II (F&E)
- 5 Mehrzweckgebäude einschl. Förderturm
- 6 Mechanische Werkstatt / Elektrowerkstatt
- 7 Bauwerkstatt
- 8 Klempnerwerkstatt
- 9 Werkfeuerwehr, Kfz-Werkstatt, Waschanlage
- 10 Trafo- /Schaltstation (Umformergebäude)
- 11 Materiallager, Archiv, Materialwirtschaft
- 12 Lagerplatz
- 13 Öllager/Doppel-Fass-Freilagerregal
- 14 Anschwemmfiltergebäude
- 15 Stapelbecken für Grubenwassersammlung
- 16 Container zur Abwasserüberwachung
- 17 Wasserwerk - Pumpstation (Notwasserversorgung)
- 18 Feuerlöschteich
- 19 Ehemaliges Wachhilfsgebäude
- 20 Zuluftbauwerk für Grubenwetter
- 21 Wetterstation
- 22 Uhrengebäude
- 23 Einfriedung
- 24 Wärmeversorgungsanlage
- 25 Elektroenergieversorgung (Trafostation)
- 26 Wachgebäude
- 27 Containerfreifläche
- 28 Containerhalle
- 29 Betankungsanlage
- 30 Wachcontainer

- 31 Notzufahrten
- 32 Werkszufahrt
- 33 Rohrleitungstrasse
- 34 Salzbetonförderanlage (bGZ)
- 35 Salzbetonförderanlage

- Bauwerke vorhanden
- Innerbetriebliche Straßen u. Plätze vorh.
- Grünflächen
- Wasserführende Anlagen
- Straßen und Plätze geplant
- Bauwerke geplant

Anlage 3			
BfS Bundesamt für Strahlenschutz			
Projekt: KPL Schachtverschlüsse ERA Morsleben			
	Datum	Name /Unterschrift	Ersteller und Zeichnungsnummer Fremd
gez.	Teichert		
bearb.	Teichert		
gepr.			Projekt_Nr.:
Maßstab:	CAD-Nr.:	Titel:	
		Darstellung der geplanten übertägigen Situation der Schacht- anlage Bartensleben	
MF-Nr.:			
Blatt... 1 ... von ... 1 ... Blatt			
Klassifizierung			
Projekt	PSP-Element	Obj. Kenn.	Aufgabe UA Lfd. Nr.: Rev.
9M	223 450 11	GHS	TF 0001 00

BfS	Konzeptplanung der Schachtverschlüsse für die Schächte Marie und Bartensleben des ERA Morsleben	
9M/ 223 450 11/GHS/ RA/ 0005/00	Stand: 10.03.2004	Anlage 4, Blatt 1

TU Bergakademie Freiberg
 Institut für Bergbau
 Prof. Dr.-Ing. Peter Sitz

Freiberg, 31. Mai 2001

Aktennotiz

Schachtbefahrung ERAM Morsleben 30. Mai 01

1 Allgemeine Bemerkungen

- alle zehn Jahre Abtastprogramm, auf dessen Basis erfolgen drucklose Hohlraumverfüllungen, so dass Hohlräume hinter dem Ausbau wahrscheinlich nicht vorhanden sind
- im einziehenden Schacht Bartensleben wird im Sommer der Taupunkt unterschritten, daraus folgen nicht definierbare großflächige Feuchtstellen am Ausbau,
- in den Schächten werden ungefähr alle fünf Jahre Verkrustungen aus Salz (Stalaktiten) geraubt

2 Befahrung Schacht Marie

- vor Erreichen des Salzspiegels stehen Dogger und mächtiges Hutgestein an,
- bei 385 m künstlicher Schachtsumpf angelegt,
- bei 388,5 m kann man über vergitterte Öffnungen nach unten schauen,
- darüber befindet sich ein neuer Mauerfuß zum Abfangen des darüber liegenden Ausbaues bzw. der darüber eingebauten Bühne,
- bei 385 m wurden auf Stahlträger Dämmschichten aufgelegt, um bei der Schachtförderung von Fässern mit toxischen Materialien (Härtereisalzen), die wieder ausgelagert wurden, im Havariefall ein Aufreißen der Fässer zu verhindern,
- Schachtendteufe 522 m,

BfS	Konzeptplanung der Schachtverschlüsse für die Schächte Marie und Bartensleben des ERA Morsleben	
9M/ 223 450 11/GHS/ RA/ 0005/00	Stand: 10.03.2004	Anlage 4, Blatt 2

- ab ca. 450 m Oberfläche des Schüttkegels zu erkennen (besteht aus abgerissenem Mauerwerk und aus verstürzten alten Haufwerk bzw. Material von Schachtreparaturen), über den Zeitpunkt des Abrisses liegen keine Angaben vor,
- Schacht bis 500-m-Sohle mit Lauge gefüllt,
- Abschätzungen ergeben, dass ungefähr 20.000 bis 30.000 m³ Lauge anstehen (Wetterlaugen, Spritzwasser infolge Hühnerhaltung, Zuflüsse über Schachtmauerwerk),
- im Bereich der Pumpenkammer oberhalb der 360 m Sohle sammeln der Schachtzuflüsse, durch Flüssigkeitsverluste in den Pumpenkammern Schlottenbildungen im Salinar,
- im Schacht 5 Rohrleitungen und 6 Kabel, Seile (Telefon, Steuerung, Signale usw.),
- Ziegelmauerausbau ist in gutem bis sehr gutem Zustand (keine Druckerscheinungen durch Konvergenzen, keine Korrosion des Mauerwerks und der Mörtelfugen, vollfüge Vermörtelung der Ziegelsteine),
- 310 m (nahe Salzspiegel) ist Füllort zur sofortigen Kaligewinnung (unmittelbar nach, bzw. parallel zum Abteufen aufgefahren),
- Kaliabbau durch Korkenzieherwendel von 310 m nach oben, bei der 310 m Sohle ist auch eine vollständige Umfahrung des Schachtes erfolgt,
- mit der Korkenzieherstrecke besteht eine direkte Verbindung zwischen der Wendel und der Außenkante des Ziegelsteinmauerwerks, weiterhin ist eine Mauerwand in dieser Korkenzieherwendel gesetzt wurden (Grund dafür ist unklar),
- Druckerscheinungen sind in einem Bereich um 265 m aufgetreten, deshalb hat hier eine Ausbauankerung stattgefunden und sind 6 Konvergenzmessstellen eingebaut, in den 60er Jahren wurden als Reparaturmaßnahmen neue Mauerwerksplomben gesetzt, derzeit sind keine aktiven Druckerscheinungen mehr erkennbar, der Bereich ist ebenfalls vollkommen trocken (Gipsbereich),
- von unten bis 160 m Ausbau vollkommen trocken, ehemalige Pumpenkammer wurde bei 160 m versetzt bzw. vermauert, der Hohlraum betrug rund 90 m³,

BfS	Konzeptplanung der Schachtverschlüsse für die Schächte Marie und Bartensleben des ERA Morsleben	
9M/ 223 450 11/GHS/ RA/ 0005/00	Stand: 10.03.2004	Anlage 4, Blatt 3

- bei 130 m punktuelle Zuflüsse, die über eine Bohrung mit 10 l/min abgezogen werden, Aufschrauben und anschließende Messung mit Manometer ergibt an keiner Bohrung einen Druckanstieg, sondern es ergeben sich immer neue Austrittsstellen,
- bei 110 m „Feuchtefahne“,
- bei 80 m ist ähnlich wie bei 130 m ein punktueller über ein Bohrloch gefasster Zufluss vorhanden,
- nur bei 50 m geringe nicht definierbare Zuflüsse,
- über Wetterkanal laufen u. U. geringe Mengen Oberflächenwässer zu,
- die Gesamtzuflüsse liegen zwischen 12 und 25 l/min , prinzipiell jedoch mit abnehmender Tendenz, z.B. beträgt die alleinige Zuflussmenge über die Bohrung in 130 m Teufe 10 l/min, bis 80 m Teufe tritt ein geringerer Volumenstrom von 5 bis 7 l/min auf.

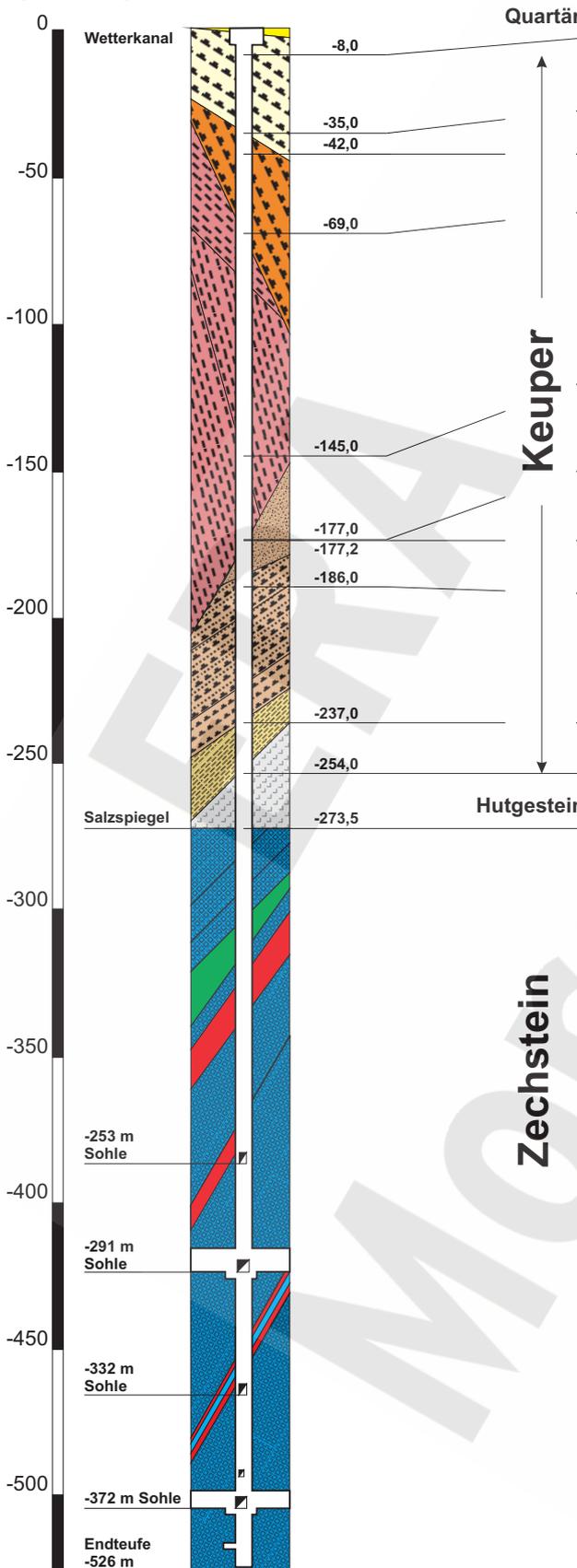
3 Befahrung Schacht Bartensleben

- einziehender Schacht, deshalb in diesem Schacht schon im oberen Bereich feuchte Stellen, die aber keine direkte Zuflussmengenmessung gestatten,
- erste feuchte Stellen bei 10 m,
- bei 45 m ebenfalls Zuflüsse, u.U. auch Kondenswässer,
- bei 80 m Wasserzutritte,
- Hauptzutrittsfläche bei 200 m,
- Schacht weitgehend feucht über den oberen Bereich bis ungefähr 180 m,
- bei 177 m konzentriert über ganzen Umfang Zuflüsse durch den Mauerwerksausbau, in diesem Bereich auch 3 Konvergenzmessstellen, keine Zerstörungen durch Konvergenz erkennbar, bei 215 m Traufenrinne, anschließend fast keine feuchte Stelle,
- ab 230 m vollkommen trocken,
- ganz geringer Zufluss nochmals bei 260 m,

BfS	Konzeptplanung der Schachtverschlüsse für die Schächte Marie und Bartensleben des ERA Morsleben	
9M/ 223 450 11/GHS/ RA/ 0005/00	Stand: 10.03.2004	Anlage 4, Blatt 4

- im Schacht weitgehend feste Verkrustungen, die bis jetzt nicht hereingewonnen wurden (Gegensatz zum Schacht Marie),
- Spannungsmesspunkt über 8,4 m lange Bohrlöcher,
- zwischen 1. und 2. Sohle Permeabilitätsmessungen im Salz durch um 120° versetzte Bohrungen,
- letzte Sohle ist die 502-m-Sohle, dann noch ein 24 m tiefer Sumpf,
- im Winter 5,8 l/min und im Sommer geringfügig über 7 l/min Zuflüsse,
- die Gesamtzuflussmengen sind bei 50 % im Vergleich zum Schacht Marie, jedoch ist der Schacht Bartensleben feuchter, weil es hier nicht möglich ist, die Zuflüsse wie im Schacht Marie punktuell zu fassen und die Feuchtigkeit vor allem im Sommer durch Taupunktunterschreitung der Wetter großflächig auftritt
- ganz geringe Konvergenzerscheinungen unterhalb der 1. Sohle in 450 - 460 m Teufe

Schacht Bartensleben
GOK +133,75 m NN



Gebirgsdurchlässigkeit k_{eff}	Gebirgsspannung vertikal (max) σ_v	Gebirgsspannung horizontal (max) σ_{H1}	Gebirgsspannung horizontal (min) σ_{Hn}	Seitendruckzahl λ
m/s	MPa	MPa	MPa	-
-	0,16 ²⁾	0,16 ²⁾	0,16 ²⁾	1 ²⁾
$3 \cdot 10^{-7,2)}$	0,77 ²⁾	1,15 ²⁾	0,92 ²⁾	1,2 ²⁾
$2 \cdot 10^{-8,2)}$	-	-	-	-
$2,2 \cdot 10^{-8,2)}$	1,6 ²⁾	2,7 ²⁾	1,9 ²⁾	1,4 ³⁾
$1 \cdot 10^{-11,1)}$	3,34 ²⁾	5,67 ²⁾	4 ²⁾	1,4 ²⁾
$1,2 \cdot 10^{-11,2)}$	4,07 ²⁾	6,92 ²⁾	4,89 ²⁾	1,4 ³⁾
$4,1 \cdot 10^{-8,2)}$	-	-	-	-
$5 \cdot 10^{-9,2)}$	4,27 ²⁾	7,27 ²⁾	5,13 ²⁾	1,3 ²⁾
$3,6 \cdot 10^{-10,2)}$	-	-	-	-
$1 \cdot 10^{-11,1)}$	5,84 ²⁾	8,18 ²⁾	7,01 ²⁾	1,2 ³⁾
$5 \cdot 10^{-13,2)}$	6,29 ²⁾	14,47 ²⁾	8,81 ²⁾	1,7 ³⁾
$2 \cdot 10^{-14,1)}$	ca. 11,8 ²⁾	-	-	-

- Quellen: ¹⁾ [49]
²⁾ [52]
³⁾ [131]

^{*} Annahme (Wert aus Messung im Schacht Marie)

Anlage 5

BfS Bundesamt für Strahlenschutz

Projekt: KPL Schachtverschlüsse ERA Morsleben

gez. Teilchert	Name / Unterschrift	Ersteller und Zeichnungsnummer Fremd
bearb. Teilchert		
gepr.		Projekt_Nr.:

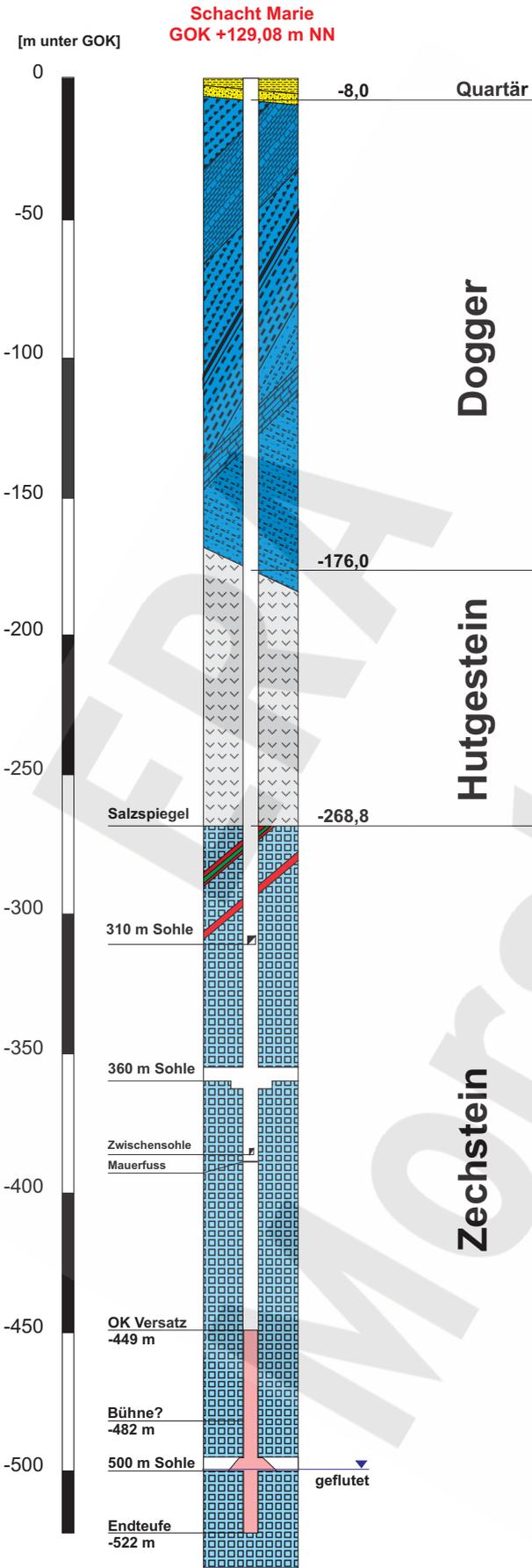
Maßstab: CAD-Nr.: Titel: Geologisches Profil des Schachtes Bartensleben

MF-Nr.: Blatt 1 von 1 Blatt

Klassifizierung

Projekt	PSP-Element	Obj. Kenn.	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.:	Rev.
9M	223 450 11		GHS	TF	0001	00

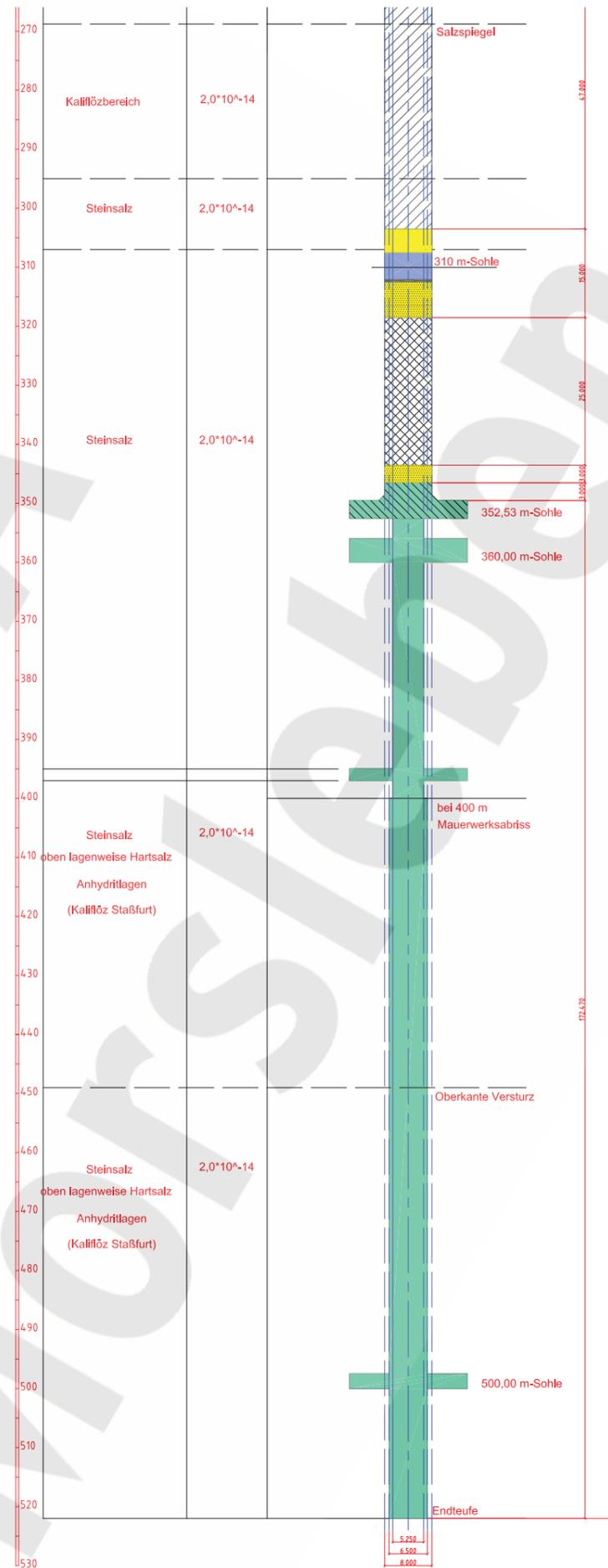
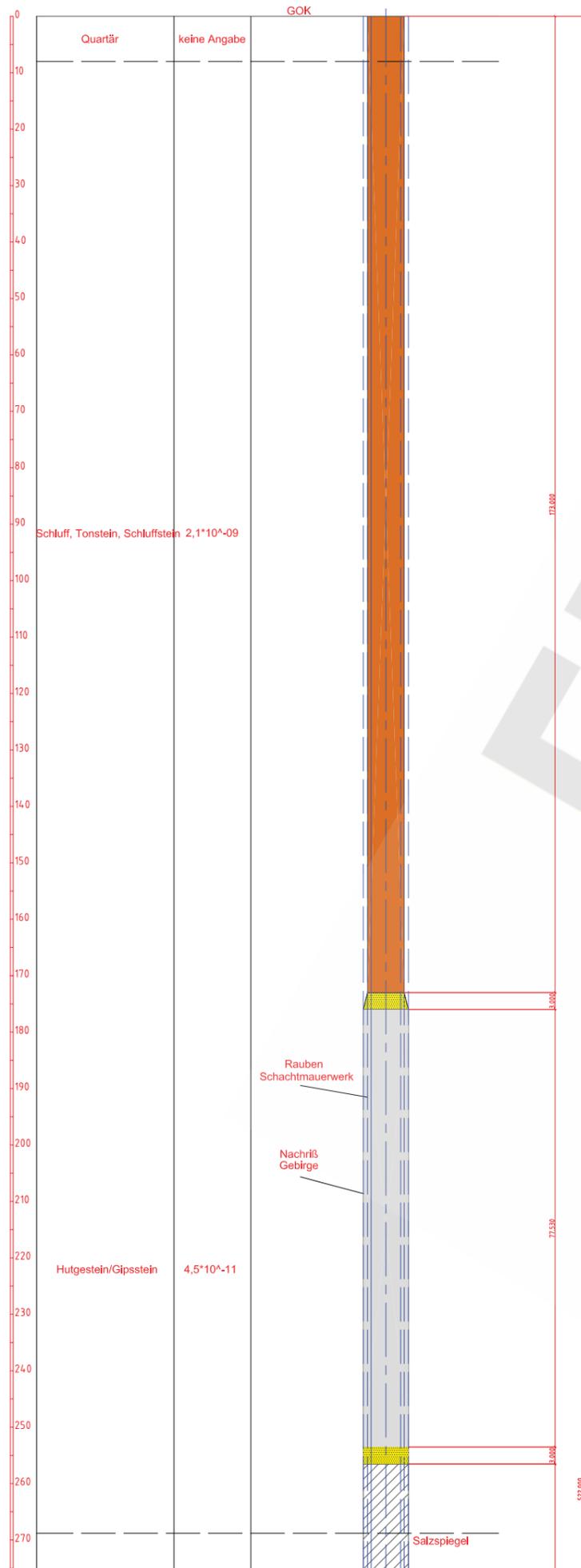
Logos: ERICOPLAN, K+S



Gebirgsdurchlässigkeit k_{eff}	Gebirgsspannung vertikal (max) σ_v	Gebirgsspannung horizontal (max) σ_{H1}	Gebirgsspannung horizontal (min) σ_{H2}	Seitendruckzahl λ
m/s	MPa	MPa	MPa	-
-	0,16 ¹⁾	0,16 ³⁾	0,16 ³⁾	1 ¹⁾
$2,1 \cdot 10^{-9,2)}$	4,2 ¹⁾	10,1 ¹⁾	6,3 ¹⁾	1,6 ³⁾
$4,5 \cdot 10^{-11,2)}$	6,5 ¹⁾	20,6 ¹⁾	11,6 ¹⁾	1,8 ³⁾
$2 \cdot 10^{-14,2)}$	12 ¹⁾	-	-	-

Quellen:
¹⁾ [131]
²⁾ [50]
³⁾ [52]

Anlage 6			
BfS Bundesamt für Strahlenschutz			
Projekt: KPL Schachtverschlüsse ERA Morsleben			
Datum	Name / Unterschrift	Ersteller und Zeichnungsnummer Fremd	
gez. Teichert			
bearb. Teichert			
gepr.		Projekt_Nr.:	
Maßstab:	CAD-Nr.:	Titel:	
		Geologisches Profil des Schachtes Marie	
MF-Nr.:			
Blatt... 1 ... von ... 1 ... Blatt			
Klassifizierung			
Projekt	PSP-Element	Obj. Kenn.	Aufgabe UA Lfd. Nr.: Rev.
9M	223 450 11	GHS	TF 0001 00



Legende

- obere Widerlagersäule, Mineralgemisch
- untere Widerlagersäule, setzungsarmer Schotter
- Dichtelement DE 1, Calcigel-Granulat
- kombiniertes Widerlager-Dichtelement DE 2, (Schotter/Asphalt) [Dichte(Asphalt) > Dichte(zufließender Deckgebirgswasser)]
- kombiniertes Widerlager-Dichtelement DE 3, (Schotter/Asphalt) [Dichte(Asphalt) < Dichte(aufsteigende Lösungen aus dem Grubengebäude)]
- Ton
- Filterschicht, Feinsand mit CaCl_2 -"Lauge" als Porenraumfüllung
- Filterschicht, Kies, Sand, Feinsand, abgestuft
- untere Widerlagersäule, Schotter mit Solezementstein
- Gussasphaltplatten

Anlage 7

BFS Bundesamt für Strahlenschutz

Projekt: KPL Schachtverschlüsse ERAM

Datum	Name/Unterschrift	Ersteller und Zeichnungsnummer	Frei
25.08.2003	Isner		
25.08.2003	Isner		
25.08.2003	Isner		

Projekt-Nr.: EGB 00-058

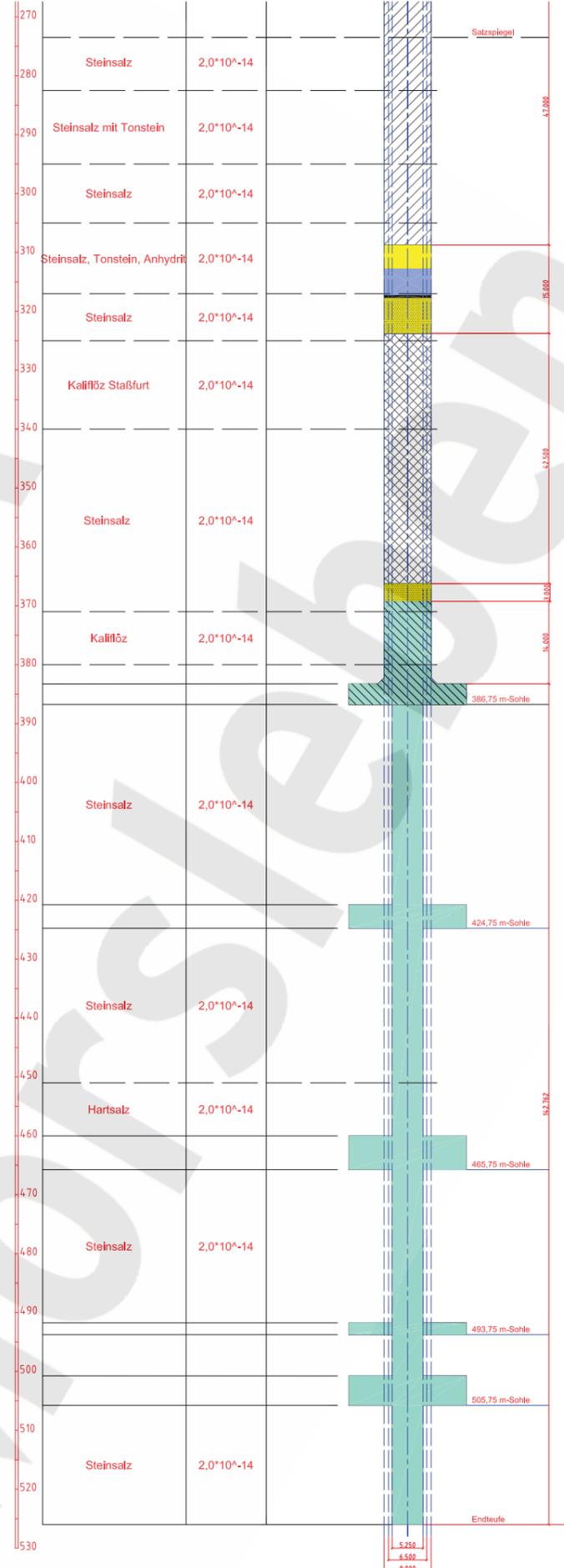
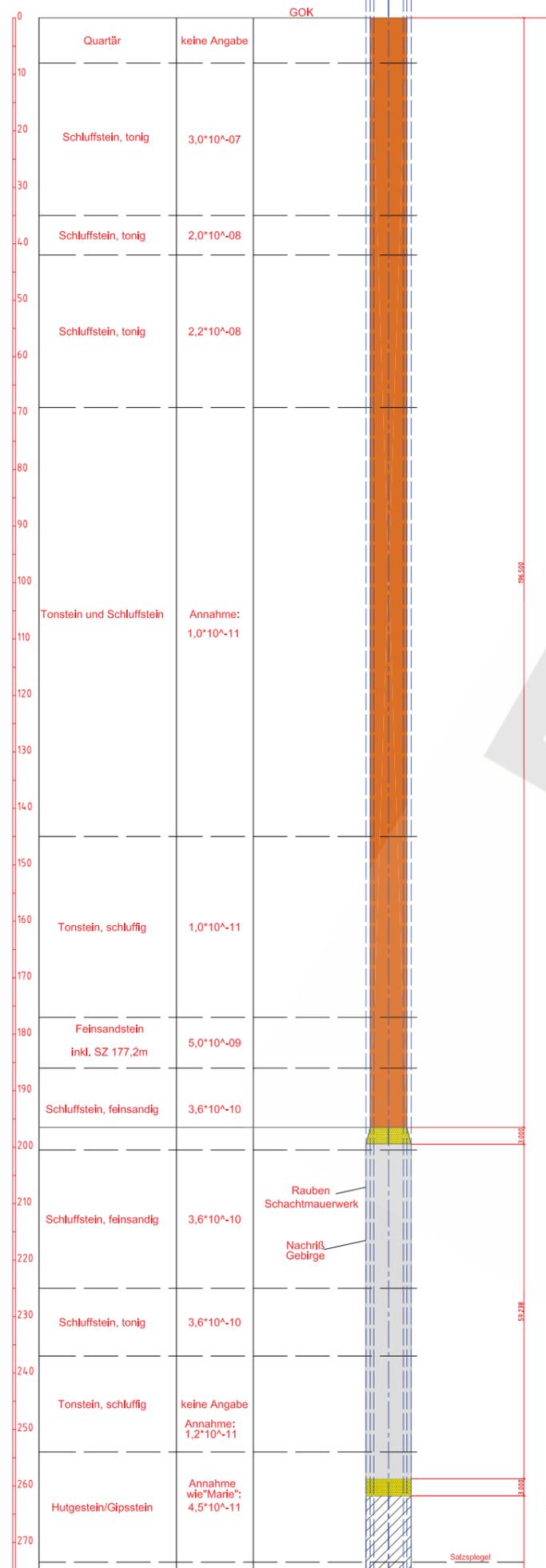
M Maßstab: 1:500

WF-Nr.: Bauwerksentwurf Schacht Marie

Blatt von Blatt:

Klassifizierung:

Projekt	PSP-Element	Obj. Kenn.	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.
SM	223 450 11		GWS	TF	0001	00



Legende

- obere Widerlagersäule, Mineralgemisch
- untere Widerlagersäule, setzungsarmer Schotter
- Dichtelement DE 1, Calcigel-Granulat
- kombiniertes Widerlager-Dichtelement DE 2 (Schotter/Asphalt) [Dichte(Asphalt) > Dichte(zufließender Deckgebirgswasser)]
- kombiniertes Widerlager-Dichtelement DE 3 (Schotter/Asphalt) [Dichte(Asphalt) < Dichte(aufsteigende Lösungen aus dem Grubengebäude)]
- Ton
- Filterschicht, Feinsand mit CaCl₂-"Lauge" als Porenraumfüllung
- Filterschicht, Kies, Sand, Feinsand, abgestuft
- untere Widerlagersäule, Schotter mit Solezementstein
- Gussasphaltplatten

Anlage 8

BFS Bundesamt für Strahlenschutz						
KPL Schachtverschlussbauwerke ERAM						
Projekt:						
Datum:	Name/Unterschrift:	Ersteller und Zeichnungsnummer: Freund				
gez.:	29.08.2003	betat				
beart.:	29.08.2003	betat				
gepr.:	29.08.2003		Projekt-Nr.:	EGB 00-058		
Maßstab:	1:500	CAD-Nr.:	Titel:			
Bauwerksentwurf Schacht Barfenleben						
Blatt von Blatt:						
Klassifizierung:						
Projekt:	PSP-Element:	Obj. Kenn.:	Aufgabe:	UA:	Lfd. Nr.:	Rev.:
01	223 450 11		GWS	TF	0001	00