

# Planfeststellungsverfahren zur Stilllegung des Endlagers für radioaktive Abfälle Morsleben

## Verfahrensunterlage

**Titel:** Gebirgsmechanische Beurteilung der Integrität der Salzbarriere im südlichen Teil des Zentralbereiches Bartensleben

**Autor:** Büttner, K.

**Erscheinungsjahr:** 2003

**Unterlagen-Nr.:** P 194

**Revision:** 00

**Unterlagenteil:**



<b>Inhaltsverzeichnis</b>	<b>Seite</b>
<b>Verkürzte Zusammenfassung</b>	<b>3</b>
<b>1 Vorgang</b>	<b>4</b>
<b>2 Zielsetzung</b>	<b>4</b>
<b>3 Geologische Verhältnisse</b>	<b>5</b>
<b>4 Gebirgsmechanische Modellierung</b>	<b>6</b>
4.1 Homogenbereiche	6
4.2 Hohlräume	7
4.3 Primärer Gebirgsspannungszustand	7
4.4 Gebirgstemperatur	8
4.5 Materialmodelle und -parameter	8
<b>5 Modellberechnungen</b>	<b>13</b>
5.1 Geometrische Idealisierung und Diskretisierung der FE-Modelle	13
5.2 Referenzmodell und Berechnungsvariante	14
<b>6 Darstellung und Bewertung der Berechnungsergebnisse</b>	<b>15</b>
6.1 Darstellung der Ergebnisse	15
6.1.1 Referenzmodell ZB-S1-01	17
6.1.2 Modellvariante ZB-S1-05 (Geringere Duktilität des Liniensalzes)	19
6.2 Bewertungskriterien	20
6.3 Bewertung der Barrierenintegrität	22
<b>7 Zusammenfassung</b>	<b>23</b>
<b>Literatur- und Unterlagenverzeichnis</b>	<b>26</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis</b>	<b>27</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>28</b>
<b>Anlagenverzeichnis</b>	<b>29</b>
<b>Anlagen</b>	

Gesamtblattzahl einschließlich Anlagen: 68

### **Verkürzte Zusammenfassung**

Autor: Dipl.-Ing. Karen Büttner

Titel: Gebirgsmechanische Beurteilung der Integrität der Salzbarriere  
im südlichen Teil des Zentralbereichs Bartensleben

Stichwörter: Dilatanz, Finite-Elemente-Berechnungen, Gebirgsmechanik,  
Integritätsnachweis, Laugendruck, Salzbarriere

Im Zuge des Erkundungs- und Beweissicherungsprogramms für das ERA Morsleben ist die Funktionsfähigkeit des Salzgebirges um die Abbaue des Zentralbereiches Bartensleben als hydraulisch dichte Barriere gegen das Eindringen von Lösungen aus dem Deckgebirge in die Abbaue zu beurteilen. Die Bewertung erfolgt auf der Grundlage eines Dilatanz- und eines Laugendruckkriteriums. Aus geomechanischer Sicht ist die hydraulische Dichtheit der Salzbarriere nachgewiesen, wenn mindestens eines dieser Integritätskriterien erfüllt ist.

Der südliche Zentralbereich der Grube Bartensleben weist einen hohen Durchbauungsgrad auf und ist durch eine hohe mechanische Beanspruchung gekennzeichnet. Auf der Grundlage des Sonderschnittes ZTS 3.1 wurden mit einem 2D-Modell Finite-Elemente-Berechnungen durchgeführt. Die Ergebnisse der Berechnungen zeigen, dass einerseits im Nahbereich der Abbaue auffahrungsbedingte dilatante Auflockerungszonen auftreten und für den Gebirgsbereich zwischen den Abbauen und den westlich angrenzenden Hauptanhydritschollen die Integritätskriterien nicht erfüllt sind. Andererseits wird für den Gebirgsbereich unterhalb des Salzspiegels für den gegenwärtigen Zeitpunkt keine Dilatanz ermittelt. Nach wenigen Jahrzehnten entsteht jedoch am Salzspiegel westlich der Hauptanhydritschollen ein dilatanter Bereich, der sich mit der Zeit vergrößert. Die mit aktuellen Kriechkennwerten für Linien-salz erzielten Berechnungsergebnisse zeigen, dass sich die dilatanten Auflockerungszonen im Vergleich zum Referenzmodell nur geringfügig verändern. Mit den Berechnungen wurden außerdem Senkungen, Senkungsraten und Neigungen an der Geländeoberkante und am Salzspiegel ermittelt. Der Grenzwert der Neigung der Geländeoberkante von 1/300 wird in den Berechnungen deutlich unterschritten.

## 1 Vorgang

Der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Hannover, ist vom Bundesamt für Strahlenschutz (BfS), Salzgitter, die Bearbeitung des Arbeitspaketes 9M 2324101100 „Integritätsnachweis Salzstockbarriere Morsleben“ übertragen worden.

## 2 Zielsetzung

Im Zuge des Erkundungs- und Beweissicherungsprogramms für das ERA Morsleben ist die Integrität der Salzstockbarriere für die Betriebs- und Nachbetriebsphase zu beurteilen und rechnerisch nachzuweisen. Dabei ist insbesondere die durch die frühere Bergbautätigkeit verursachte mechanische Gebirgsbeanspruchung zu analysieren, um ggf. daraus resultierende Anforderungen an das Verfüll- und Verschleißkonzept aufzeigen zu können.

Für den rechnerischen Nachweis der Integrität der Salzstockbarriere Bartensleben wurden bereits geomechanische Modellberechnungen zum Ostfeld, Westfeld, Südfeld und Zentralbereich durchgeführt und dokumentiert (HEUSERMANN & NIPP 2000, BÜTTNER 2002a). Für die südlichen Abbaureihen des Zentralbereichs wurden bereits Modellberechnungen durchgeführt und in einem Zwischenbericht (BÜTTNER 2002b) dokumentiert. In Ergänzung zu diesem Zwischenbericht wird im vorliegenden Ergebnisbericht der aktuelle Kriechkennwert für das Liniensalz berücksichtigt. Anhand dieser Berechnungsvariante wird die Integrität der Salzbarriere und das Tragverhalten der Schweben zwischen den Abbauen im südlichen Zentralbereich Bartensleben rechnerisch untersucht. Des Weiteren werden Senkung, Senkungsrate und Neigung an der Geländeoberkante und am Salzspiegel ermittelt. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sind in dem vorliegenden Bericht beschrieben.

Die Beeinflussung der Integrität durch geochemische Vorgänge ist nicht Gegenstand der vorliegenden Untersuchungen.

### 3 Geologische Verhältnisse

Das geologische Profil 3.1 (BEHLAU, MINGERZAHN & BORNEMANN 1997) und der Sonderschnitt ZTS 3.1 (BfS/DBE 2000) bilden die Grundlage für die gebirgsmechanische Modellierung der geologischen Schichten und für die Finite-Elemente-Berechnungen zum Zentralbereich Bartensleben. Das Profil 3.1 verläuft nahezu senkrecht zu den geologischen Großstrukturen, die in NNW-SSE-Richtung streichen und fällt auf der 2. und 4. Sohle mit der Lage der Ostquerschläge zusammen (Anlagen 3.1 und 3.2<sup>(\*)</sup>). Der Sonderschnitt ZTS 3.1 befindet sich 50 m südlich des Profils 3.1 (Anlage 3.3).

In diesem Profil 3.1 werden die Sättel aus Salinargestein der Staßfurt-Folge z2, bestehend aus Hauptsalz (z2HS), Hangendsalz mit kieseritischen Übergangsschichten (z2HG-UE) und Kaliflöz Staßfurt (z2SF), gebildet. Die Hauptmulde besteht aus Einheiten der Leine-Folge z3.

Die Salzstruktur zeigt westlich der Hauptmulde einen überkippten Bau und östlich der Hauptmulde einen aufrechten Faltenbau. Im geologischen Profil 3.1 liegt der Hauptanhydrit auf der Westflanke der Hauptmulde zerblockt vor, weil er aufgrund seiner Sprödigkeit bruchhaft auf die Faltung reagiert. Die Hauptanhydritschollen reichen lokal bis an den Salzspiegel. Die Durchtrennungszonen des Hauptanhydrits sind z.T. durch die Grubenkartierung und durch Bohrungen nachgewiesen. Diese Zonen sind mit Sekundärmineralien (Steinsalz, Carnallit, Sylvin) oder Flözmaterial besetzt.

Der Salzspiegel liegt in einer mittleren Teufe von ca. 270 m (-140 m NN) und weist westlich des überkippten Hauptanhydrits auf einer Breite von ca. 230 m eine Eintiefung von maximal ca. 40 m auf. Über dem Salzspiegel folgt das Hutgestein (cr), das über dem Zentralbereich sehr große Mächtigkeiten von bis zu 220 m erreicht. Das übrige Deckgebirge besteht aus Schichtenfolgen des mittleren Keuper (km), bereichsweise Jura (j), Oberkreide (kro) und Quartär (q).

---

(\*) Die Anlagen sind kapitelweise nummeriert. Die erste Ziffer bezieht sich auf das betreffende Hauptkapitel. Danach folgt, durch einen Punkt getrennt, die fortlaufende Anlagennummer in dem jeweiligen Hauptkapitel.

## 4 Gebirgsmechanische Modellierung

### 4.1 Homogenbereiche

Mit dem geomechanischen Modellschnitt ZB-S1 wurde ein geeigneter und ausreichend großer Gebirgsausschnitt mit den Modellabmessungen von 750 m Höhe und 850 m Breite gewählt. Die geologischen Strukturen wurden hinsichtlich ihres mechanischen Verhaltens und ihres unterschiedlichen Kriechverhaltens zu Homogenbereichen zusammengefasst. Der sich von Westen über das Abbaugelände ziehende überkippte Hauptanhydrit ist in Schollen zerlegt. Die im geologischen Profil 3.1 eingezeichneten Durchtrennungszonen wurden bei der gebirgsmechanischen Modellierung berücksichtigt. In Klammern sind nachfolgend jeweils die im Modell verwendeten Kurzbezeichnungen angegeben, die sich an die stratigraphischen Kürzel anlehnen.

Die folgenden kriechfähigen Schichten wurden im Modellschnitt ZB-S1 unterschieden (Anlage 4.1):

- Anhydritmittel- und Schwadensalz (Z3AMSS),
- Bank-/Bändersalz (Z3BKBD),
- Orange- und Bank-/Bändersalz (Z3OS-BK/BD),
- Orangesalz (Z3OS),
- Liniensalz (Z3LS),
- Carnallit (Z2SF),
- Hauptsalz, unterschieden in einen westlichen Teil (Z2HSW) und einen östlichen Teil (Z2HSO).

Als Homogenbereiche mit rein elastischen Materialeigenschaften wurden folgende Schichten berücksichtigt (Anlage 4.1):

- Quartär (Q)
- Jura-Kreide (J-KR)
- Keuper (K)
- Hutgestein (CR),
- Hauptanhydrit (Z3HA),
- Deckanhydrit, Grauer Salzton, Leine-Karbonat (DGL)

## 4.2 Hohlräume

Der gewählte Berechnungsschnitt ZTS 3.1 verläuft durch den Zentralteil Bartensleben südlich der Ostquerschläge. Neben den Abbauen der Kalilager C und D werden Steinsalzabbau der Abbaureihen 2s, 3s und 4s geschnitten. Der Zentralteil der Grube Bartensleben ist somit durch einen hohen Durchbauungsgrad gekennzeichnet. Im Zeitraum von 1918 - 1945 erfolgte im Wesentlichen die Auffahrung der Steinsalzabbau im Zentralteil.

Für die gebirgsmechanische Modellierung des Zentralteils im gewählten Modellschnitt ZB-S1 wurden nach den Anlagen 4.2 und 4.3 folgende Abbaue und Strecken berücksichtigt:

- Kaliabbau im Lager C auf der 1. Sohle, 2. Sohle (verfüllt) und 4. Sohle (verfüllt),
- Steinsalzabbau 2s auf der 1. Sohle, 2a-Sohle, 2. Sohle, 3a-Sohle und 3. Sohle,
- Steinsalzabbau 3s auf der 1. Sohle, 2a-Sohle, 2. Sohle, 3a-Sohle und 3. Sohle,
- Steinsalzabbau 4 auf der 1. Sohle,
- Steinsalzabbau 4s auf der 2a-Sohle, 2. Sohle, 3a-Sohle und 4. Sohle,
- Steinsalzabbau 1bs und 2bs auf der 4a-Sohle,
- Steinsalzabbau 1a (verfüllt), 1s (verfüllt), 2s (verfüllt) und 3s (verfüllt) auf der 4. Sohle,
- Kaliabbau im Lager D auf der 1. Sohle (verfüllt), 2. Sohle (verfüllt) und 4. Sohle (verfüllt).

Lage und Geometrie der Abbaue wurden auf der Grundlage des bergmännischen Risswerks und spezieller Scanneraufnahmen des Bergwerksbetreibers, der Deutschen Gesellschaft zum Bau und Betrieb von Endlagern für Abfallstoffe mbH (DBE), festgelegt (BfS/DBE 2000). Dabei wurden vereinfachend die geometrischen Abmessungen direkt aus dem geologischen Sonderschnitt ZTS 3.1 (Anlage 3.3) entnommen. Dieses Vorgehen ist konservativ bezüglich der berechneten Schwebenbeanspruchungen, da Breite, Höhe und Kontur der Abbaue über ihre Länge im allgemeinen veränderlich sind und sich in der Realität dadurch günstigere Schwebenabmessungen ergeben.

## 4.3 Primärer Gebirgsspannungszustand

Als primärer Gebirgsspannungszustand wird ein mit der Teufe linear zunehmender isotroper lithostatischer Gebirgsdruck angenommen. Dabei wird sowohl für das Salzgebirge wie auch für das Deckgebirge eine Dichte von  $2,2 \text{ kg/dm}^3$  gewählt.

#### 4.4 Gebirgstemperatur

Die Gebirgstemperatur wird in Abhängigkeit von der Teufe festgelegt. Dabei wird der für Salzgebirge gültige Temperaturgradient (2 K/100 m) auch für das Deckgebirge gewählt. Die Temperatur am oberen Rand des gebirgsmechanischen Modells beträgt 288,2 K.

#### 4.5 Materialmodelle und -parameter

Das geomechanische Verhalten der kriechfähigen Salzgesteine wird durch ein Stoffgesetz modelliert, das neben den elastischen Formänderungen auch stationäres Kriechen erfasst. Eine Berücksichtigung der Auflockerung infolge Dilatanz erfolgt mittels viskoplastischer Formänderungen. Diese drei Anteile werden additiv zur Gesamtverzerrungsrate  $\dot{\varepsilon}_{ij}$  zusammengefasst:

$$\dot{\varepsilon}_{ij} = \dot{\varepsilon}_{ij}^{el} + \dot{\varepsilon}_{ij}^{cr} + \dot{\varepsilon}_{ij}^{vp} \quad (1)$$

Darin bedeuten:

- $\dot{\varepsilon}_{ij}^{el}$  = elastische Verzerrungsrate (1/d),
- $\dot{\varepsilon}_{ij}^{cr}$  = stationäre Kriechrate (1/d),
- $\dot{\varepsilon}_{ij}^{vp}$  = viskoplastische Verzerrungsrate (1/d).

#### Elastische Formänderungen

Die elastische Verzerrungsrate ist bestimmt durch das erweiterte Hookesche Gesetz:

$$\dot{\varepsilon}_{ij}^{el} = \frac{1+\nu}{E} \cdot \dot{\sigma}_{ij} - \frac{\nu}{E} \cdot \dot{\sigma}_{kk} \delta_{ij} \quad (2)$$

mit

- $\sigma_{ij}$  = Komponenten des Spannungstensors (MPa),
- $\sigma_{kk}$  = Spur des Spannungstensors (MPa),
- $\delta_{ij}$  = Kroneckersymbol (-)

und den Materialkonstanten



- E = Elastizitätsmodul (MPa),  
 ν = Querdehnungszahl (-).

Die in den Berechnungen verwendeten Werte für die elastischen Materialkonstanten sind der Tabelle 4.1 zu entnehmen. Da der Hauptanhydrit als kompaktes homogenes Gestein modelliert wird, jedoch tatsächlich bereichsweise geklüftet ist, kann nur ein erheblich reduzierter Wert der an ungeklüfteten Gesteinsproben im Labor ermittelten Steifigkeit das geomechanische Verhalten des Hauptanhydrits wiedergeben. Daher wird konservativ die experimentell für den Nachbruchbereich ermittelte Steifigkeit von Hauptanhydrit verwendet. Die Materialdaten für das Hutgestein wurden ebenfalls im Labor ermittelt.

Tab. 4.1: Elastische Kennwerte der geologischen Schichten

Geologische Einheit	stratigraph. Bezeichnung	Kurzbezeichnung im Modell	E-Modul (MPa)	Querdehnungszahl (-)
Quartär	q	Q	100	0,33
Jura-Kreide	j-kr	J-KR	2000	0,27
Keuper	k	K	2000	0,27
Hutgestein	cr	CR	10000	0,27
Hauptanhydrit	z3HA	Z3HA	30000	0,27
Deckanhydrit, Grauer Salzton, Leine-Karbonat	DGL	DGL	15000	0,27
alle kriechfähigen Salze	z2, z3	(div.)	25000	0,27

#### Formänderungen infolge stationären Kriechens

Die stationäre Kriechrate ergibt sich in eindimensionaler Schreibweise nach folgender Beziehung:

$$\dot{\epsilon}_{\text{eff}}^{\text{cr}} = A_{\text{cr}} \cdot e^{-\frac{Q}{RT}} \cdot \left( \frac{\sigma_{\text{eff}}}{\sigma^*} \right)^n \quad (3)$$

mit

- R = universelle Gaskonstante ( $8,3143 \cdot 10^{-3}$  kJ/mol/K),  
 T = Temperatur (K),  
 $\sigma_{\text{eff}}$  = Effektivspannung (MPa),  
 $\sigma^*$  = Normierungsspannung (1,0 MPa)

und den Materialkonstanten

- $A_{cr}$  = Strukturfaktor (1/d),  
 $n$  = Spannungsexponent (-),  
 $Q$  = Aktivierungsenergie (54,0 kJ/mol).

In der dreidimensionalen Verallgemeinerung ist die Richtung des stationären Kriechtensors mit der des Spannungsdeviators  $s_{ij}$  identisch:

$$\dot{\epsilon}_{ij}^{cr} = \frac{3}{2} \cdot \frac{s_{ij}}{\sigma_{eff}} \cdot \dot{\epsilon}_{eff}^{cr} \quad (4)$$

Die hier behandelten Salzgesteine weisen für den Spannungsexponenten  $n$  annähernd den gleichen Wert  $n = 5$  auf und unterscheiden sich im Wesentlichen nur durch den Strukturfaktor  $A_{cr}$ . Daher kann ihre Duktilität durch die dimensionslose relative Kriechfähigkeit  $A^*$ , bezogen auf den Referenzwert  $A_0 = 0,18$  1/d, angegeben werden:

$$A_{cr} = A^* \cdot A_0 \quad (5)$$

Stratigraphische Einheiten mit gleichem mechanischen Materialverhalten sind zu Homogenbereichen zusammengefasst (PLISCHKE & SCHULZE 2002). Die in Laboruntersuchungen für die Salze der einzelnen Homogenbereiche ermittelten Werte für  $A^*$  sind in der Tabelle 4.2 zusammengestellt.

Tab. 4.2: Relative Kriechfähigkeit  $A^*$  der modellierten Homogenbereiche

Homogenbereich	stratigraph. Bezeichnung	Kurzbezeichnung im Modell	$A^*$ (bisher)	Bandbreite von $A^*$ (bisher)	$A^*$ (neu)	Bandbreite von $A^*$ (neu)
Anhydritmittel- und Schwadensalz	z3AM-SS	Z3AMSS	1/32	1/64 - 1/32	1/32	1/64 - 1/16
Bank-/Bändersalz	z3BK/BD	Z3BKBD	1/16	1/32 - 1/4	1/16	1/32 - 1/4
Orange- und Bank-/Bändersalz	z3OS-BK/BD	Z3OSBKBD	1/8	1/64 - 1/2	1/8	1/16 - 2
Orangesalz	z3OS	Z3OS	1/16	1/32 - 1/4	1/16	1/32 - 1/4
Liniensalz	z3LS	Z3LS	1	1/4 - 1	1/8	1/8 - 1/2
Carnallit	z3SF	Z3SF	10	1 - 100	10	1 - 100
Hauptsalz	z2HS(West)	Z2HSW	1/16	1/32 - 1/4	1/16	1/32 - 1/4
Hauptsalz	z2HS(Ost)	Z2HSO	1/2	1/4 - 2	1/2	1/4 - 2

### Dilatante Formänderungen

Für die dilatante Formänderung von Salzgestein wird ein viskoplastisches Materialmodell verwendet. Viskoplastisches Fließen setzt oberhalb einer Fließgrenze  $F$  ein, die durch ein modifiziertes Drucker-Prager-Fließkriterium beschrieben wird. Die Anpassung erfolgt mit den Parametern  $\alpha$  und  $k$ :

$$F = \alpha \cdot J_1 + \sqrt{J_2^D} - k \quad (6)$$

mit  $J_1$  = 1. Invariante des Spannungstensors (MPa),  
 $J_2^D$  = 2. Invariante des Spannungsdeviators (MPa<sup>2</sup>),  
 $\alpha$  = fiktiver Reibungswinkel (-),  
 $k$  = fiktive Kohäsion (MPa).

Für die viskoplastische Verzerrung wird eine assoziierte Fließregel verwendet:

$$\dot{\varepsilon}_{ij}^{vp} = \frac{1}{\eta} \cdot \langle F \rangle \cdot \frac{\partial \tilde{Q}}{\partial \sigma_{ij}}; \quad (\tilde{Q} = F) \quad (7)$$

mit  $\eta$  = Viskosität (MPa·d),  
 $\tilde{Q}$  = Spannungspotential (MPa),  
 $\langle F \rangle = \begin{cases} 0, & \text{wenn } F < 0 \\ F, & \text{wenn } F \geq 0 \end{cases}$  (MPa).

Für die Berechnungen wird als Fließgrenze eine Funktion verwendet, die die Dilatanzgrenze nach CRISTESCU & HUNSCHE (1998) annähert. Für die Fließgrenze werden folgende Parameter verwendet:

$$\alpha = \frac{1}{2\sqrt{3}} \approx 0,2887,$$

$$k = 0,0.$$

Das verwendete viskoplastische Modell ermöglicht die Berücksichtigung des oberhalb der Dilatanzgrenze auftretenden dilatanten Materialverhaltens. Die damit verbundene zusätzliche Verzerrung führt zu Spannungsumlagerungen, so dass sich Deviatorspannungen über der Dilatanzgrenze abbauen. Nach entsprechend langer Zeit liegen die Spannungszustände aller Materialpunkte nahezu auf bzw. unterhalb der Dilatanzgrenze. Der Bereich, in dem die Spannungszustände im Verlauf der Berechnung einmal die Dilatanzgrenze erreicht oder ü-

berschritten haben, wird hier als Auflockerungszone oder dilatanter Bereich bezeichnet. Die langfristige Beanspruchung des Materials wird dadurch auf den Bereich unterhalb der Dilatanzgrenze begrenzt und so im Sinne einer konservativen Aussage die maximal mögliche Größe der Auflockerungszone bestimmt. Um eine möglichst schnelle Umlagerung von Spannungen oberhalb der Dilatanzgrenze zu bewirken, wird die Viskosität im viskoplastischen Modell so gewählt, dass zum betrachteten Zeitpunkt der Auswertung die Spannungszustände aller Materialpunkte nahezu auf oder unterhalb der Dilatanzgrenze liegen.

#### Materialverhalten von Versatz

Das Verfüllmaterial (Altversatz) im Kalilager C auf der 2. und 4. Sohle, im Kalilager D auf der 1., 2. und 4. Sohle und in den Abbauen 1a, 1s, 2s und 3s auf der 4. Sohle wird vereinfachend als elastisches Material angenommen. Konservativ wird für den Versatz als Basisparameter ein niedriger Elastizitätsmodul von  $E = 17,5 \text{ MPa}$  gewählt; die Querdehnungszahl wird mit  $\nu = 0,45$  und die Dichte mit  $\rho = 1,5 \text{ kg/dm}^3$  angenommen. Aus diesen Werten resultiert ein Kompressionsmodul von  $K = 58,3 \text{ MPa}$ .

## 5 Modellberechnungen

### 5.1 Geometrische Idealisierung und Diskretisierung der FE-Modelle

Die ausgeprägte NNW-SSE-Richtung der geologischen Struktur und die ebenso ausgerichteten Abbaureihen ermöglichen eine geometrische Idealisierung als zweidimensionales Modell. Das hier gewählte Berechnungsmodell ZB-S1 (siehe Kapitel 5.2) schneidet den Zentralbereich 50 m südlich vom Profilschnitt 3.1. Neben den Abbauen der Kalilager C und D werden Steinsalzabbau der Abbaureihen 2s, 3s und 4s geschnitten.

Das Modell ZB-S1 hat die Modellabmessungen von 750 m Höhe und 850 m Breite. Die geologischen Schichtgrenzen und die Konturen der Abbaue wurden vom Sonderschnitt-riss ZTS 3.1 übernommen und ggf. angepasst. Aus der Lage und der Kontur übereinanderliegender Abbaue resultiert die geometrische Konfiguration der Schweben.

Der obere Rand der Berechnungsmodelle entspricht der Geländeoberkante (GOK), d.h. ca. + 130 m NN. Der untere Rand der Modelle liegt bei 750 m unter der GOK und somit ca. 250 m unterhalb der am tiefsten gelegenen Steinsalzabbau auf der 4. Sohle. Damit können Einflüsse aus den Modellrandbedingungen auf die Berechnungsergebnisse für den betrachteten Zeitraum von 165 Jahren ausgeschlossen werden.

Der rechte Modellrand befindet sich in dem nach Osten an die Hauptmulde angrenzenden Ostsattel, der aus Hauptsalz z2HS besteht, d.h. ca. 250 m östlich vom Kalilager D entfernt. Der linke Modellrand liegt mehr als 200 m westlich vom Kalilager C.

Die Diskretisierung des FE-Modells ZB-S1 ist den Anlagen 5.1 und 5.2 zu entnehmen. Das Modell umfasst 30675 Knoten und 10178 isoparametrische 8-Knoten-Elemente. Nach Ausbruch der Hohlräume verbleiben 8274 Elemente mit 25820 Knoten. Die Knoten des linken und rechten Modellrandes sind vertikal verschieblich gelagert und in horizontaler Richtung elastisch gebettet. Die seitliche Bettung wird durch jeweils 50 m breite isoparametrische 8-Knoten-Elemente entlang der beiden Ränder simuliert, bei deren Auslegung von einem 650 m breiten elastischen Gebirge mit einem Elastizitätsmodul von  $E = 25000$  MPa und einer Querdehnungszahl von  $\nu = 0,27$  ausgegangen wird. Damit ergibt sich in den Randelementen mit der Annahme eines ebenen Verzerrungszustandes ein Elastizitätsmodul von 2075 MPa. Die Querdehnungszahl wird in diesen Elementen zu  $\nu = 0$  angenommen. Die Knoten des unteren Modellrandes sind horizontal verschieblich gelagert und in vertikaler Richtung fixiert.

In den Berechnungsmodellen wurde der mittlere Auffahrzeitpunkt der Abbaue für das Jahr 1937 festgelegt. Damit ergibt sich rechnerisch eine heutige Standzeit von 65 Jahren. Insgesamt wurde ein Berechnungszeitraum von 165 Jahren betrachtet. Das Ende der Modellberechnungen entspricht somit dem Jahr 2102.

Die Abbaue im Kalilager C auf der 2. und 4. Sohle, im Kalilager D auf der 1., 2. und 4. Sohle und die Abbaue 1a, 1s, 2s und 3s auf der 4. Sohle sind bereits seit mehreren Jahrzehnten wieder verfüllt. Im Berechnungsmodell wurde diese Verfüllung berücksichtigt, und der Versatz wurde unmittelbar nach der Auffahrung der Abbaue in einem Schritt und spannungslos mit einer Steifigkeit von  $E = 17,5 \text{ MPa}$  eingebracht.

## 5.2 Referenzmodell und Berechnungsvariante

Folgende Modellberechnungen wurden untersucht:

ZB-S1-01: Dieses Modell ist das Referenzmodell in der Berechnungsebene ZB-S1. Die Beurteilung der Schwebenbeanspruchungen und der Integrität der Salzbarriere erfolgt auf der Grundlage dieses Referenzmodells.

ZB-S1-05: In dieser Berechnungsvariante wurde für den Homogenbereich Z3LS aufgrund des aktuellen Kenntnisstandes eine gegenüber dem Referenzmodell ZB-S1-01 geringere Duktilität angenommen. Dazu wurde die relative Kriechfähigkeit von  $A^* = 1$  auf den Wert  $A^* = 1/8$  verringert (Tabelle 4.2).

## 6 Darstellung und Bewertung der Berechnungsergebnisse

### 6.1 Darstellung der Ergebnisse

Die für die Bewertung der Salzbarriere im Grubengebäude Bartensleben wesentlichen Ergebnisse der Modellberechnung sind im Anlagenteil dargestellt und werden nachfolgend beschrieben.

Die gebirgsmechanischen Berechnungen wurden mit dem FE-Programmsystem ANSALT I (NIPP 1991) durchgeführt. Auswertung und Darstellung der Ergebnisse erfolgten mit dem Programmsystem INCA (NIPP, MÜLLER & STECHER 1994). Positive Spannungswerte sind Zugspannungen, negative Werte stellen Druckspannungen dar. Die Hauptspannung  $S_1$  stellt entweder die betragsmäßig kleinste Hauptdruckspannung oder die größte Zugspannung dar. Die Hauptspannung  $S_2$  entspricht der betragsmäßig größten Hauptdruckspannung. Die Einheit für die Spannungen ist MPa, die Verzerrungen sind dimensionslos.

In den nachfolgenden zwei Tabellen sind die in den Berechnungen ermittelten maximalen Senkungen und Senkungsraten an der GOK und am Salzspiegel für ausgewählte Punkte zusammengefasst.

Tab. 6.1: Senkungen an der Geländeoberkante und am Salzspiegel [cm]

Berechnungs-varianten	heute		in 50 Jahren		in 100 Jahren	
	GOK	Salzspiegel	GOK	Salzspiegel	GOK	Salzspiegel
ZB-S1-01	33,17	40,85	42,47	50,84	50,00	58,84
ZB-S1-05	31,41	38,77	40,01	47,99	46,98	55,39

Tab. 6.2: Senkungsraten an der Geländeoberkante und am Salzspiegel [mm/Jahr]

Berechnungs-varianten	momentaner Zeitpunkt		zum Ende der Berechnungszeit	
	GOK	Salzspiegel	GOK	Salzspiegel
ZB-S1-01	2,20	2,36	1,40	1,45
ZB-S1-05	2,00	2,20	1,25	1,35

Für die Berechnungsmodelle ZB-S1-01 und ZB-S1-05 sind exemplarisch folgende Ergebnisse dargestellt:

- Verformte Modellstruktur (Modellausschnitt) für ZB-S1-01 nach 65 Jahren,
- Verschiebungsvektoren (Modellausschnitt) für ZB-S1-01 nach 65 Jahren,
- Hauptspannungen  $S_1$  als Isoflächenplots (Modellausschnitt)
  - für ZB-S1-01 nach 65 und 165 Jahren,
  - ZB-S1-05 nach 165 Jahren.
- Zugspannungen als Isoflächenplots (Modellausschnitt)
  - für ZB-S1-01 nach 65 und 165 Jahren,
  - ZB-S1-05 nach 165 Jahren.
- Hauptspannungen  $S_2$  als Isoflächenplots (Modellausschnitt)
  - für ZB-S1-01 nach 65 und 165 Jahren,
  - ZB-S1-05 nach 165 Jahren.
- Effektivspannungen als Isoflächenplots (Modellausschnitt)
  - für ZB-S1-01 nach 65 und 165 Jahren,
  - ZB-S1-05 nach 165 Jahren.
- Effektivverzerrungen als Isoflächenplots (Modellausschnitt)
  - für ZB-S1-01 nach 65 und 165 Jahren,
  - ZB-S1-05 nach 165 Jahren.
- Dilatante Salzgebirgsbereiche als Isoflächenplots (Gesamtmodell)
  - für ZB-S1-01 nach 65 und 165 Jahren,
  - ZB-S1-05 nach 165 Jahren.
- Differenz zwischen dem hydrostatischen Druck einer fiktiven, von der entsprechenden Teufe bis zur GOK reichenden Laugensäule mit einer Dichte von  $\rho = 1,1 \text{ kg/dm}^3$  und der kleinsten Hauptdruckspannung  $S_1$  als Isoflächenplots (Gesamtmodell)
  - für ZB-S1-01 nach 65 und 165 Jahren,
  - ZB-S1-05 nach 165 Jahren.
- Senkung der Geländeoberkante (x-y-Diagramm) für beide Berechnungsfälle.
- Senkung am Salzspiegel (x-y-Diagramm) für beide Berechnungsfälle.
- Neigung der Geländeoberkante (x-y-Diagramm) für beide Berechnungsfälle.



### 6.1.1 Referenzmodell ZB-S1-01

In den Anlagen 6.1 und 6.2 sind die verformte Struktur und die Verschiebungsvektoren im Zentralbereich, Abbaureihen 2s, 3s und 4s, zum Zeitpunkt 65 Jahre dargestellt. Es zeigt sich, dass die Hohlraumkonvergenz in der Abbaureihe 4s wesentlich größer ist als in den westlich gelegenen Abbaureihen 2s und 3s. Des Weiteren treten an den westlichen Stößen und in den Firsten der Abbaureihen 2s und 3s deutlich größere Verformungen auf als an den östlichen Stößen und in den Sohlen. Die großräumigen Verschiebungen verlaufen von Westen nach Osten auf die Hohlräume, wobei die Verschiebungsbeträge über den Abbaureihen 2s und 3s bis hin zur Abbaureihe 4s am größten sind. Dies führt dazu, dass die Schweben in der Abbaureihe 4s deutlich höher beansprucht werden.

In den Anlagen 6.3 bis 6.8 sind die Hauptspannungen  $S_1$  und  $S_2$  zum Zeitpunkt 65 und 165 Jahre nach der Hohlraumerstellung dargestellt, wobei die Anlagen 6.5 und 6.6 nur die Zugspannungen zeigen. Aus der Verteilung der Hauptspannungen  $S_1$  geht hervor, dass das Gebirge im Zentralbereich entlastet wird. Die Spannungsbeträge liegen deutlich unter dem Teufendruck. Bereichsweise, z.B. an der Hohlraumkontur, in den Schweben oder an der Grenze von Schichten mit unterschiedlichen Verformungsverhalten, werden Zugspannungen in der Größenordnung 0,25 - 1,00 MPa ermittelt. Oberhalb des Salzspiegels, im Hutgestein, treten im Verlauf der Berechnungszeit Zugspannungen in der Größenordnung zwischen 0,25 - 1,50 MPa auf (Anlage 6.4 und 6.6). Des Weiteren werden auch an der mittleren Hauptanhydritscholle in Höhe der 1. Sohle und der 2a-Sohle Zugspannungen mit Werten bis maximal 5,30 MPa berechnet. Die Hauptspannungen  $S_2$  zeigen im Zentralbereich ebenfalls ein geringeres, unter dem Teufendruck liegendes Niveau. Der westlich angrenzende Hauptanhydrit weist sehr hohe Hauptspannungen  $S_2$  auf.

Die in den Anlagen 6.9 und 6.10 dargestellte Verteilung der Effektivspannungen zum Zeitpunkt 65 und 165 Jahre zeigt, dass höhere Spannungsbeträge in den Schweben der Abbaureihe 4s und an Schichtgrenzen sowie die höchsten Spannungsbeträge in den westlich an den Zentralbereich angrenzenden Hauptanhydritschollen auftreten. Die wesentlichen Spannungsumlagerungen sind bis zum heutigen Zeitpunkt bereits eingetreten. Zukünftig sind nur noch geringe Spannungsumlagerungen zu erwarten. Daher kann die derzeitige Spannungsverteilung im Zentralbereich, Abbaureihen 2s, 3s und 4s, als weitgehend stationär angesehen werden.

In den Anlagen 6.11 und 6.12 sind die Effektivverzerrungen zu den Zeitpunkten 65 und 165 Jahre nach Hohlraumerstellung dargestellt. Erwartungsgemäß treten die größten Verzerrungsbeträge im Bereich der Schweben auf. Die Zone der größten Effektivverzerrungen ist

dabei in allen Schweben dadurch charakterisiert, dass sie am westlichen Stoß beginnt und als „Scherband“ diagonal durch die Schweben zum östlichen Stoß des darunterliegenden Abbaues verläuft. Weiterhin ist zu erkennen, dass die Schweben in der Abbaureihe 4s zum heutigen Zeitpunkt deutlich höher beansprucht sind als die Schweben in den Abbaureihen 2s und 3s (Tabelle 6.1). Auch im Bereich der Abbaue des Kalilagers C treten höhere Verzerrungen auf. Die Verzerrungen werden insbesondere in den Schweben weiter zunehmen.

Die für 65 und 165 Jahre berechneten dilatanten Bereiche im Salzgebirge sind in den Anlagen 6.13 und 6.14 dargestellt. Die durch Hohlraumauffahrung bedingte gebirgsmechanische Beanspruchung führt im Nahbereich der Abbaue zu dilatanten Auflockerungszonen. Sie reichen stellenweise bis an die westlich angrenzenden Hauptanhydritschollen. Die Schweben zwischen den Abbauen sind nahezu durchgängig dilatant. An der oberen Hauptanhydritscholle und im Bereich der zwei Abbaue des Kalilagers C treten dilatante Zonen auf, die sich im Verlaufe der Zeit weiter ausbreiten. Zum Ende der Berechnungszeit, nach 165 Jahren, entsteht auch am Salzspiegel ein kleiner dilatanter Bereich (Anlage 6.14).

Die Anlagen 6.15 und 6.16 zeigen die für eine Standzeit von 65 und 165 Jahren berechnete Differenz zwischen dem in der jeweiligen Teufe theoretisch möglichen Laugendruck und der kleinsten Hauptdruckspannung  $S_1$  im Salzgebirge. Bedingt durch den Hohlraumausbruch tritt eine deutliche Abnahme der kleinsten Hauptdruckspannung insbesondere im Bereich der Abbaue und in der Salzbarriere zwischen den oberen Hauptanhydritschollen und dem Salzspiegel auf. Im Nahbereich der Abbaue liegt sie um mehr als 4 MPa unterhalb des Laugendrucks. Mit zunehmendem Abstand von den Abbauen wird diese Differenz geringer. Gelb bis rot eingefärbt sind die hypothetisch laugendruckgefährdeten Bereiche, die weiträumig bis an die Hauptanhydritschollen sowie westlich und auch östlich oberhalb der oberen Hauptanhydritschollen bis an den Salzspiegel heranreichen. Der Vergleich der nach 65 Jahren und nach 165 Jahren auftretenden hypothetisch laugendruckgefährdeten Bereiche zeigt, dass sich nur noch geringfügige Änderungen ergeben.

Die Senkung der Geländeoberkante zu den Zeitpunkten 65, 115 und 165 Jahren ist in der Anlage 6.17 dargestellt. Die x-Achse (x-Koordinate) entspricht dem oberen Modellrand und somit der Geländeoberkante, die y-Achse zeigt die Senkung in Metern. Die Senkungsmulde hat ca. 410 m vom linken Modellrand entfernt ein Senkungsmaximum von ca. 0,50 m zum Zeitpunkt 165 Jahre. Die Senkungsmulde am Salzspiegel zu den Zeitpunkten 65, 115 und 165 Jahren ist in der Anlage 6.18 dargestellt. Dabei wurde der mittlere Bereich, in dem die DGL-Schicht und die obere Hauptanhydritscholle an den Salzspiegel treffen, nicht beachtet (Unterbrechung der Kurven). Die Senkungsmulde erreicht ca. 380 m vom linken Modellrand entfernt, über den Abbaureihen 2s und 3s, den maximalen Senkungswert von ca. 0,58 m

zum Zeitpunkt 165 Jahre. Für die momentane Senkungsrate werden an der Geländeoberkante 2,20 mm/Jahr und am Salzspiegel 2,32 mm/Jahr berechnet.

In der Anlage 6.19 ist die Neigung der Geländeoberkante zu den Zeitpunkten 65, 115 und 165 Jahren dargestellt. Die x-Achse (x-Koordinate) entspricht dem oberen Modellrand und somit der Geländeoberkante, die y-Achse zeigt den Neigungswinkel  $\tan(\alpha)$ . Die Neigung ist gleich Null, wenn die Senkung ihren Maximalwert erreicht, also bei rd. 410 m vom linken Modellrand entfernt. Der Neigungssprung bei 645 m kommt durch die Materialgrenze Quartär ( $E = 100$  MPa) und Keuper ( $E = 2000$  MPa) zustande. Der Grenzwert der Neigung von 1/300 wird 165 Jahre nach der Hohlraumauffahrung deutlich unterschritten (SKEMPTON & MCDONALD 1956).

### 6.1.2 Modellvariante ZB-S1-05 (Geringere Duktilität des Liniensalzes)

Die Hauptspannungen  $S_1$  und  $S_2$  zum Zeitpunkt 165 Jahre sind in den Anlagen 6.20 bis 6.22 dargestellt, wobei die Anlage 6.21 nur die Zugspannungen zeigt. Die Zugspannungszonen zwischen der Abbaureihe 2s und der mittleren Hauptanhydritscholle sowie in der Hauptanhydritscholle östlich der Abbaureihe 4s sind durch die geringere Duktilität des Liniensalzes weniger ausgeprägt als beim Referenzmodell ZB-S1-01. Im Hauptanhydrit beim Kalilager C auf der 4. Sohle verbleibt nach 165 Jahren am rechten Stoss des Abbaues eine Zugspannungszone und an der Sohle des Abbaues ist die Zugspannungszone weniger ausgeprägt als beim Referenzmodell. Die Zugspannungen im Hauptanhydrit in der Höhe des Abbaus 2s auf der 1. Sohle haben Werte bis maximal 3,37 MPa. Die dargestellten größten Hauptdruckspannungen  $S_2$  zeigen im Gebirgsbereich oberhalb der Abbaureihe 2s etwas höhere Spannungsbeträge. Die Druckspannungen am unteren rechten Rand der östlichen Hauptanhydritscholle sind etwas geringer als im Referenzmodell ZB-S1-01.

Die Anlage 6.23 zeigt die Verteilung der Effektivspannungen nach 165 Jahren. Einige Bereiche im Liniensalz zwischen der Abbaureihe 2s und den westlichen Hauptanhydritschollen sind z.T. stärker beansprucht als beim Referenzmodell.

Die Effektivverzerrungen zum Zeitpunkt 165 Jahre nach der Hohlraumauffahrung sind in der Anlage 6.24 dargestellt. Es ist festzustellen, dass die Effektivverzerrungen in den Schweben nach 165 Jahren geringfügig kleiner sind als beim Referenzmodell ZB-S1-01 (Tabelle 6.1).

Die berechneten dilatanten Bereiche im Salzgebirge zum Zeitpunkt 165 Jahre sind in der Anlage 6.25 dargestellt. Die mit geringerer Duktilität des Homogenbereichs z3LS berechneten dilatanten Gebirgsbereiche entsprechen weitgehend den Ergebnissen des Referenzmo-

dells. Lediglich im Bereich zwischen der Abbaureihe 2s und den westlichen Hauptanhydritschollen und im Bereich oberhalb der Abbaureihe 2s ist der Auflockerungsbereich weniger ausgeprägt als im Referenzmodell. Die veränderte Kriecheigenschaft des o.g. Homogenbereichs hat demnach keinen wesentlichen Einfluss auf die berechneten dilatanten Bereiche.

Die Differenz zwischen kleinster Hauptdruckspannung und dem hypothetischen Laugendruck nimmt im Bereich zwischen der Abbaureihe 2s und den westlichen Hauptanhydritschollen geringfügig ab (Anlage 6.26). Die veränderte Kriecheigenschaft des Liniensalzes hat auch hier keinen wesentlichen Einfluss auf die berechneten, hypothetisch laugendruckgefährdeten Bereiche.

In der Anlage 6.27 ist die Senkung der Geländeoberkante und in der Anlage 6.28 ist die Senkung am Salzspiegel im Vergleich zum Referenzmodell zu den Zeitpunkten 65 und 165 Jahre dargestellt. Es zeigt sich, dass die Senkung durch die geringere Duktilität des Liniensalzes reduziert wird. Für die momentane Senkungsraten werden an der Geländeoberkante 2,00 mm/Jahr und am Salzspiegel 2,20 mm/Jahr berechnet (Tabelle 6.3).

Die Neigung der Geländeoberkante zu den Zeitpunkten 65 und 165 Jahren im Vergleich zum Referenzmodell ist in der Anlage 6.29 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die geringere Duktilität des Liniensalzes eine etwas geringere Neigung der Geländeoberfläche als beim Referenzmodell bewirkt. Der Grenzwert der Neigung von 1/300 wird zum Ende der Berechnungszeit deutlich unterschritten (SKEMPTON & MCDONALD 1956).

## 6.2 Bewertungskriterien

Im unverritzten Zustand ist Steinsalz mit Ausnahme möglicher isolierter Lösungseinschlüsse trocken und dicht. Zur Bewertung der Barriereigenschaften der Salzsichten unter Einwirkung des Bergbaues werden deshalb die Prozesse untersucht, die mechanisch zur Entste-

hung von Porenvolumen, zu Wegsamkeiten und damit zum Eindringen von Lösungen in die Abbaue führen könnten. Diese konzeptionelle Vorgehensweise führt dazu, dass die Bewertung der hydraulischen Barriereigenschaften auf der Grundlage mechanischer Zustandsgrößen, nämlich berechneter Spannungen, erfolgt.

Ein Zutritt von Lösungen in das Grubengebäude kann nur erfolgen, wenn an der äußeren Begrenzung der Salzbarriere überhaupt Lösungen anstehen. Dies wird konservativ unterstellt. Die Funktionstauglichkeit der Salzbarriere gilt als rechnerisch nachgewiesen, wenn eine Bildung von Wegsamkeiten aus geomechanischer Sicht ausgeschlossen werden kann. Dazu können nach dem derzeitigen Kenntnisstand für die Bereiche mit kriechfähigem Salzgestein zwei Kriterien herangezogen werden (HEUSERMANN & NIPP 2000):

- **Dilatanzkriterium:** Die Integrität ist gewährleistet, wenn keine Schädigung des Gebirges auftritt. Es ist nachgewiesen, dass Spannungszustände unterhalb der Dilatanzgrenze auch langfristig nicht mit Auflockerungen verbunden sind, so dass für Spannungen in diesem Bereich die Dichtheit des Salzgesteins gewährleistet ist. Erst Spannungszustände oberhalb der Dilatanzgrenze führen zu einer Auflockerung des Mikrogefüges, wodurch bei Andauern des Zustandes allmählich ein Netzwerk von Mikrorissen entsteht.
- **Laugendruckkriterium:** Die Integrität ist gewährleistet, wenn die kleinste Hauptdruckspannung  $S_1$  nicht unter den Wert des angenommenen hydrostatischen Laugendrucks in der entsprechenden Teufe fällt. Der hydrostatische Druck ergibt sich aus einer fiktiven, bis zur Geländeoberfläche reichenden Flüssigkeitssäule. Näherungsweise wird hier von einer Lösung mit einer Dichte von  $1,1 \text{ kg/dm}^3$  ausgegangen.

Nach diesen sehr strengen Kriterien hinsichtlich der Beibehaltung der mechanischen Integrität als Indikator der hydraulischen Barriereigenschaften ist die Funktionstauglichkeit der Salzbarriere bereits rechnerisch nachgewiesen, wenn eines der beiden Kriterien erfüllt ist.

Über die tatsächlich ablaufenden Prozesse gibt es derzeit keine abschließenden wissenschaftlichen Erkenntnisse. Dennoch ist eine Bewertung der Wirksamkeit der Barriere aufgrund folgender Vorstellungen möglich:

- Im Bereich um die Abbaue kommt es insbesondere in der Nähe des angrenzenden Hauptanhydrits zu Mikrorissbildungen infolge Dilatanz und zu lokalen Rissen infolge einer Akkumulation dilatanter Verformungen. Von einem homogen verteilten Dilatanzvolumen, wie es die Berechnung ausweist, ist nicht auszugehen.

- Die Ausbreitung der Auflockerungszonen ist ein zeitabhängiger Prozess, der bei geringer Überschreitung der Dilatanzgrenze sehr langsam abläuft und erst bei deutlicher Überschreitung schneller vor sich geht. Das in den Berechnungen verwendete Materialmodell berücksichtigt diese zeitliche Komponente nicht, sondern überführt die Zonen spontan in dilatantes Verhalten. Das Modell ist daher sehr konservativ.

### 6.3 Bewertung der Barrierenintegrität

Aus den Ergebnissen der geomechanischen Modellberechnungen lassen sich folgende Aussagen zur Integrität und Funktionstauglichkeit der Salzsichten über den Abbauen des Zentralbereichs ableiten:

- In den Stößen, Sohlen und Firsten bzw. Schweben der Abbaue werden aufgrund hoher geomechanischer Beanspruchung dilatante Auflockerungszonen berechnet, die stellenweise bis an die benachbarte Hauptanhydritscholle, aber auch oberhalb der Abbaureihe 2s an die oberste Hauptanhydritscholle reichen. Die Schweben zwischen den Abbauen sind rechnerisch nahezu durchgängig dilatant. Beide o.g. Integritätskriterien werden nicht erfüllt.
- Am Kalilager C oberhalb der 1. Sohle und 2. Sohle wird ebenfalls ein dilatanter Auflockerungsbereich berechnet. Zum gegenwärtigen Zeitpunkt verbleibt ein ca. 40 m mächtiger Gebirgsbereich, in dem zwar das Dilatanzkriterium, aber nicht das Laugendruckkriterium erfüllt ist. Nach wenigen Jahren bzw. Jahrzehnten entsteht am Salzspiegel ein dilatanter Bereich, der sich mit der Zeit vergrößert, d.h. beide o.g. Integritätskriterien sind dort nicht erfüllt.
- Die Verringerung der relativen Kriechfähigkeit  $A^*$  hat keine signifikanten Konsequenzen auf die Ausbreitung der Auflockerung. Die Auflockerungszone im Bereich zwischen der Abbaureihe 2s und den westlichen Hauptanhydritschollen und im Bereich oberhalb der Abbaureihe 2s ist durch die geringere Kriechfähigkeit des Liniensalzes weniger ausgeprägt als im Referenzmodell.
- Die Modellberechnungen lassen die Schlussfolgerung zu, dass aus geomechanischer Sicht Lösungszutritte in die Steinsalzabbaue möglich sind. Wenn eine hydraulische Verbindung zwischen der obersten und der darunterliegenden Hauptanhydritscholle besteht, ist der in Anlage 6.30 skizzierte Pfad eines Lösungszutritts denkbar. Dann wäre sowohl eine hydraulische Verbindung zur Abbaureihe 2s wie auch zu den westlich des Hauptanhydrits angrenzenden Abbauen des Kalilagers C nicht auszuschließen. Auch eine Verbin-

dung der oberen Hauptanhydritscholle über dilatante Bereiche mit den Steinsalzabbauen ist rechnerisch nicht auszuschließen.

## **7 Zusammenfassung**

Ziel der von der BGR durchgeführten Untersuchungen ist es, die erforderlichen Kenntnisse und Nachweise für das atomrechtliche Planfeststellungsverfahren zu erbringen, das für die Stilllegung des ERA Morsleben beantragt ist. Im Zuge dieser Untersuchungen ist insbesondere auch die Integrität des Salzgebirges als geologische Barriere zu bewerten.

Der Beurteilung der Integrität der Salzbarriere liegt zugrunde, dass Salzgestein im unverritzten Zustand hydraulisch dicht ist (Permeabilität  $k \ll 10^{-20} \text{ m}^2$ ). Erst infolge geomechanischer Beanspruchung des Gebirges, z. B. aufgrund von Abbautätigkeit, kann eine Auflockerung des Salzgesteins auftreten und sich infolgedessen ein durchlässiger Bereich ausbilden. Die geomechanische Beanspruchung der Salzbarriere ist somit ein Indikator für ihre Dichtheit. Die Beurteilung der Integrität stützt sich deswegen auf geomechanische Modellberechnungen, in denen die Beanspruchung und eine eventuelle Schädigung des Gebirges durch die frühere Bergbautätigkeit und durch die Konvergenz der Abbaue in der Betriebs- und Nachbetriebsphase des Endlagers untersucht werden. Die Integrität der Salzbarriere ist nicht beeinträchtigt, wenn die Modellberechnungen eine ausreichend mächtige Zone mit mechanisch intaktem Salzgestein zwischen dem Salzspiegel und den Abbauen ausweisen.

Für die Bewertung der Integrität der Salzbarriere werden die in Kapitel 6.2 beschriebenen Kriterien (Dilatanz- und Laugendruckkriterium) angewendet. Die Integrität ist rechnerisch nachgewiesen, wenn eines der beiden Kriterien erfüllt ist. Dabei wird konservativ unterstellt, dass am Salzspiegel eine bis zur Geländeoberfläche reichende Lösung ansteht.

Die Modellberechnungen zeigen, dass die Schweben in der Abbaureihe 4s deutlich höher beansprucht sind als die Schweben in den Abbaureihen 2s und 3s und z.T. erhebliche Effektivverzerrungen aufweisen. Die im Vergleich zum nördlichen Teil des Zentralbereichs (HEUSERMANN & NIPP 2000) insgesamt höhere Schwebenbeanspruchung ist insbesondere darauf zurückzuführen, dass hier vereinfachend die geometrischen Abmessungen der Abbaue direkt aus dem geologischen Sonderschnitt ZTS 3.1 entnommen wurden und daraus eine extrem konservative Modellierung des Grubengebäudes resultiert.

Des Weiteren werden für den abbaunahen Bereich dilatante Auflockerungszonen berechnet, die stellenweise bis an die westlich angrenzenden Hauptanhydritschollen reichen. Diese Bereiche sind als potentielle Schwachstellen der Salzbarriere anzusehen. Für die unmittelbar unterhalb des Salzspiegels anstehenden Steinsalzsichten wird zum heutigen Zeitpunkt keine Dilatanz ermittelt. Dies bedeutet, dass momentan keine Schädigung und damit auch nicht die Voraussetzung für eine Permeation besteht. Nach wenigen Jahrzehnten wird jedoch am Salzspiegel westlich der Hauptanhydritschollen ein dilatanter Bereich berechnet der sich mit der Zeit vergrößert. Diese Auflockerungszone hat zum Ende der Berechnungszeit aber keine Verbindung zu den Abbauen des Kalilagers C.

Die geringere Kriechfähigkeit des Homogenbereichs Liniensalz hat keine signifikanten Konsequenzen auf die Ausbreitung der Auflockerungszone. Zum gegenwärtigen Zeitpunkt sind



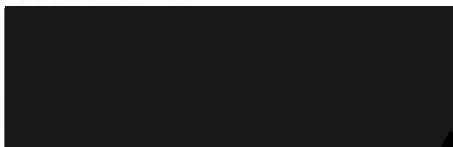
nicht die Voraussetzung für eine Permeation besteht. Nach wenigen Jahrzehnten wird jedoch am Salzspiegel westlich der Hauptanhydritschollen ein dilatanter Bereich berechnet der sich mit der Zeit vergrößert. Diese Auflockerungszone hat zum Ende der Berechnungszeit aber keine Verbindung zu den Abbauen des Kalilagers C.

Die geringere Kriechfähigkeit des Homogenbereichs Liniensalz hat keine signifikanten Konsequenzen auf die Ausbreitung der Auflockerungszone. Zum gegenwärtigen Zeitpunkt sind geomechanisch bedingte Lösungszutritte in die Abbaue nur über die oberen, bis zum Salzspiegel reichenden Hauptanhydritschollen und die dilatanten und hypothetisch laugendruckgefährdeten Gebirgsbereiche zwischen den Hauptanhydritschollen und den angrenzenden Abbauen möglich.

Senkungen und die Senkungsraten wurden jeweils an der Geländeoberkante und am Salzspiegel für ausgewählte Punkte ermittelt. Die Senkungen ergeben an der Geländeoberkante eine typische Senkungsmulde mit einer maximalen Senkung von ca. 0,5 m. Des Weiteren wird der Grenzwert der Neigung von 1/300 in allen Berechnungen deutlich unterschritten.

**BUNDESANSTALT FÜR GEOWISSENSCHAFTEN UND ROHSTOFFE****HANNOVER**

Im Auftrage:



(Dr.-Ing. M. Wallner)

- Dir. u. Prof. -

- Abteilungsleiter B2 -

- Projektleiter Endlagerung -

*gez. Büttner*

(Dipl.-Ing. K. Büttner)

- Wiss. Angest. -



(Prof. Dr.-Ing. St. Heusermann)

- Wiss. Direktor -

- Arbeitspaketleiter -

**Literatur- und Unterlagenverzeichnis**

- BEHLAU, J., MINGERZAHN, G. & BORNEMANN, O. (1997): ERA Morsleben - Erarbeitung eines geologischen Lagerstättenmodells Morsleben. Abschlussbericht zum Arbeitspaket 9M 21246011, Archiv-Nr. 116872, BGR, Hannover.
- BEHLAU, J., MINGERZAHN, G. & BORNEMANN, O. (2000): Sohlenriss ERA Morsleben, Schachtanlage Bartensleben.
- BfS/DBE (2000): Geologischer Sonderschnitt ZTS 3.1, Zentralbereich Bartensleben.
- BÜTTNER, K. (2002a): ERA Morsleben - Auswirkung einzelner Schwebenverbrüche auf die Integrität der Salzbarriere im Zentralbereich Bartensleben. Ergebnisbericht zum Arbeitspaket 9M 2324101100, Tagebuch-Nr. 10278/02, BGR, Hannover.
- BÜTTNER, K. (2002b): ERA Morsleben - Gebirgsmechanische Beurteilung der Integrität der Salzbarriere im südlichen Teil des Zentralbereichs Bartensleben. Zwischenbericht zum Arbeitspaket 9M 2324101100, Tagebuch-Nr. 12541/02, BGR, Hannover.
- CRISTESCU, N. & HUNSCHE, U. (1998): Time Effects in Rock Mechanics. John Wiley & Sons, Chichester.
- HEUSERMANN, ST. & NIPP, H.-K. (2000): ERA Morsleben - Gebirgsmechanische Beurteilung der Integrität der Salzbarriere in der Schachtanlage Bartensleben. Abschlussbericht zum Arbeitspaket 9M 2324101100, Archiv-Nr. 0120259, BGR, Hannover.
- NIPP, H.-K. (1991): Testbericht und Freigabemitteilung für das Programmsystem ANSALT I (Release 1991-1). Bericht, Archiv-Nr. 108586, BGR, Hannover.
- NIPP, H.-K., MÜLLER, D. & STECHER, TH. (1994): Interaktives Dialogsystem INCA. Abschlussbericht zum Arbeitspaket 9G 21323000, Archiv-Nr. 112696, BGR, Hannover.
- PLISCHKE, I. & SCHULZE, O. (2002): ERA Morsleben - Gebirgsmechanische und geotechnische Untersuchungen im Labor und in situ: Ingenieurgeologische Erkundung von Homogenbereichen. Abschlussbericht (4. Fassung) zum Arbeitspaket 9M 2131001500, Archiv-Nr. 10548/03, BGR, Hannover.
- SKEMPTON, A. W. & McDONALD (1956): The allowable settlement of buildings. - Proc. Civ. Engrs., Part 3, Vol. 5: 727 - 768; London.

**Abkürzungsverzeichnis**

BfS:	Bundesamt für Strahlenschutz
BGR:	Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe
DBE:	Deutsche Gesellschaft zum Bau und Betrieb von Endlagern für Abfallstoffe mbH
ERA:	Endlager für radioaktive Abfälle
FE-Modell:	Finite-Elemente-Modell
GOK:	Geländeoberkante
N:	Nord
E:	Ost
S:	Süd
W:	West
ZB:	Zentralbereich
2D:	zweidimensional
$\alpha, k$	Parameter im Drucker/Prager-Kriterium
$A_{cr}$	Strukturfaktor [1/d]
E	Elastizitätsmodul [MPa]
$J_1$	1. Invariante des Spannungstensors [MPa]
$J_2^D$	2. Invariante des Spannungsdeviators [MPa <sup>2</sup> ]
n	Spannungsexponent [-]
$S_1$	kleinste Hauptdruckspannung [MPa]
$S_2$	größte Hauptdruckspannung [MPa]
T	Temperatur [K]
$\dot{\epsilon}_{eff}$	effektive stationäre Kriechrate [1/d]
$\nu$	Querdehnungszahl [-]
$\rho$	Dichte [kg/dm <sup>3</sup> ]
$\sigma_{eff}$	Effektivspannung [MPa]
$\sigma^*$	Normierungsspannung [MPa]

Weitere Abkürzungen und Formelzeichen sind im Text erläutert.

**Tabellenverzeichnis**

Tab. 4.1: Elastische Kennwerte der geologischen Schichten

Tab. 4.2: Relative Kriechfähigkeit  $A^*$  der modellierten Homogenbereiche

Tab. 6.1: Senkungen an der Geländeoberkante und am Salzspiegel [cm]

Tab. 6.2: Senkungsraten an der Geländeoberkante und am Salzspiegel [mm/Jahr]

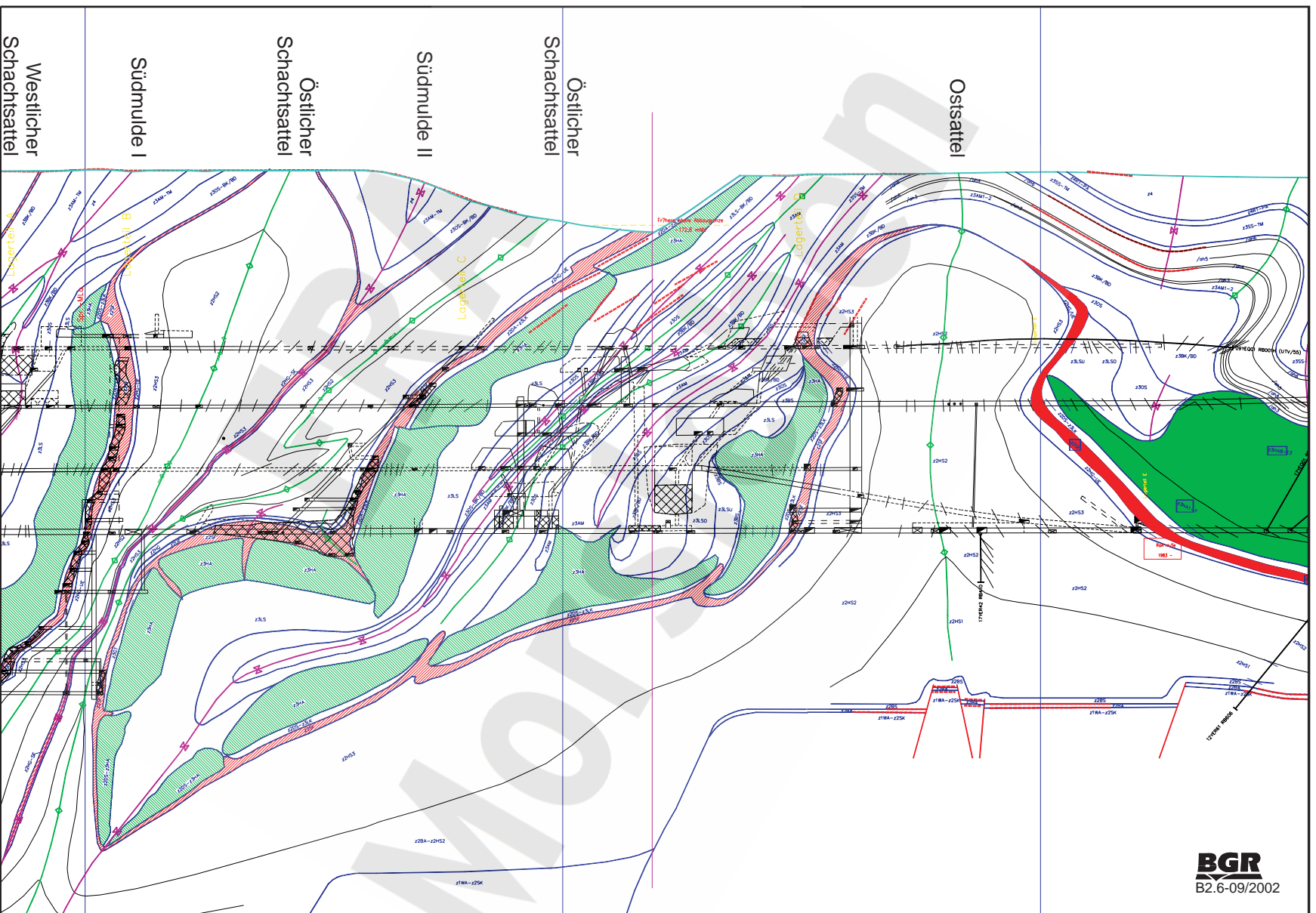
ERA  
Morsleben

## Anlagenverzeichnis

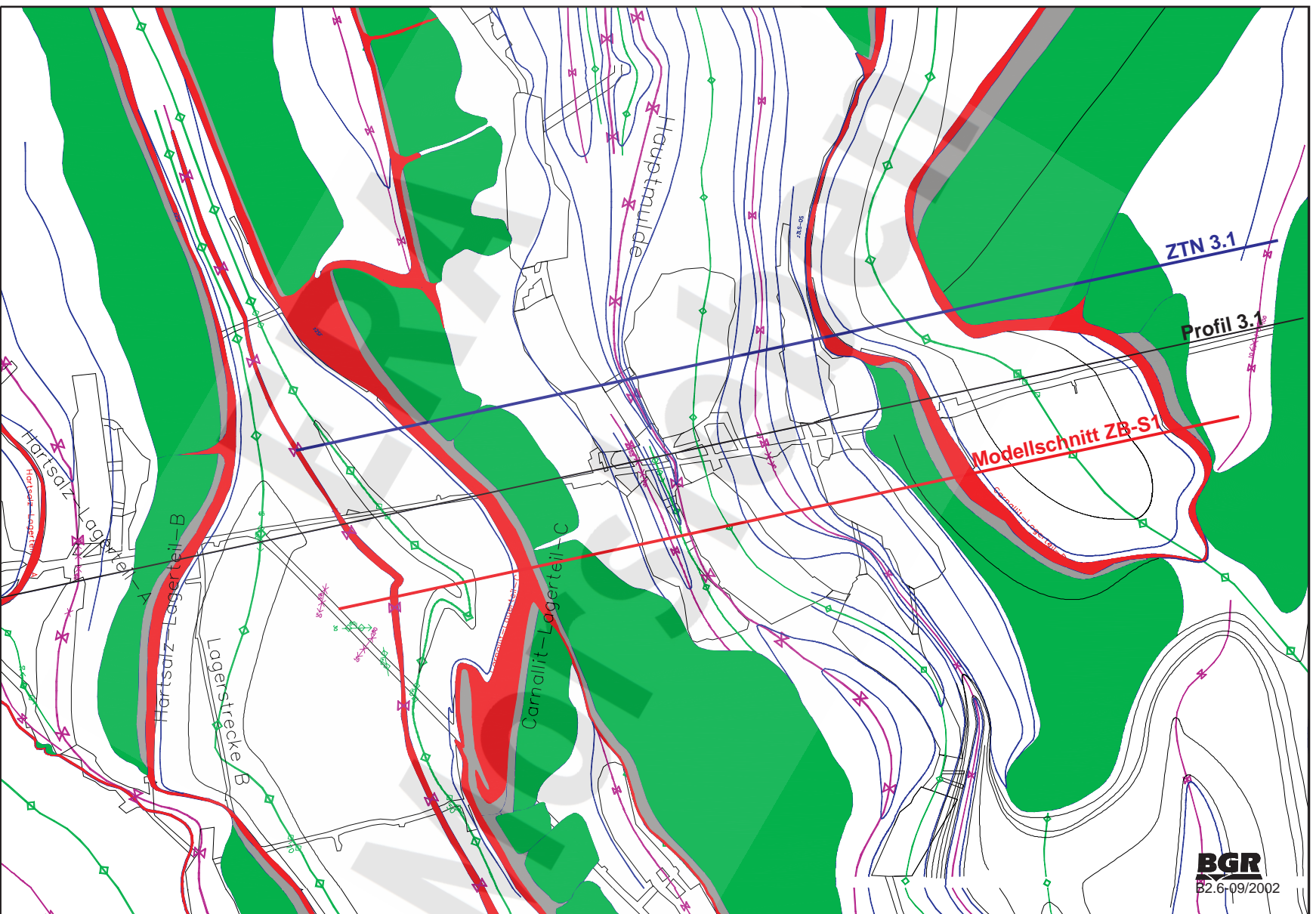
(Die Anlagen sind kapitelweise nummeriert. Die erste Ziffer bezieht sich auf das betreffende Hauptkapitel. Danach folgt, durch einen Punkt getrennt, die fortlaufende Nummer der Anlagen in dem jeweiligen Hauptkapitel.)

- Anlage 3.1: Geologisches Profil 3.1, Zentralbereich Bartensleben (BEHLAU, MINGERZAHN & BORNEMANN 1997)
- Anlage 3.2: Sohlenriss des Zentralbereichs Bartensleben, 2. Sohle (BEHLAU, MINGERZAHN & BORNEMANN 2000)
- Anlage 3.3: Geologischer Sonderschnitt ZTS 3.1, Zentralbereich Bartensleben (BfS/DBE 2000)
  
- Anlage 4.1: Modellierter Homogenbereiche im südlichen Zentralbereich Bartensleben
- Anlage 4.2: Modellierter Abbaue und Strecken im Modellschnitt ZB-S1
- Anlage 4.3: Modellierter Abbaue und Strecken (Ausschnitt) - Modellschnitt ZB-S1 (Abbau-reihen 2s, 3s und 4s)
  
- Anlage 5.1: FE-Modell ZB-S1: Gesamtdarstellung
- Anlage 5.2: FE-Modell ZB-S1: Ausschnitt im Bereich der Abbaue
  
- Anlage 6.1: ZB-S1-01: Referenzmodell - Verformte Struktur nach 65 Jahren (Ausschnitt)
- Anlage 6.2: ZB-S1-01: Referenzmodell - Verschiebungsvektoren nach 65 Jahren (Ausschnitt)
- Anlage 6.3: ZB-S1-01: Referenzmodell - Kleinste Hauptdruckspannungen  $S_1$  nach 65 Jahren (Ausschnitt)
- Anlage 6.4: ZB-S1-01: Referenzmodell - Kleinste Hauptdruckspannungen  $S_1$  nach 165 Jahren (Ausschnitt)
- Anlage 6.5: ZB-S1-01: Referenzmodell - Zugspannungen nach 65 Jahren (Ausschnitt)
- Anlage 6.6: ZB-S1-01: Referenzmodell - Zugspannungen nach 165 Jahren (Ausschnitt)
- Anlage 6.7: ZB-S1-01: Referenzmodell - Größte Hauptdruckspannungen  $S_2$  nach 65 Jahren (Ausschnitt)
- Anlage 6.8: ZB-S1-01: Referenzmodell - Größte Hauptdruckspannungen  $S_2$  nach 165 Jahren (Ausschnitt)
- Anlage 6.9: ZB-S1-01: Referenzmodell - Effektivspannungen nach 65 Jahren (Ausschnitt)
- Anlage 6.10: ZB-S1-01: Referenzmodell - Effektivspannungen nach 165 Jahren (Ausschnitt)
- Anlage 6.11: ZB-S1-01: Referenzmodell - Effektivverzerrungen nach 65 Jahren (Ausschnitt)
- Anlage 6.12: ZB-S1-01: Referenzmodell - Effektivverzerrungen nach 165 Jahren (Ausschnitt)

- Anlage 6.13: ZB-S1-01: Referenzmodell - Dilatante Gebirgsbereiche nach 65 Jahren
- Anlage 6.14: ZB-S1-01: Referenzmodell - Dilatante Gebirgsbereiche nach 165 Jahren
- Anlage 6.15: ZB-S1-01: Referenzmodell - Differenz zwischen Laugendruck und kleinster Hauptdruckspannung nach 65 Jahren
- Anlage 6.16: ZB-S1-01: Referenzmodell - Differenz zwischen Laugendruck und kleinster Hauptdruckspannung nach 165 Jahren
- Anlage 6.17: ZB-S1-01: Referenzmodell - Senkung der Geländeoberkante für unterschiedliche Zeitpunkte
- Anlage 6.18: ZB-S1-01: Referenzmodell - Senkung am Salzspiegel für unterschiedliche Zeitpunkte
- Anlage 6.19: ZB-S1-01: Referenzmodell - Neigung der Geländeoberkante für unterschiedliche Zeitpunkte
- Anlage 6.20: ZB-S1-05: Geringere Duktilität des Liniensalzes - Kleinste Hauptdruckspannungen  $S_1$  nach 165 Jahren (Ausschnitt)
- Anlage 6.21: ZB-S1-05: Geringere Duktilität des Liniensalzes - Zugspannungen nach 165 Jahren (Ausschnitt)
- Anlage 6.22: ZB-S1-05: Geringere Duktilität des Liniensalzes - Größte Hauptdruckspannungen  $S_2$  nach 165 Jahren (Ausschnitt)
- Anlage 6.23: ZB-S1-05: Geringere Duktilität des Liniensalzes - Effektivspannungen nach 165 Jahren (Ausschnitt)
- Anlage 6.24: ZB-S1-05: Geringere Duktilität des Liniensalzes - Effektivverzerrungen nach 165 Jahren (Ausschnitt)
- Anlage 6.25: ZB-S1-05: Geringere Duktilität des Liniensalzes - Dilatante Gebirgsbereiche nach 165 Jahren
- Anlage 6.26: ZB-S1-05: Geringere Duktilität des Liniensalzes - Differenz zwischen Laugendruck und kleinster Hauptdruckspannung nach 165 Jahren
- Anlage 6.27: ZB-S1-05: Geringere Duktilität des Liniensalzes - Senkung der Geländeoberkante im Vergleich zum Referenzmodell
- Anlage 6.28: ZB-S1-05: Geringere Duktilität des Liniensalzes - Senkung am Salzspiegel im Vergleich zum Referenzmodell
- Anlage 6.29: ZB-S1-05: Geringere Duktilität des Liniensalzes - Neigung der Geländeoberkante im Vergleich zum Referenzmodell
- Anlage 6.30: ZB-S1-01: Referenzmodell - Pfad eines möglichen Lösungszutritts



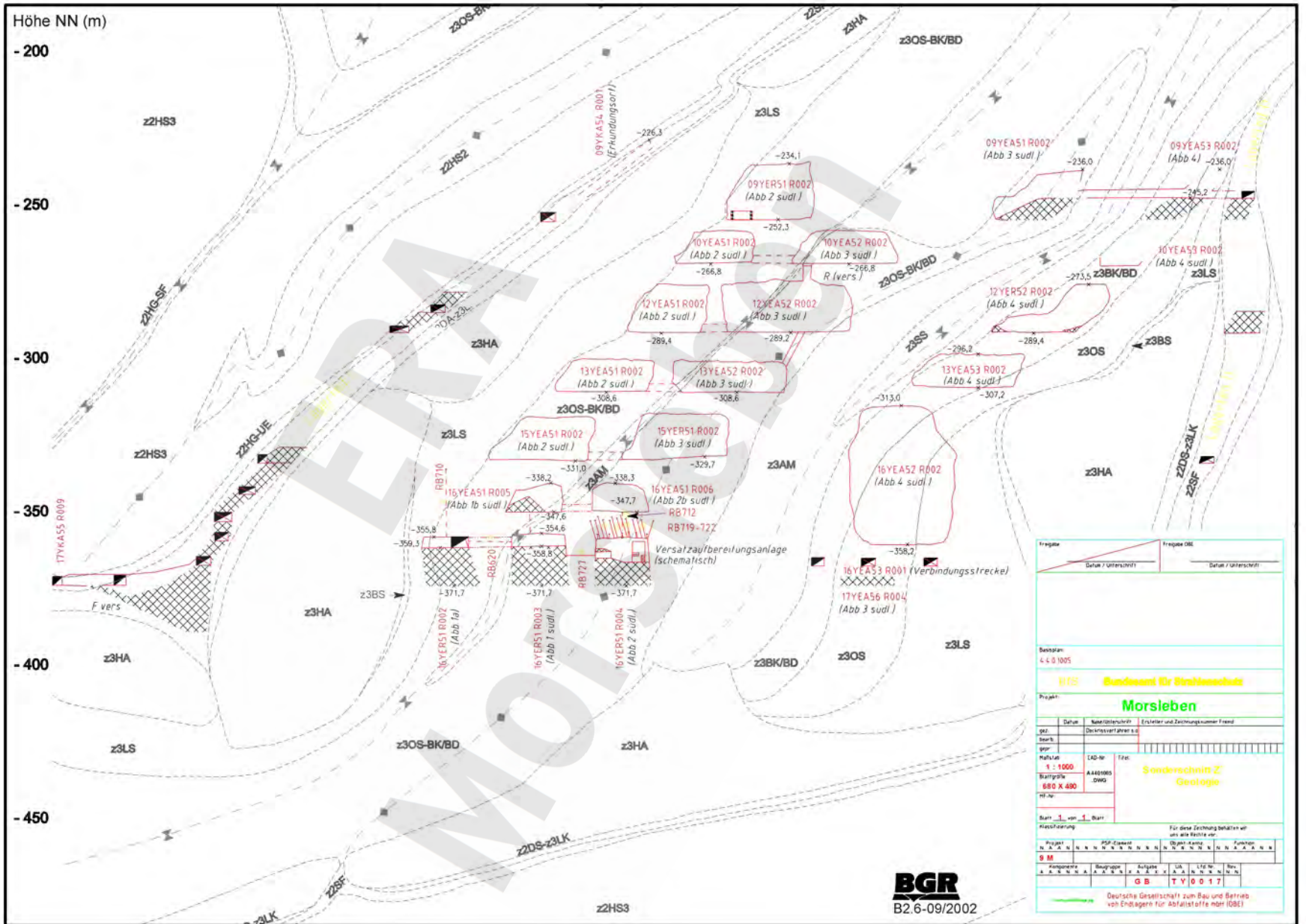
Geologisches Profil 3.1, Zentralbereich Bartensleben  
(Behau, Mingerzahn & Bornemann 1997)



Sohlenriss des Zentralbereichs Bartensleben, 2. Sohle  
(Behau, Mingerzahn & Bornemann 2000)

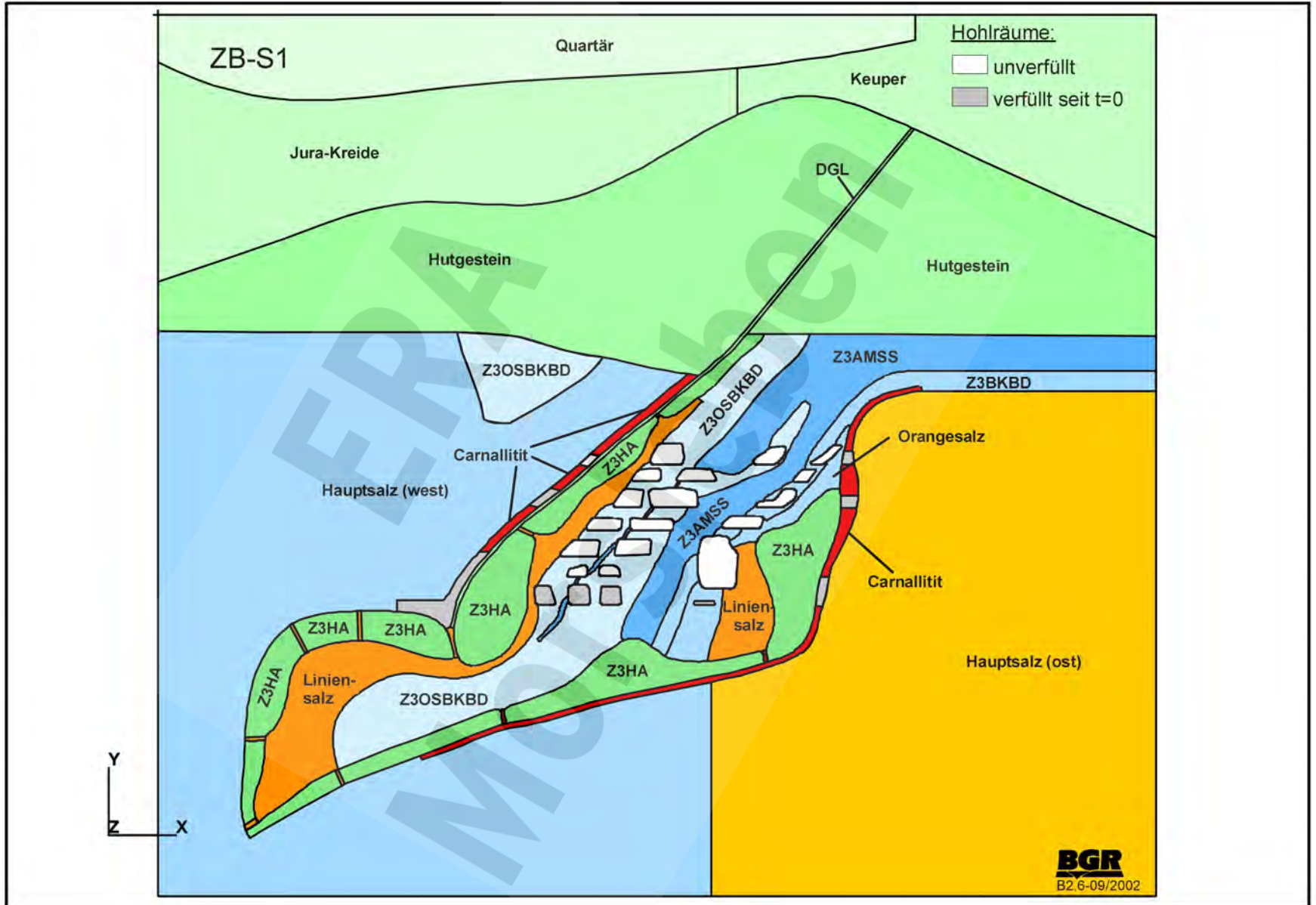


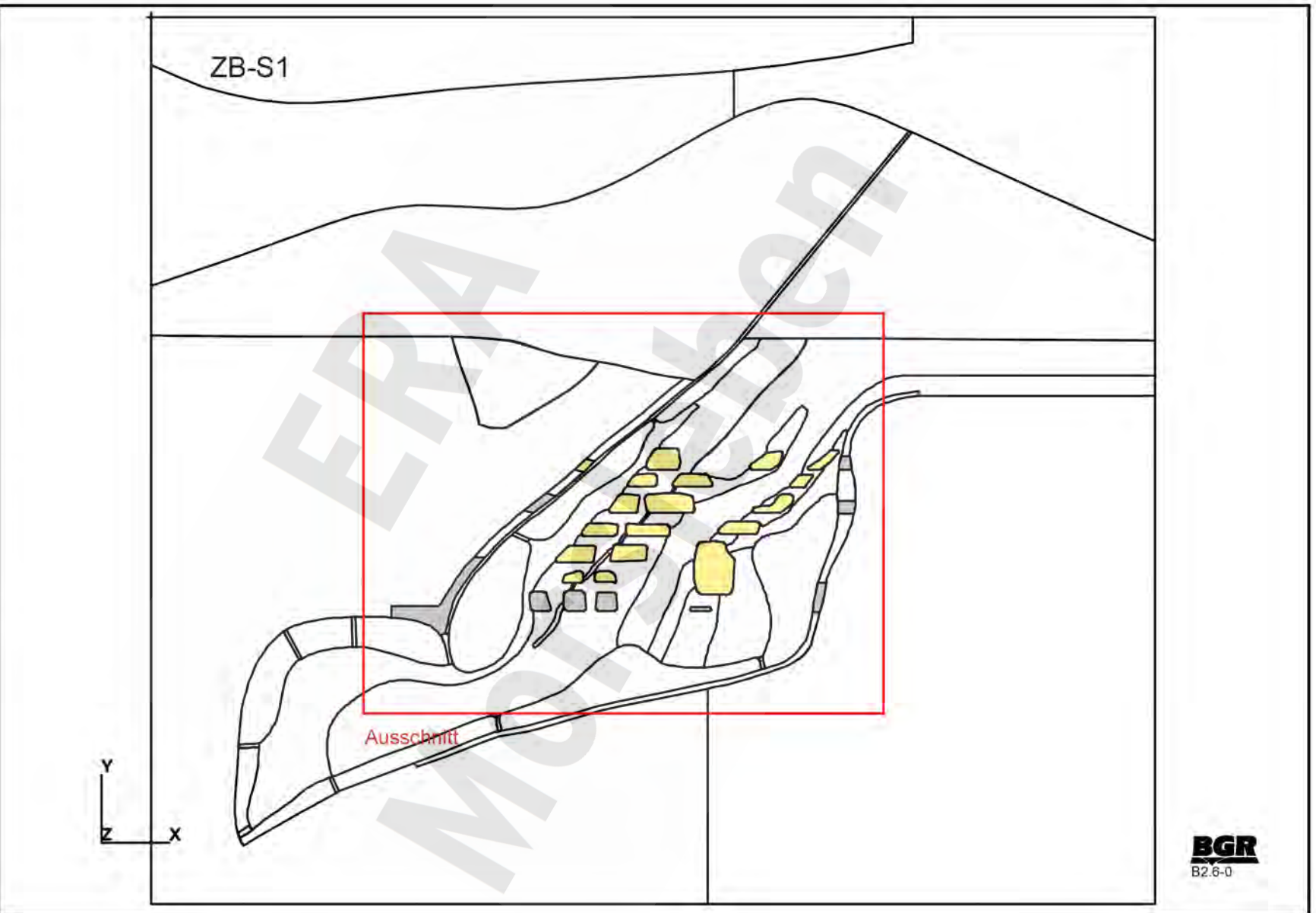
Geologischer Sonderschnitt ZTS 3.1  
 Zentralbereich Bartenleben (Bfs/DBE 2000)



Fragebogen		Fragebogen OIB	
Datum / Unterschrift		Datum / Unterschrift	
Bestandsplan: 4 4 0 1005			
<b>BfS Bundesamt für Strahlenschutz</b>			
<b>Projekt: Morsleben</b>			
Datum: _____ Bearb. / gepr.: _____		Bearb. / gepr.: _____ Erklärter und Zeichnungsnummer Freund: _____	
Multiscale	LAD-Nr.	Titel:	
1 : 1:500	A4401005	<b>Sonderschnitt Z'          Geologie</b>	
Bearbeitung	DWG		
880 X 490			
Blatt 1 von 1 Blatt			
Kopplösung			
Projekt		Für diese Zeichnung behalten wir uns alle Rechte vor.	
PSP-Zustand	Objekt-Nr.	Funktion	
S M			
Kontrollierte	Baugruppe	Aufgabe	Uk
A			
		G B	T Y
Deutsche Gesellschaft zum Bau und Betrieb von Endlagern für Abfallstoffe mbr (DBE)			

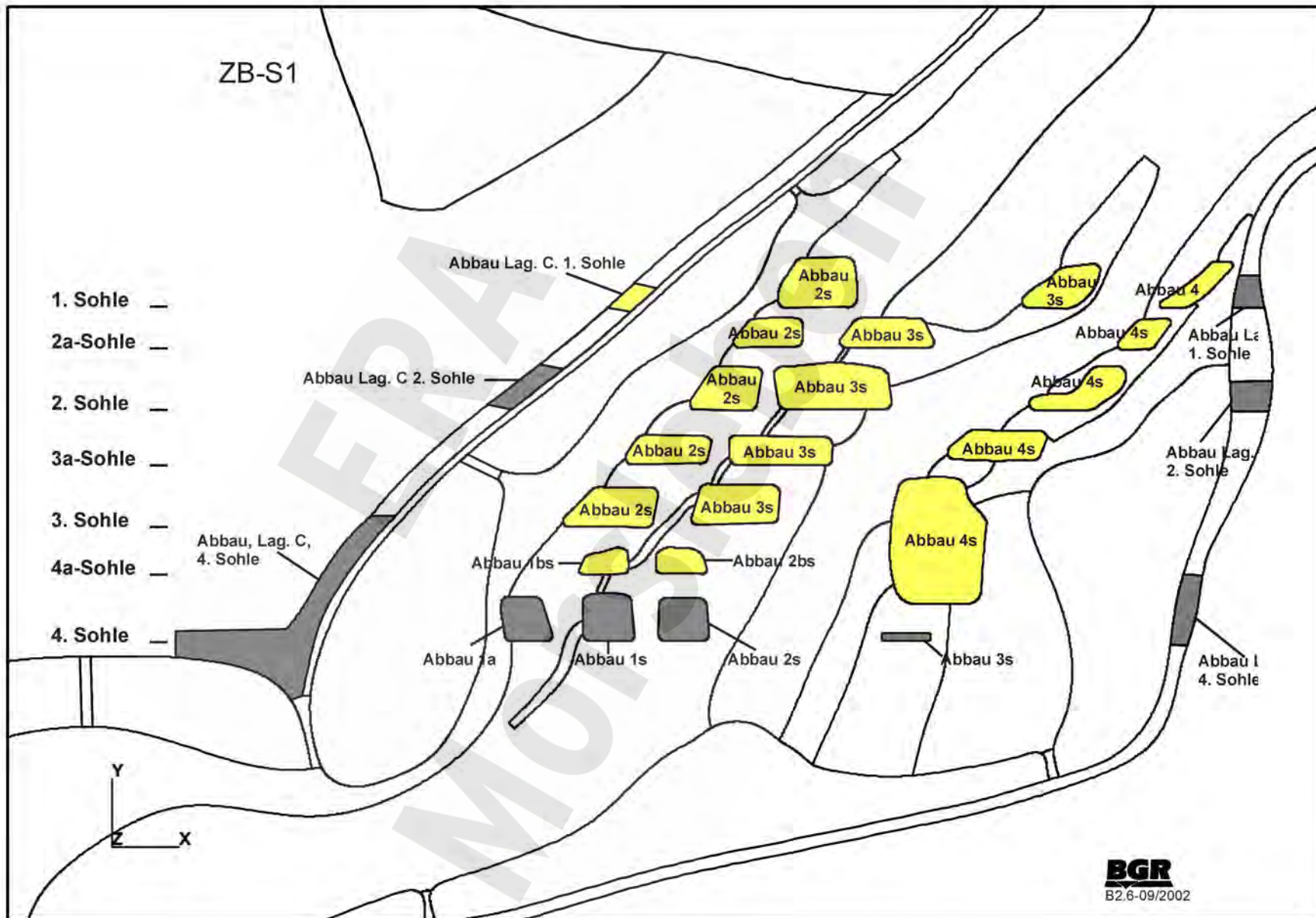
Modellierte Homogenbereiche im südlichen Zentralbereich Bartensleben

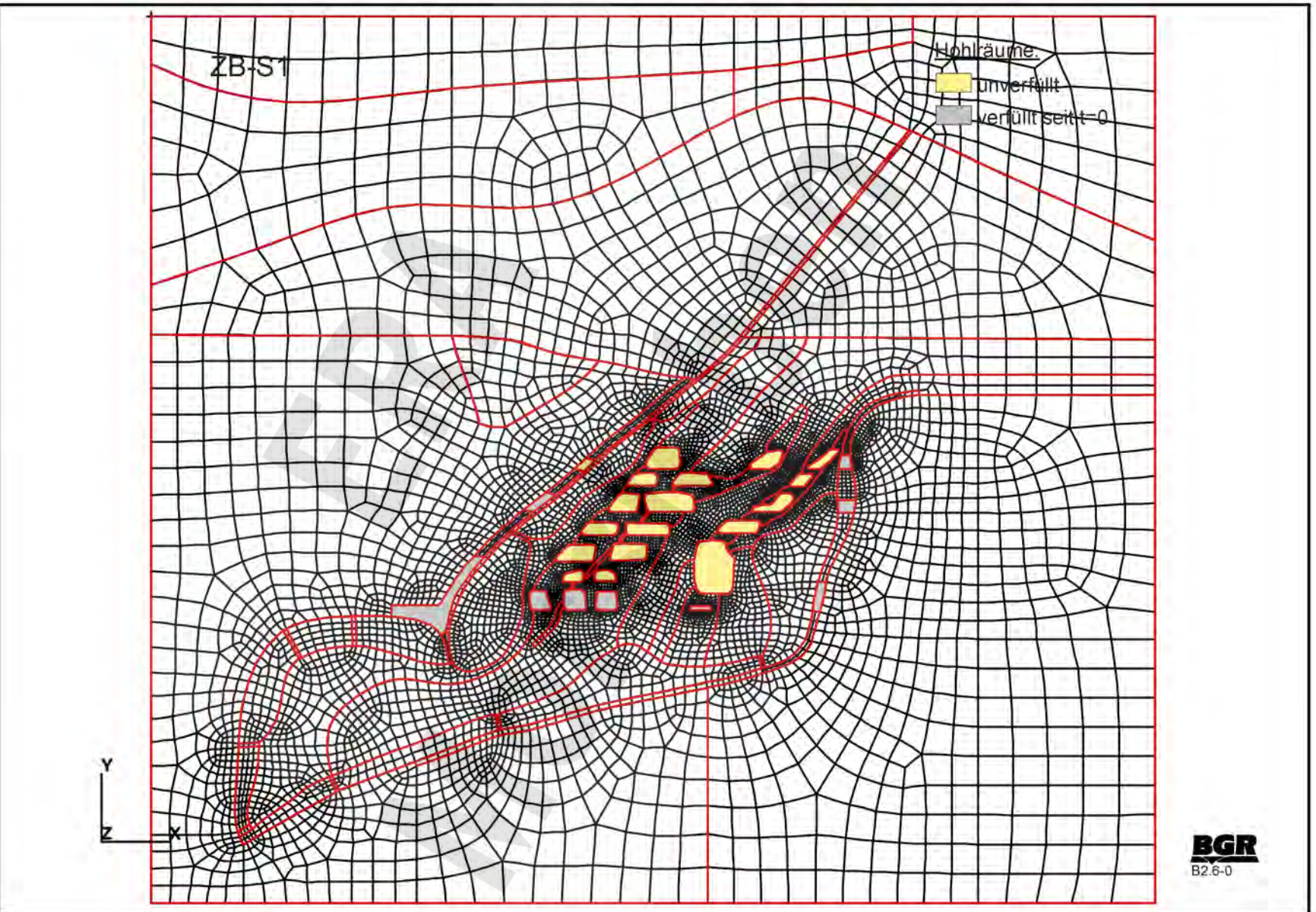




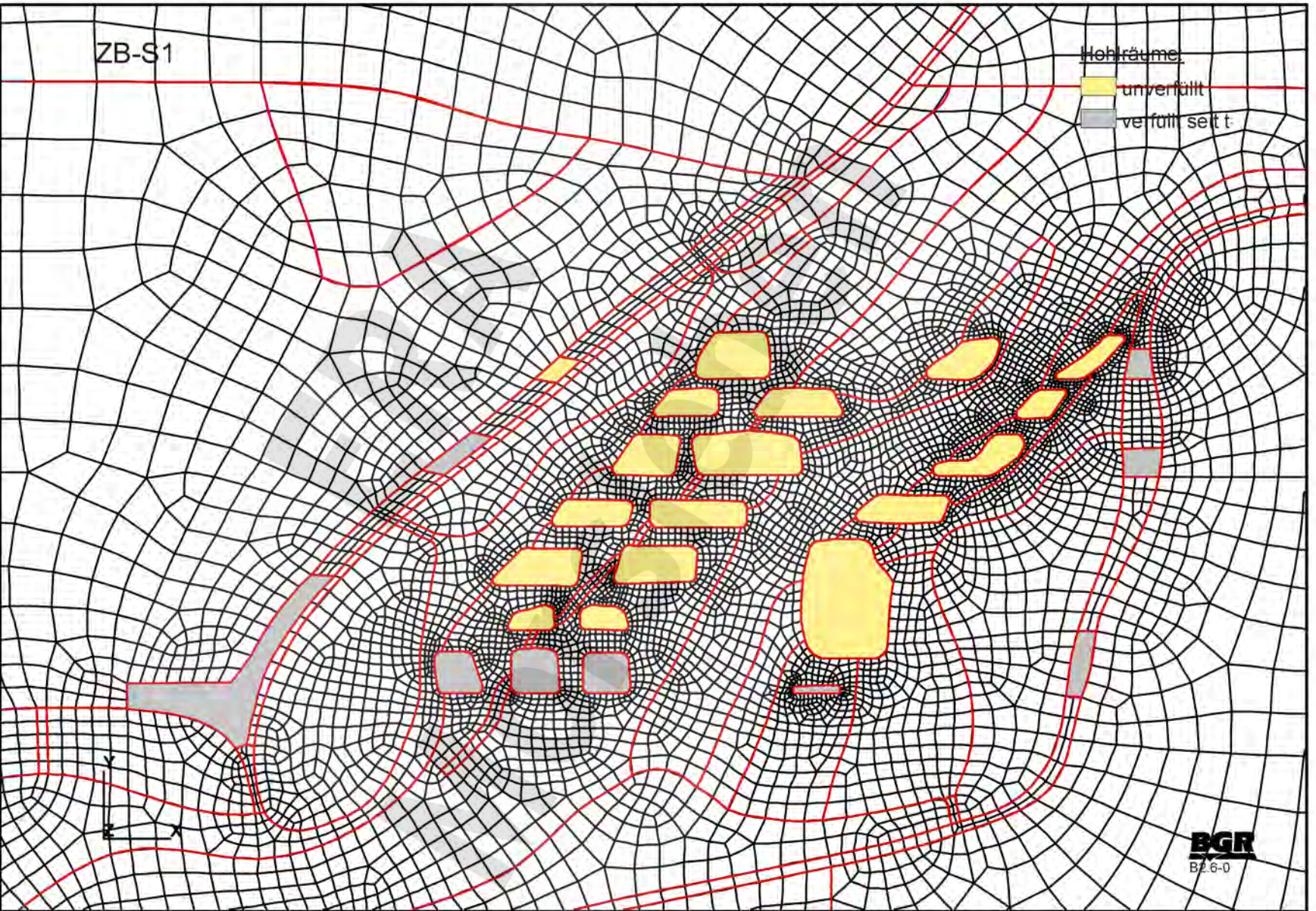
Modellierte Abbaue und Strecken im Modellschnitt ZB-S1

Modellierte Abbaue und Strecken (Ausschnitt)  
 Modellschnitt ZB-S1 (Abbaureihen 2s, 3s und 4s)

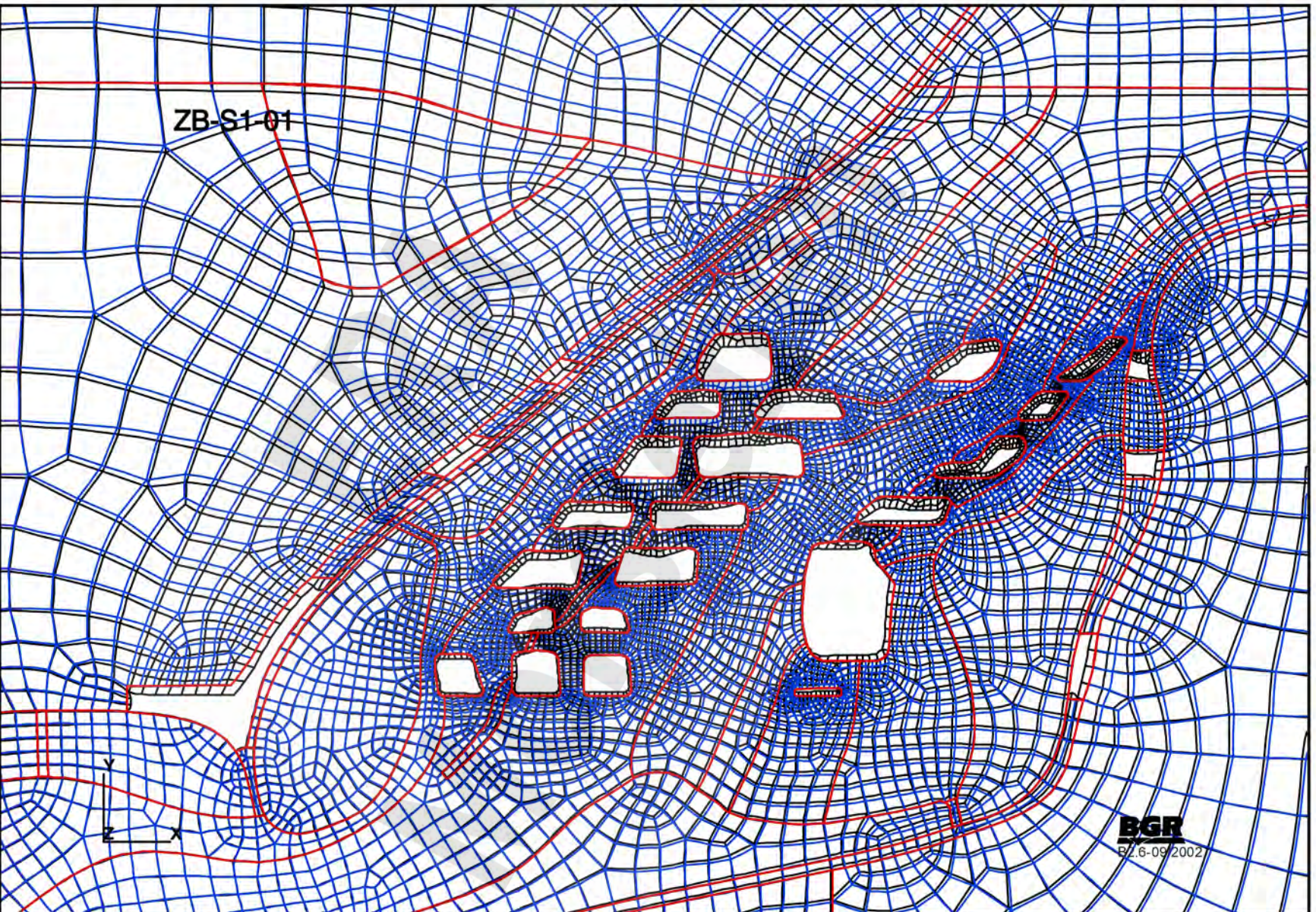




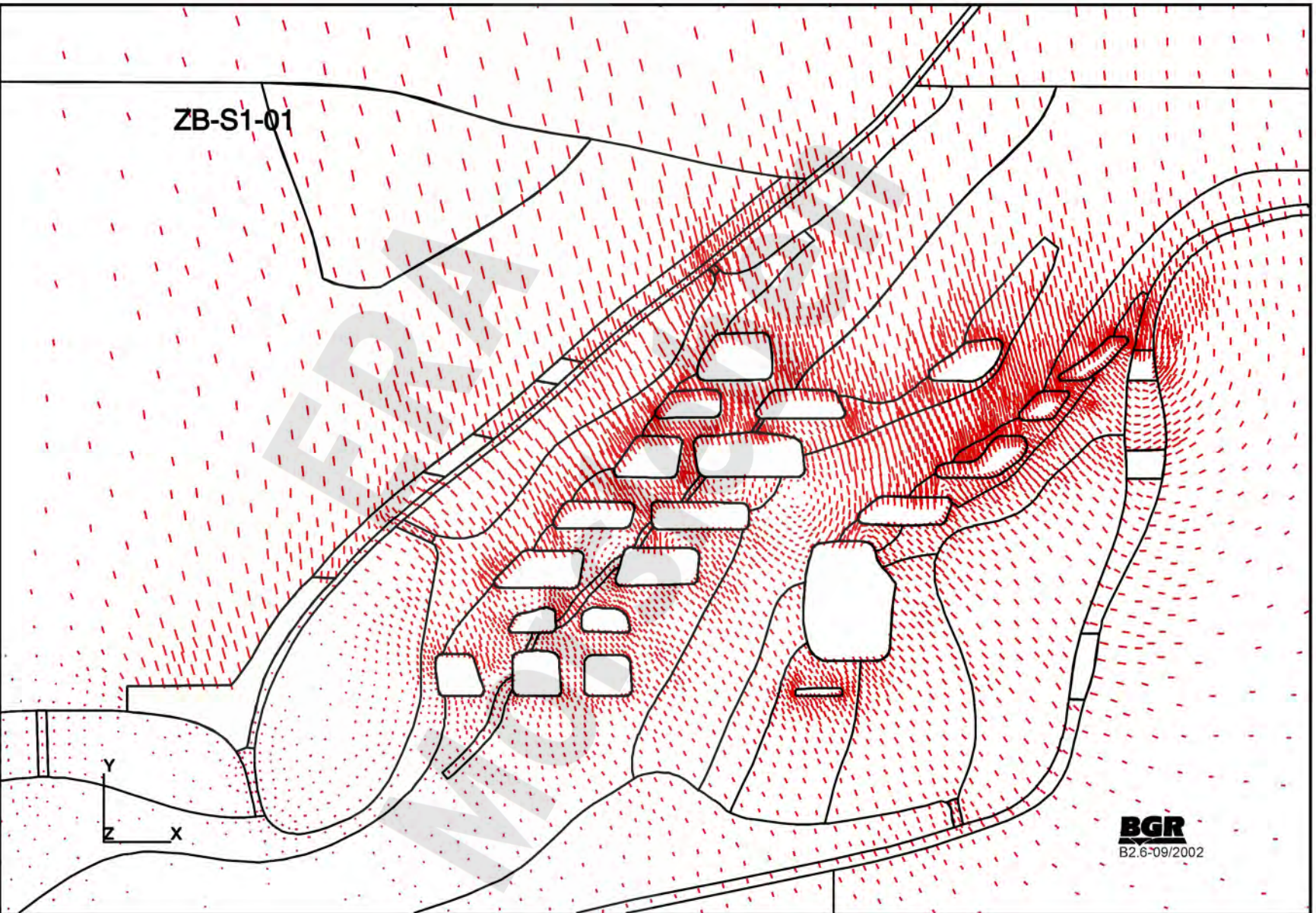
FE-Modell ZB-S1: Gesamtdarstellung



FE-Modell ZB-S1: Ausschnitt im Bereich der Abbaue

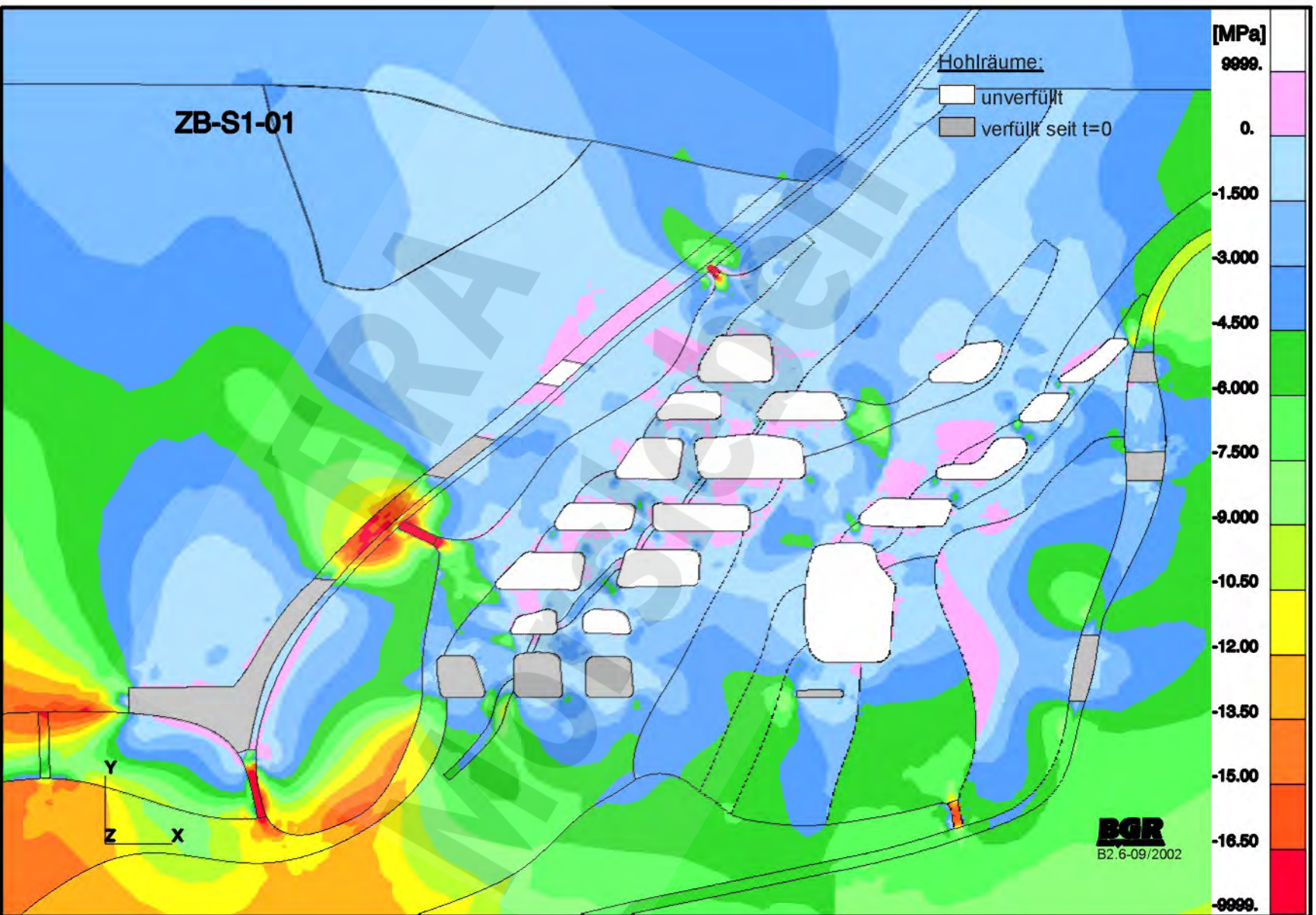


ZB-S1-01: Referenzmodell  
Verformte Struktur nach 65 Jahren (Ausschnitt)  
(Skalierungsfaktor = 10, unverformtes Modell = rot/blau, verformtes Modell = schwarz)

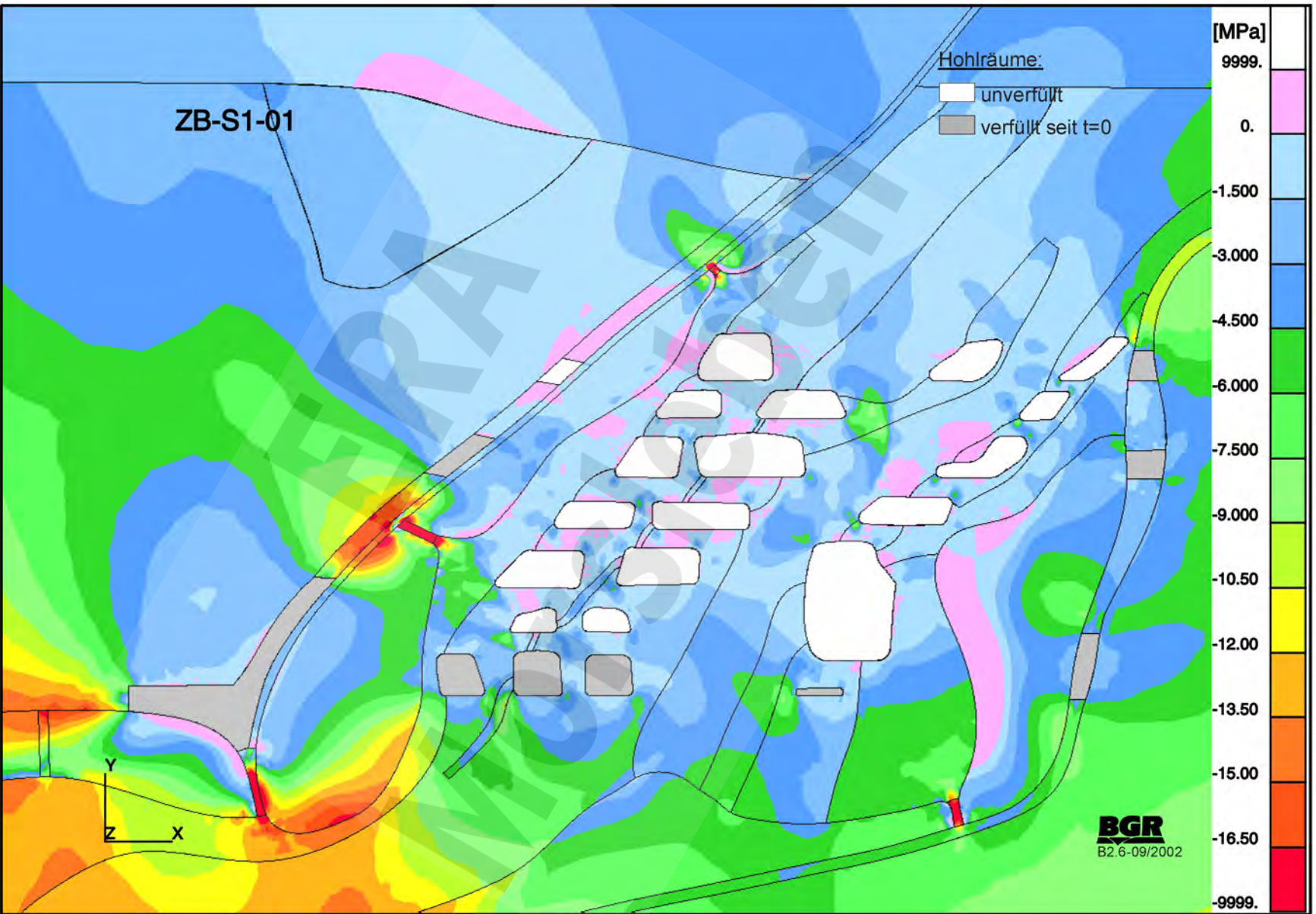


ZB-S1-01: Referenzmodell  
Verschiebungsvektoren nach 65 Jahren (Ausschnitt)

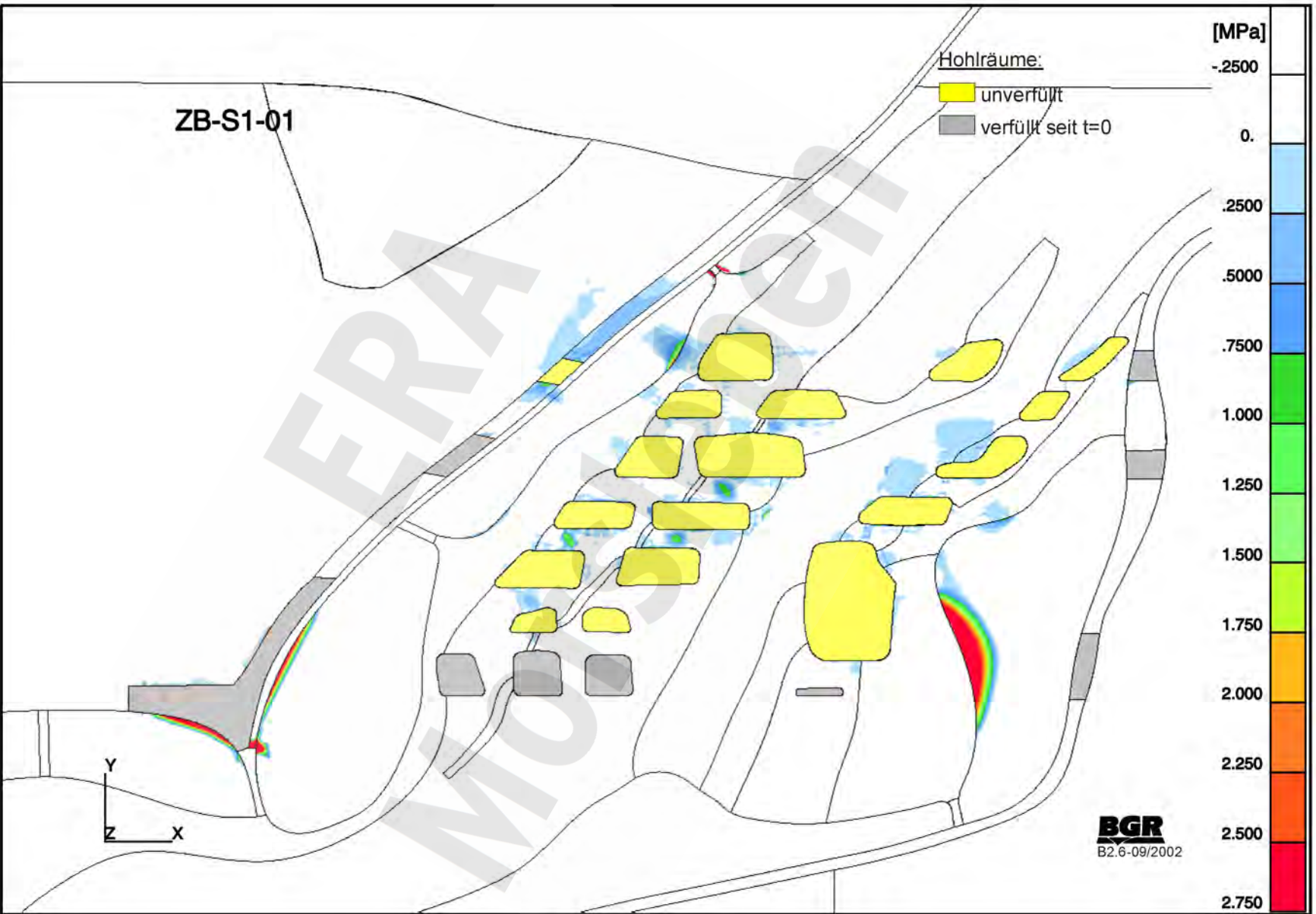




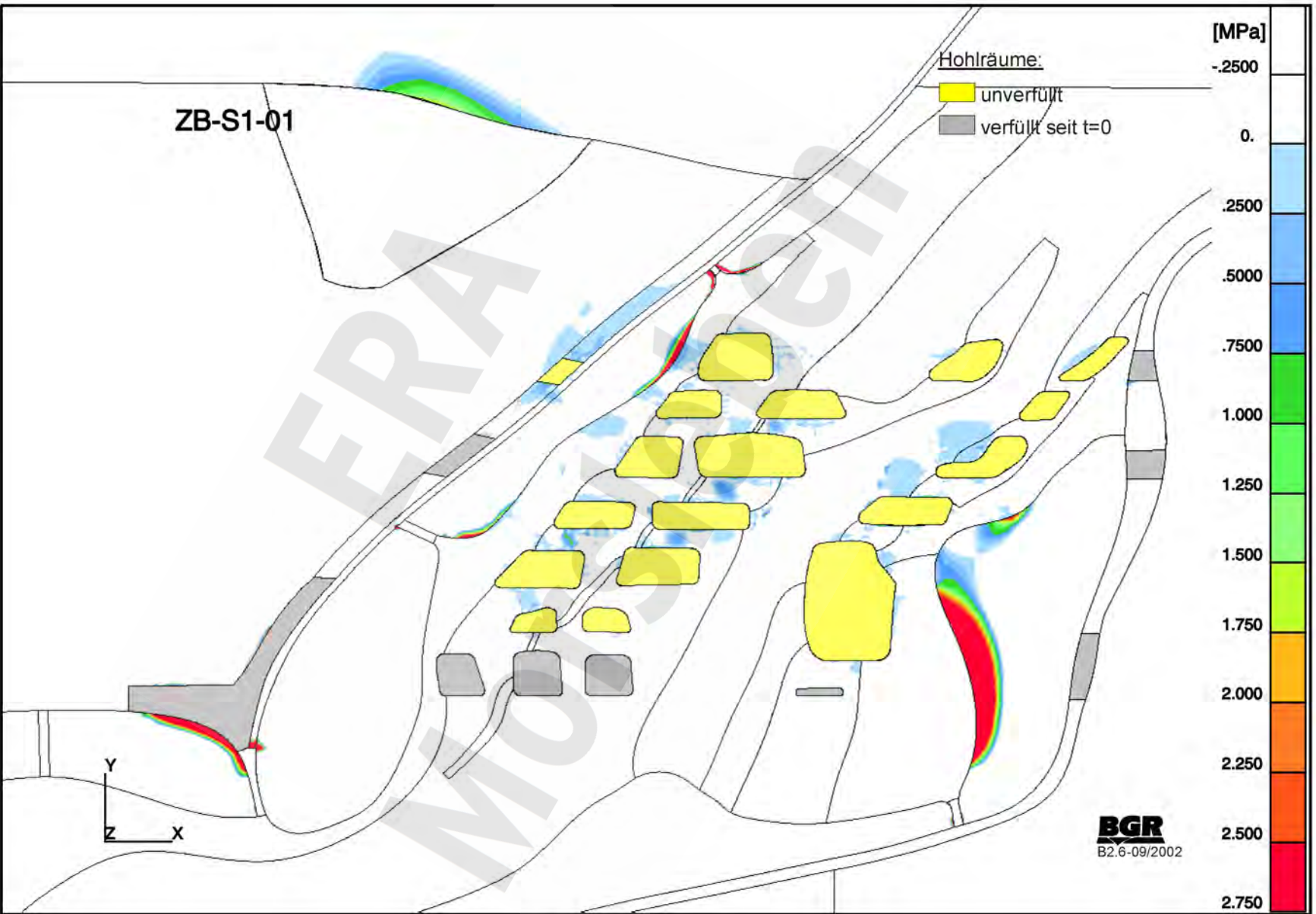
ZB-S1-01: Referenzmodell  
Kleinste Hauptdruckspannungen  $S_1$  nach 65 Jahren (Ausschnitt)



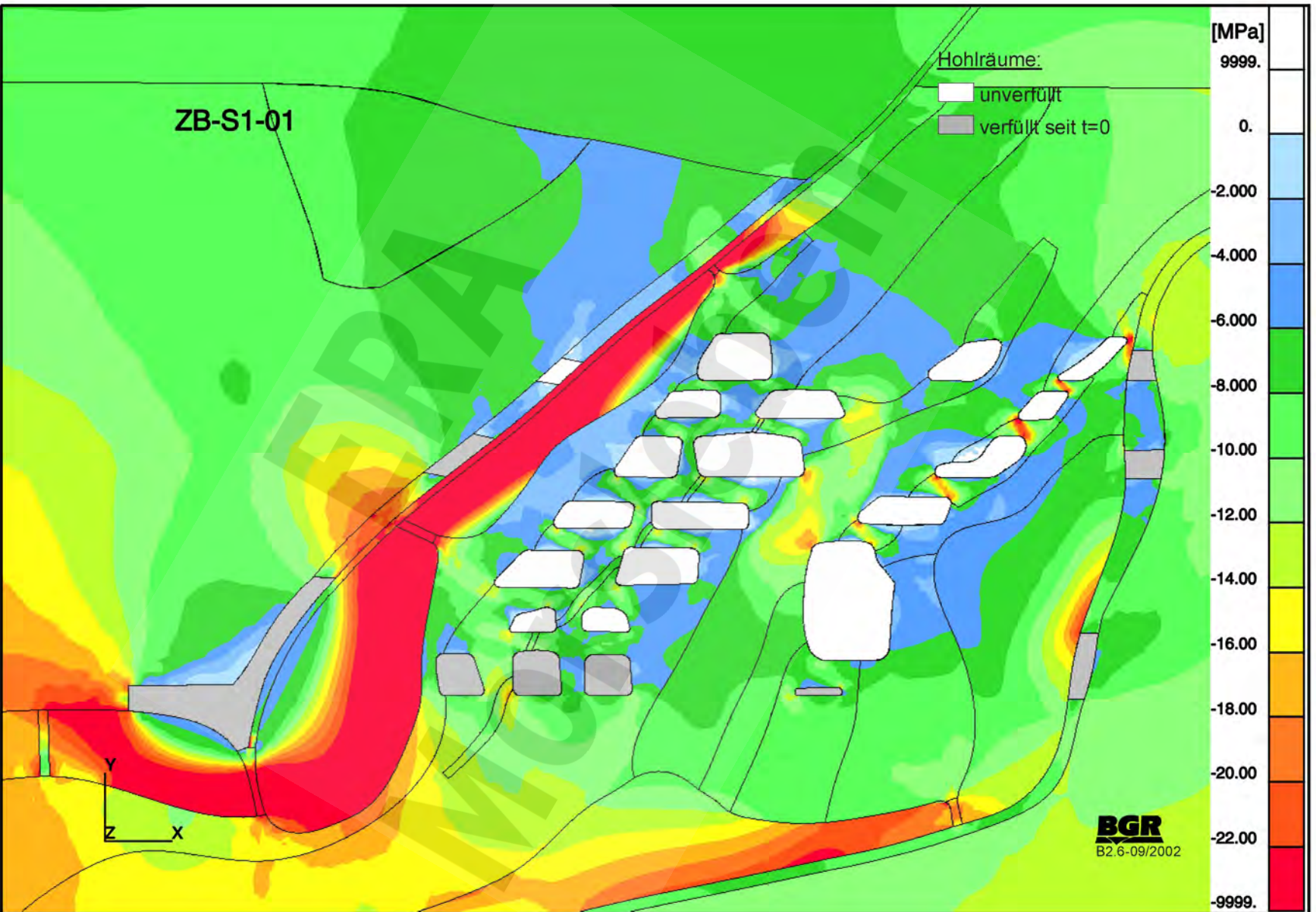
ZB-S1-01: Referenzmodell  
 Kleinste Hauptdruckspannungen S<sub>1</sub> nach 165 Jahren (Ausschnitt)



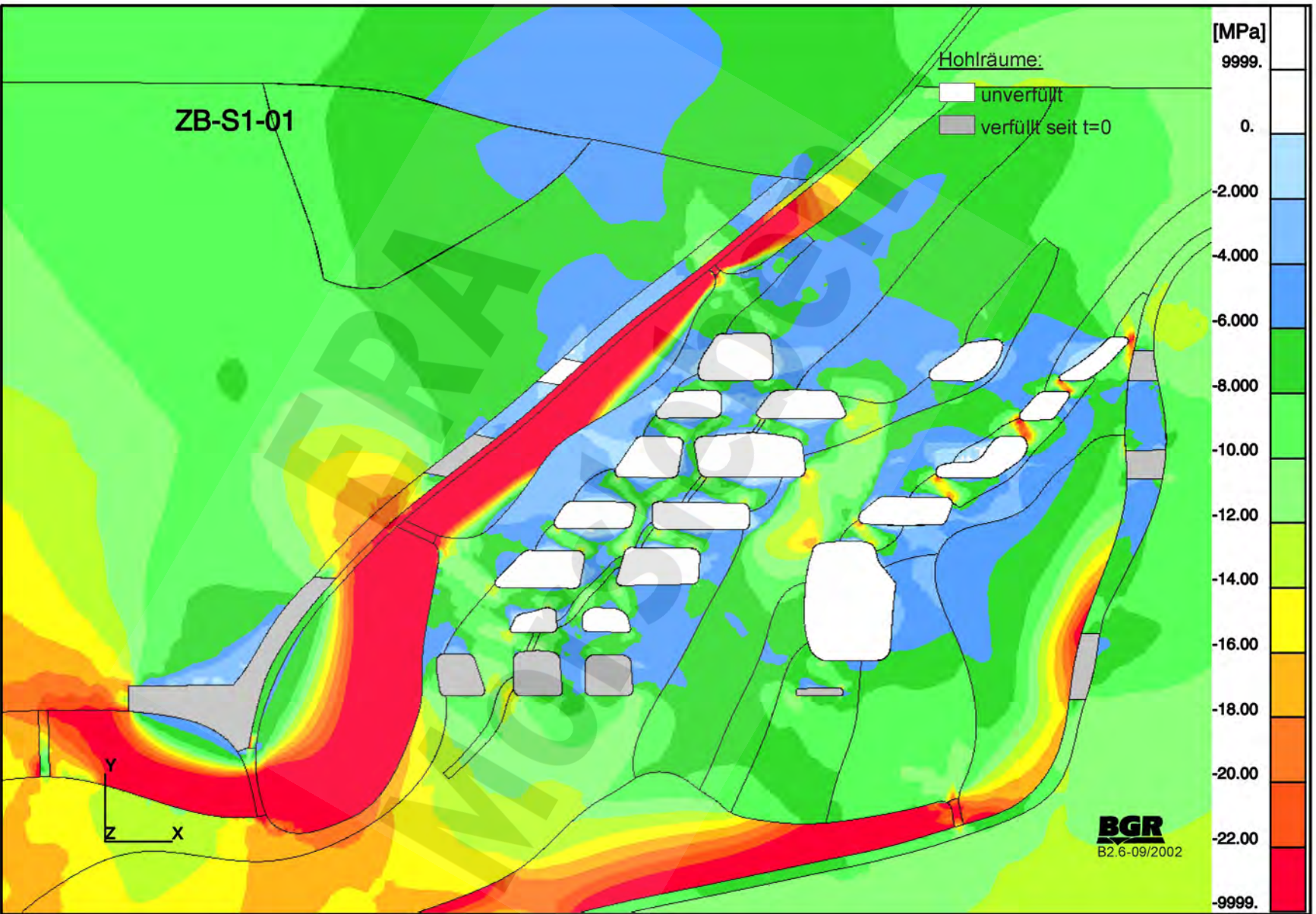
ZB-S1-01: Referenzmodell  
 Zugspannungen nach 65 Jahren (Ausschnitt)



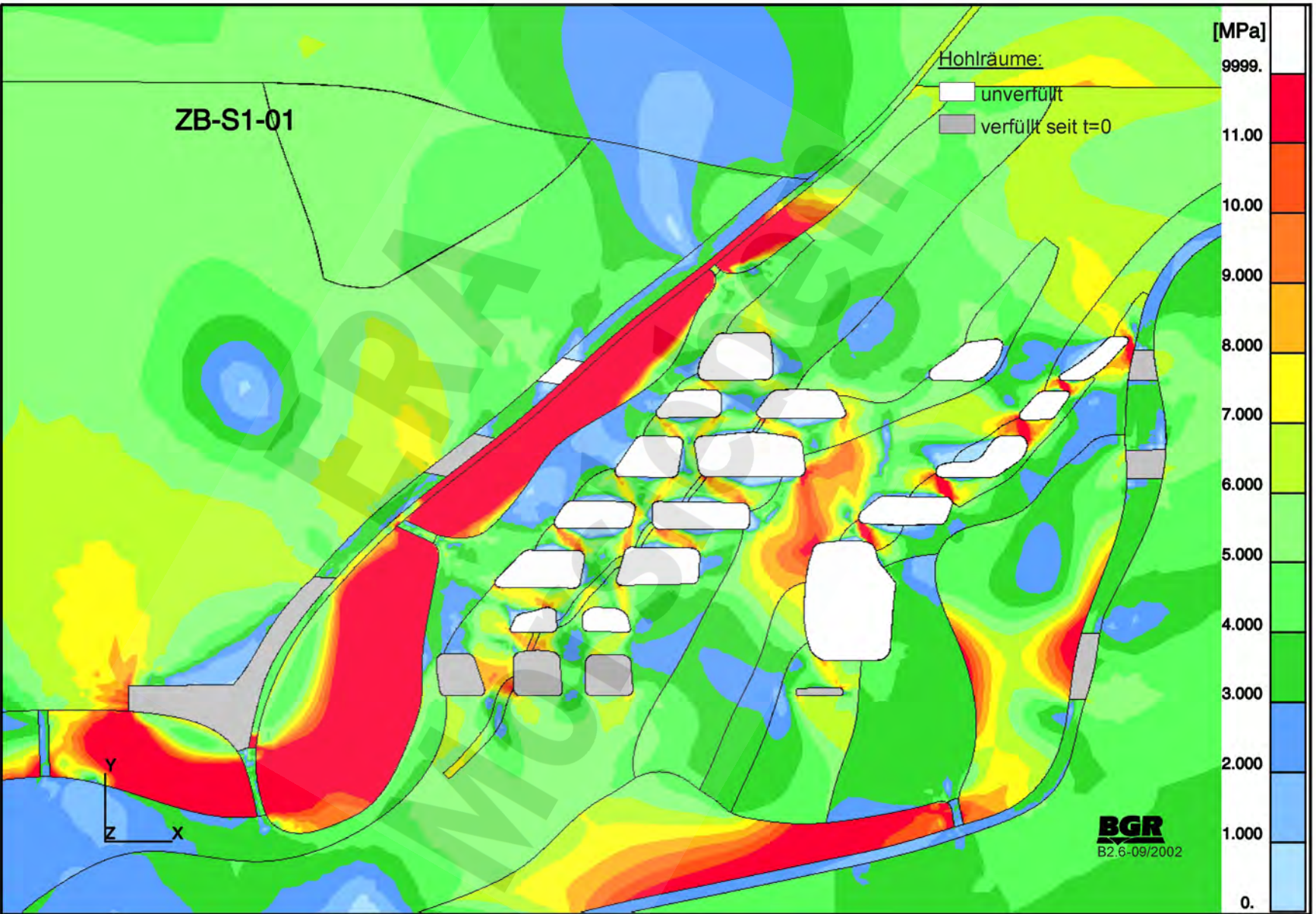
ZB-S1-01: Referenzmodell  
 Zugspannungen nach 165 Jahren (Ausschnitt)



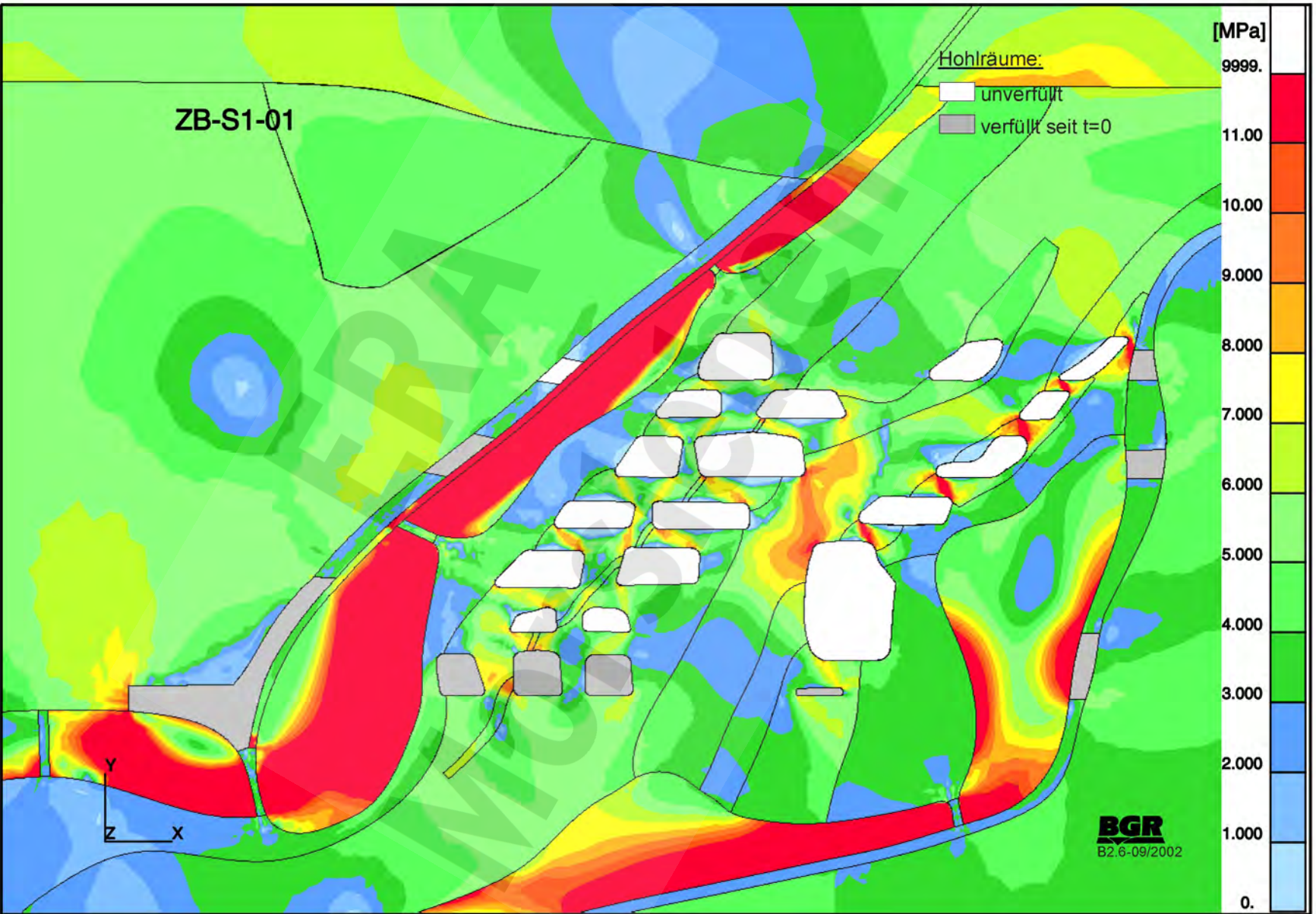
ZB-S1-01: Referenzmodell  
 Größte Hauptdruckspannungen S<sub>1</sub> nach 65 Jahren (Ausschnitt)



ZB-S1-01: Referenzmodell  
 Größte Hauptdruckspannungen S nach 165 Jahren (Ausschnitt)

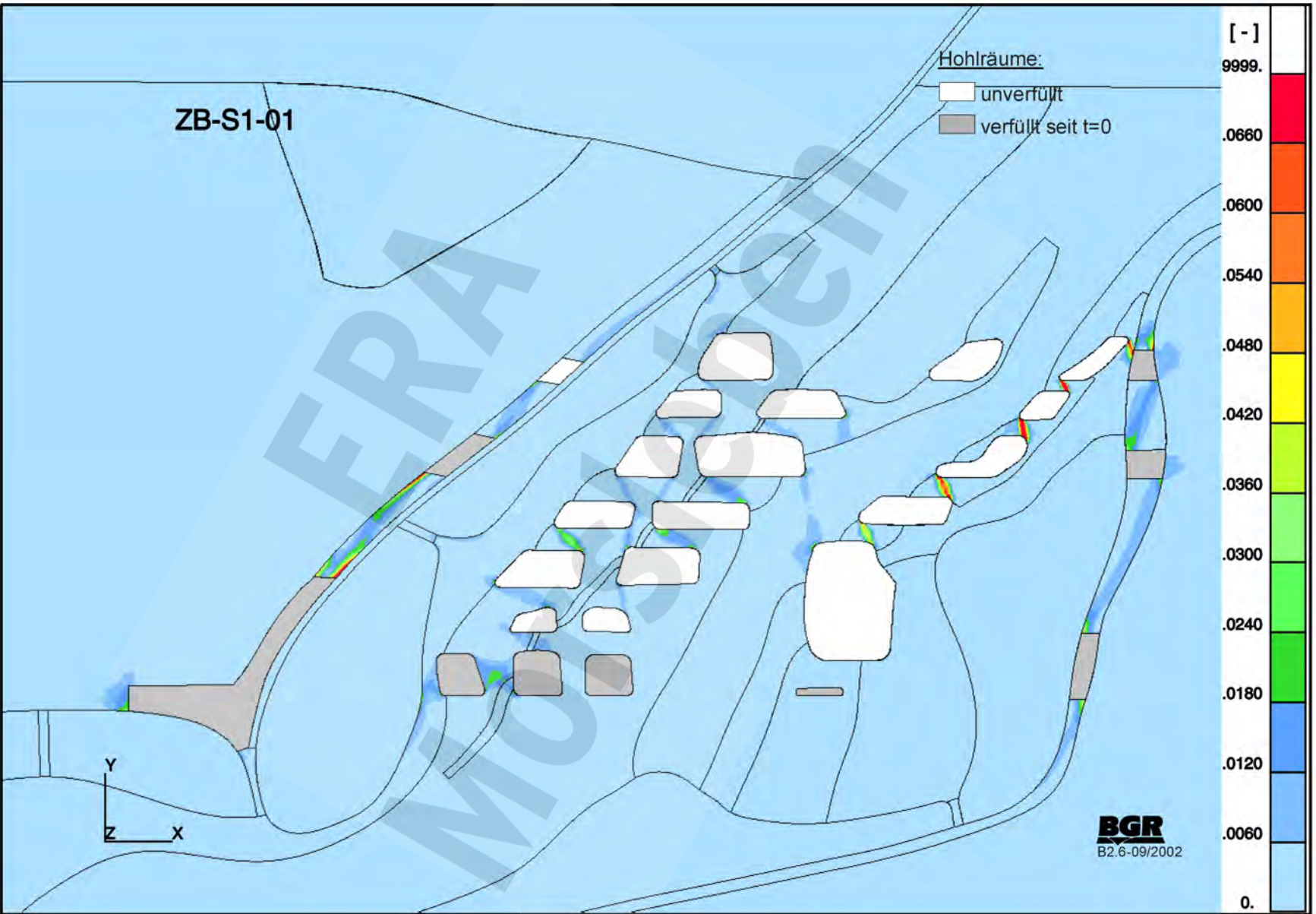


ZB-S1-01: Referenzmodell  
Effektivspannungen nach 65 Jahren (Ausschnitt)

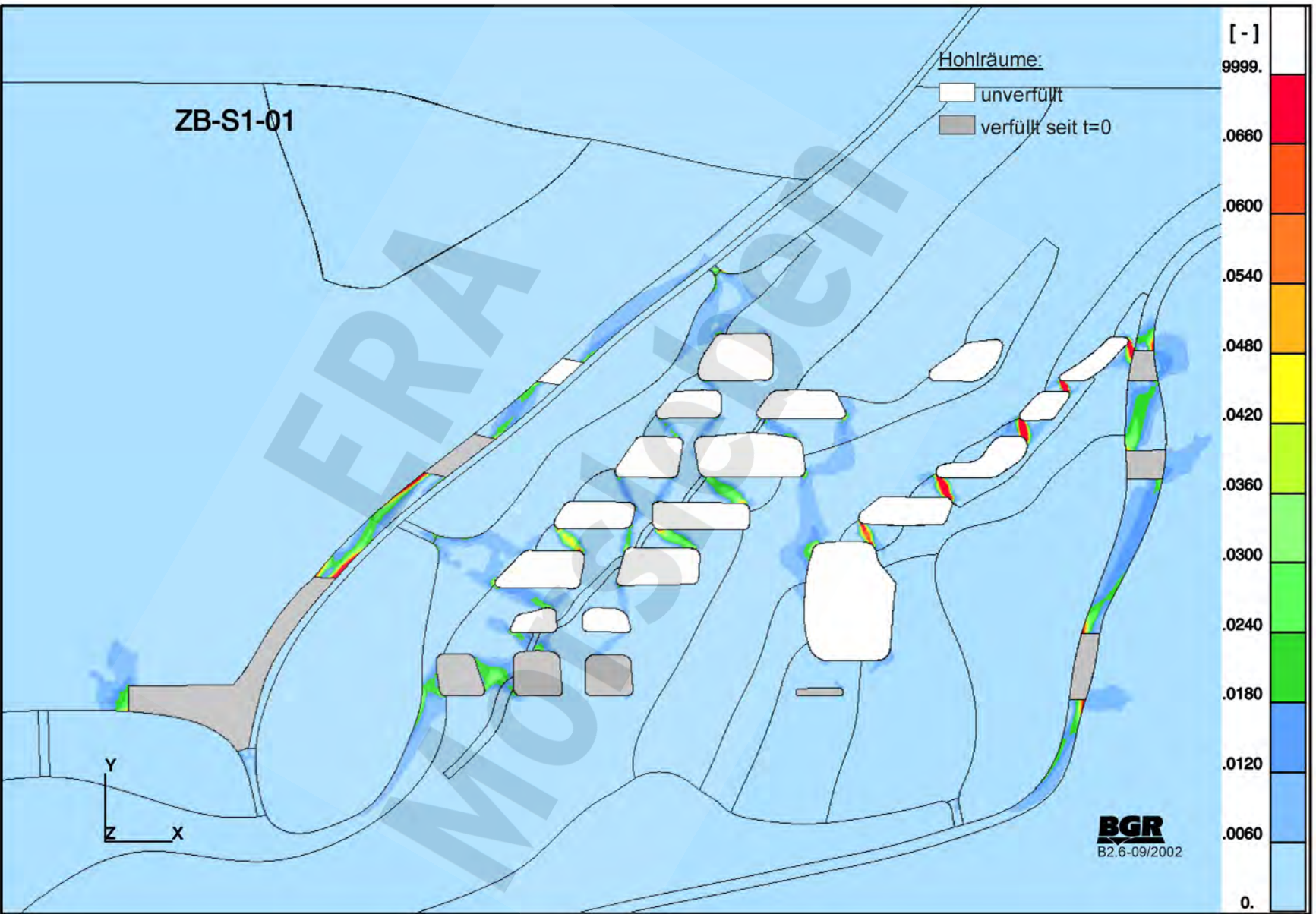


ZB-S1-01: Referenzmodell  
Effektivspannungen nach 165 Jahren (Ausschnitt)

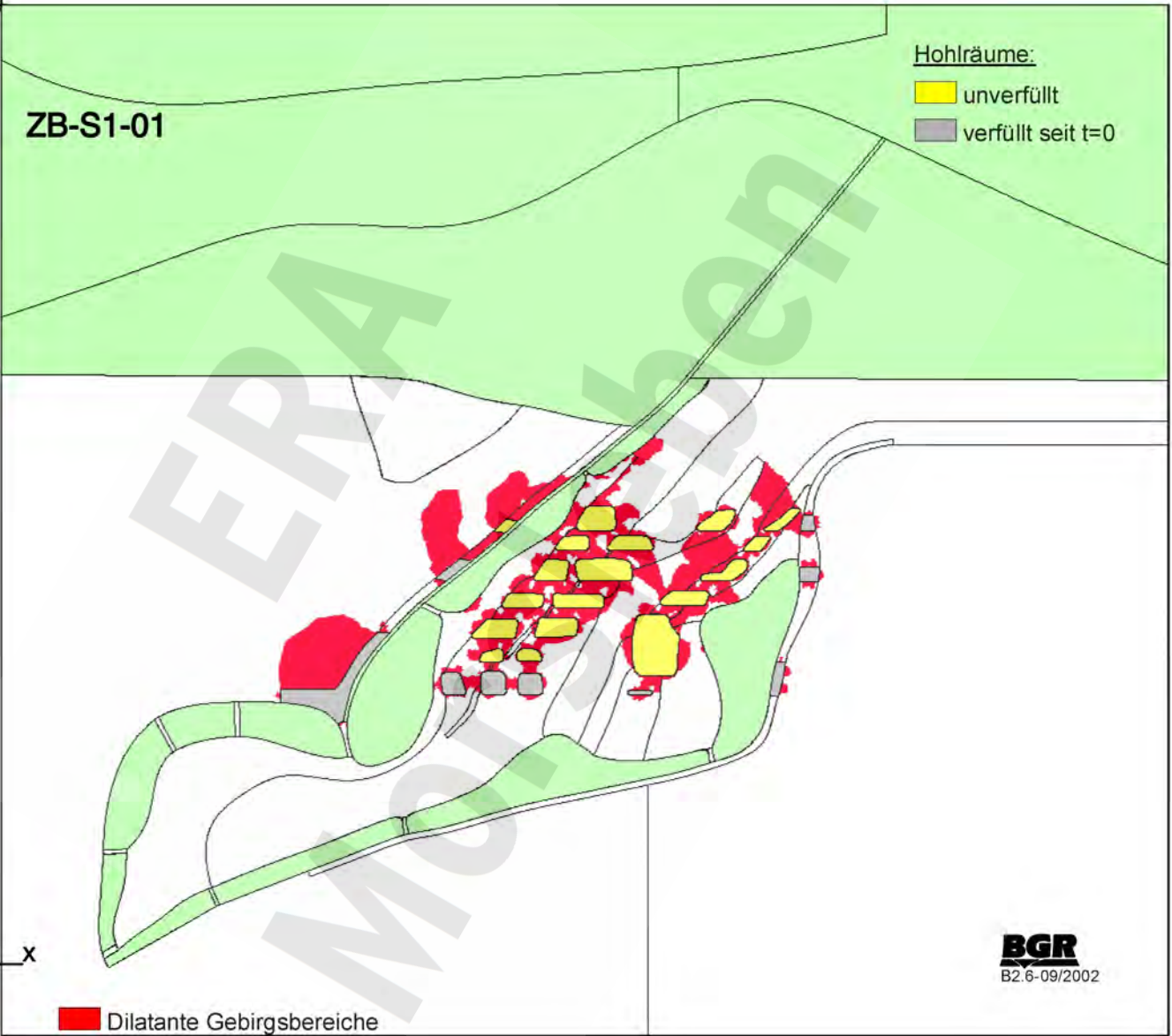




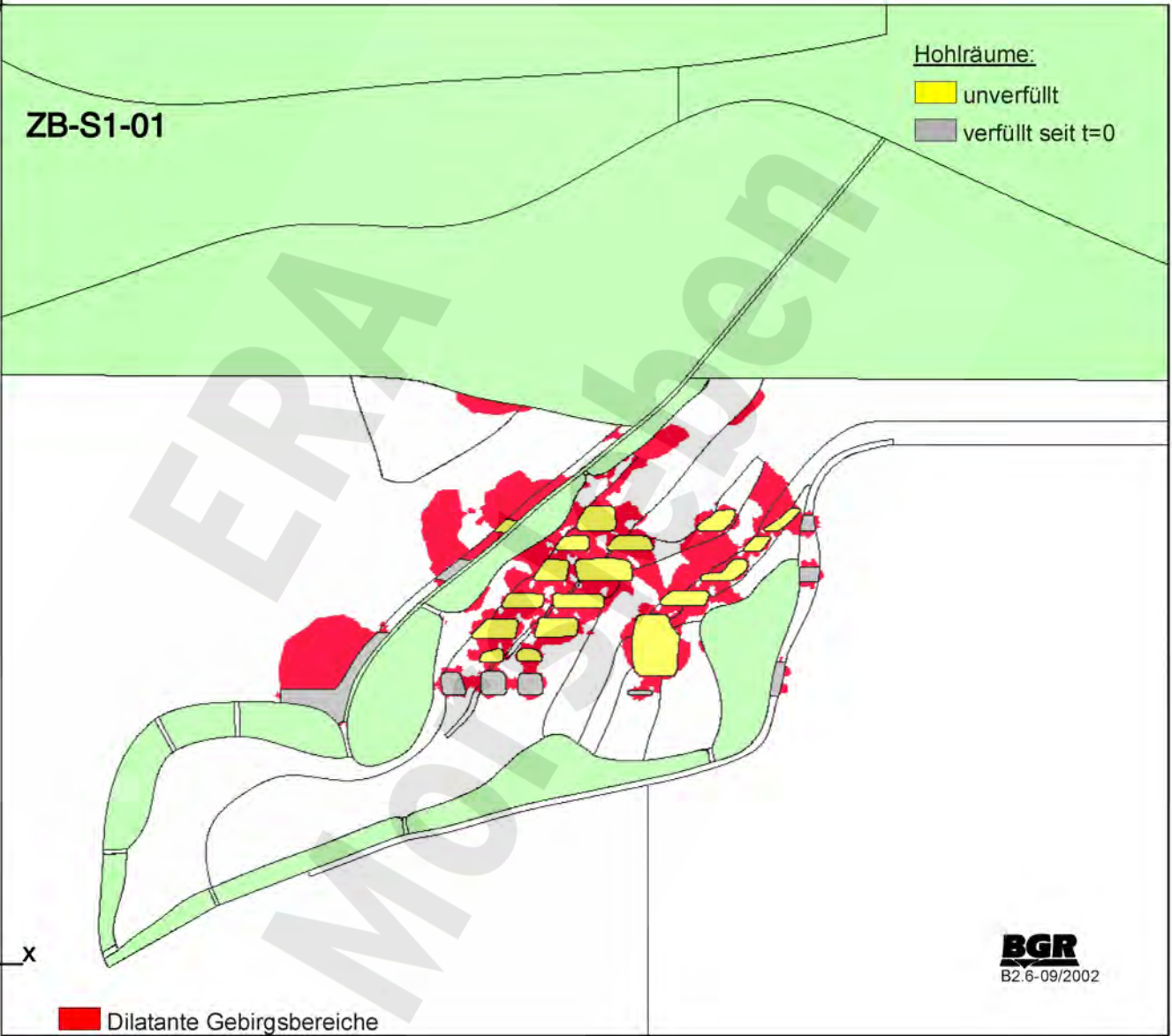
ZB-S1-01: Referenzmodell  
 Effektivverzerrungen nach 65 Jahren (Ausschnitt)



ZB-S1-01: Referenzmodell  
 Effektivverzerrungen nach 165 Jahren (Ausschnitt)

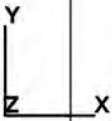


ZB-S1-01: Referenzmodell  
Dilatante Gebirgsbereiche nach 65 Jahren



ZB-S1-01

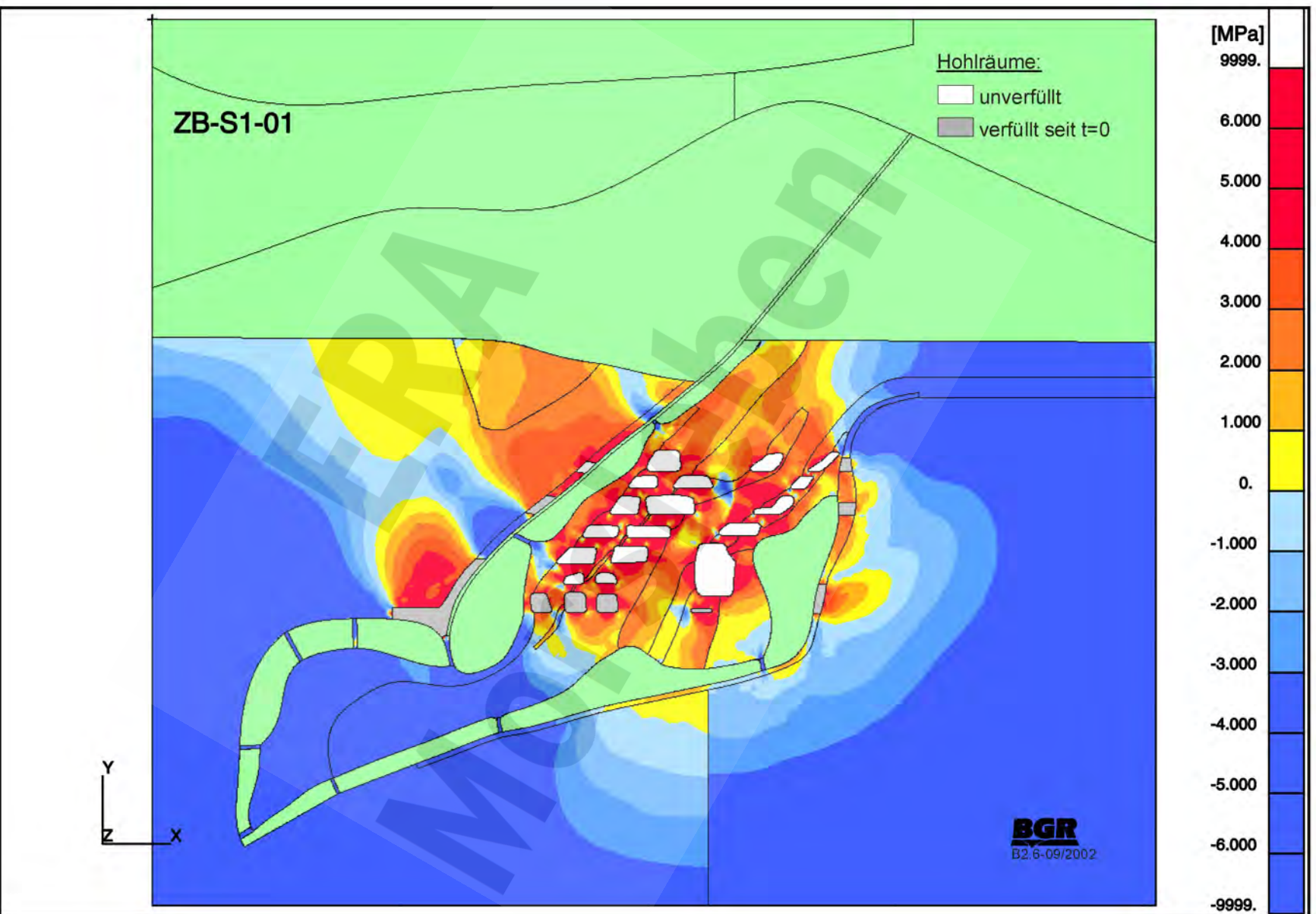
Hohlräume:  
 unverfüllt  
 verfüllt seit t=0



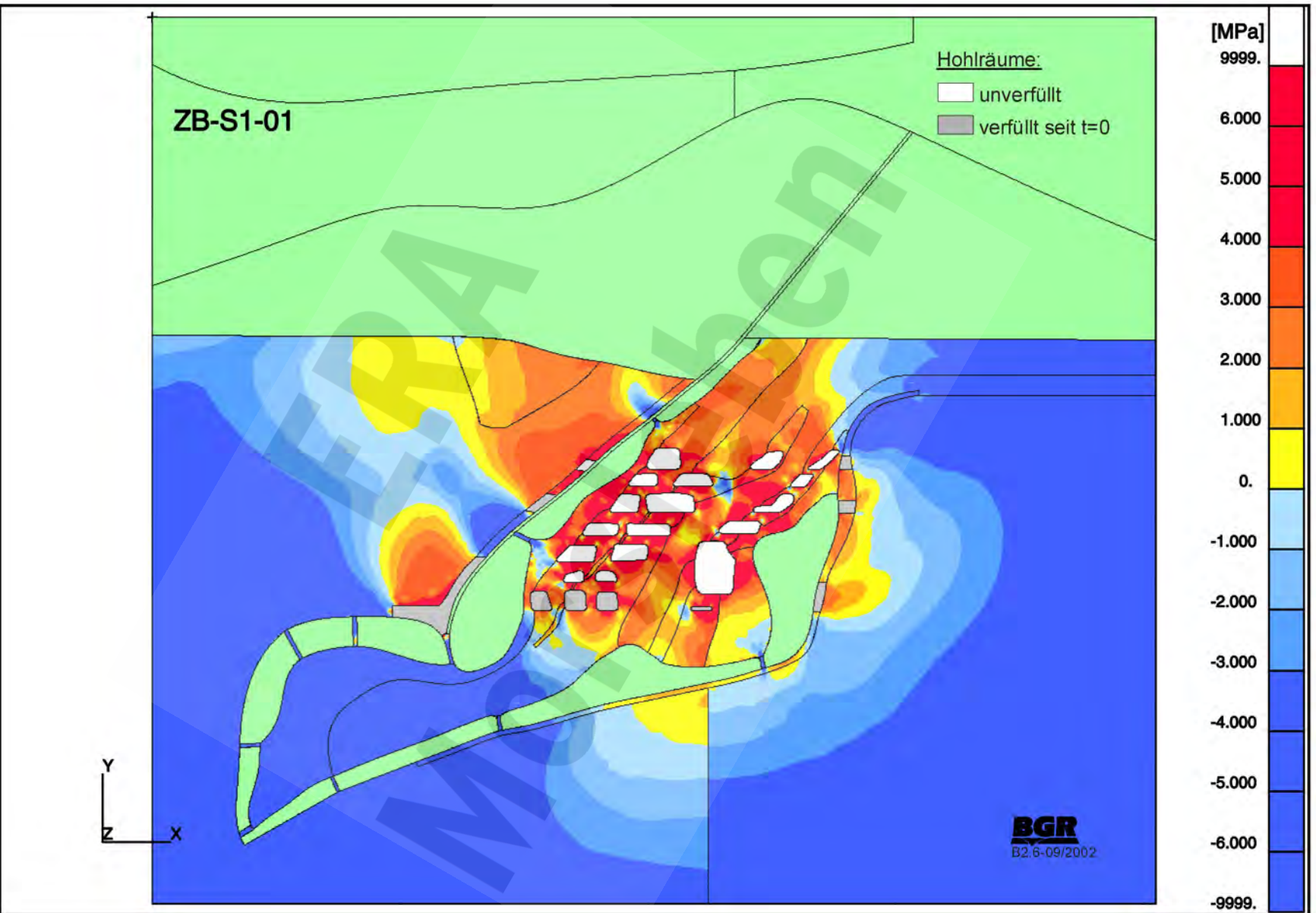
Dilatante Gebirgsbereiche

**BGR**  
 B2.6-09/2002

ZB-S1-01: Referenzmodell  
 Dilatante Gebirgsbereiche nach 165 Jahren

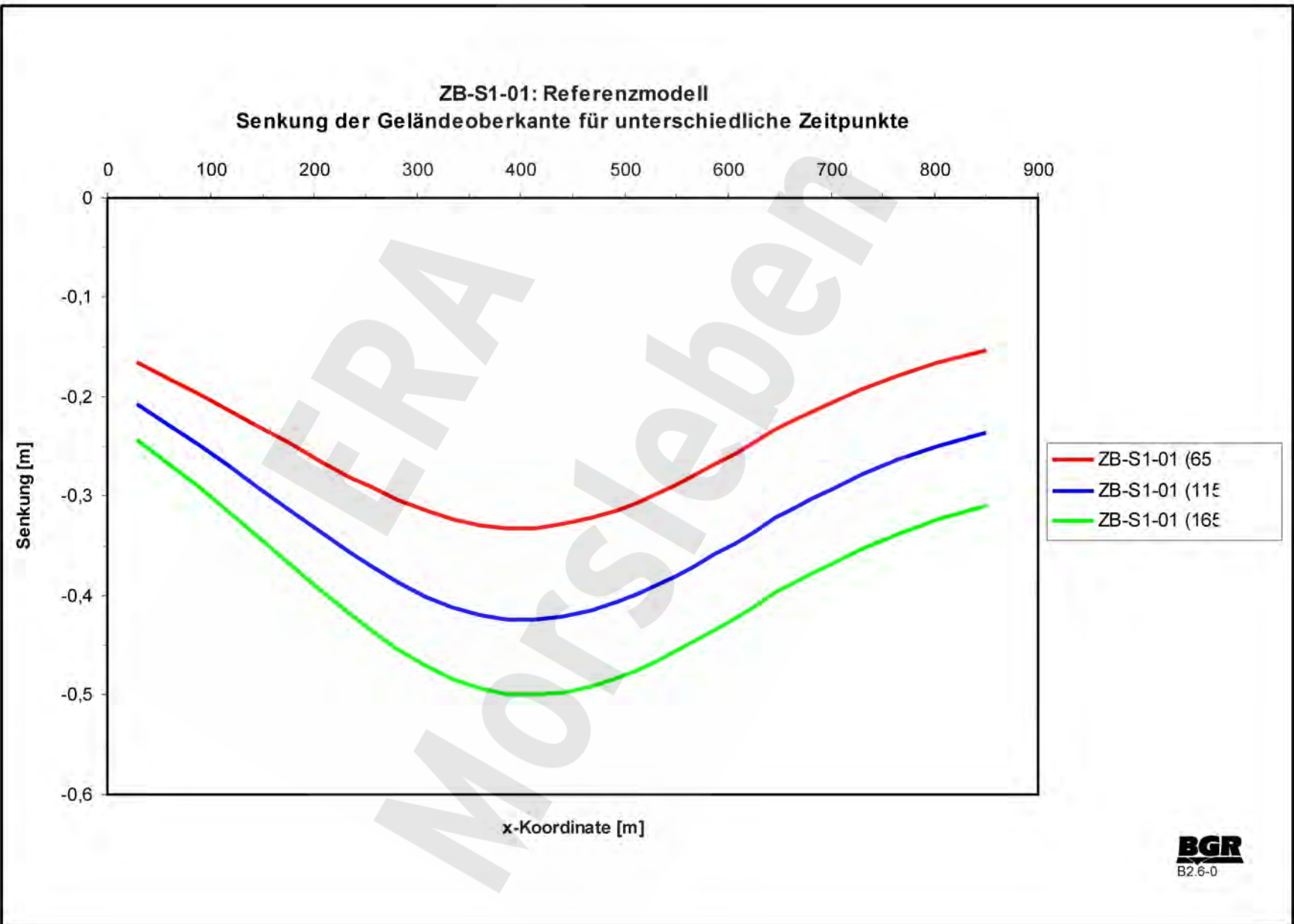


ZB-S1-01: Referenzmodell  
 Differenz zwischen Laugendruck und Kleinster Hauptdruckspannung nach 65 Jahren

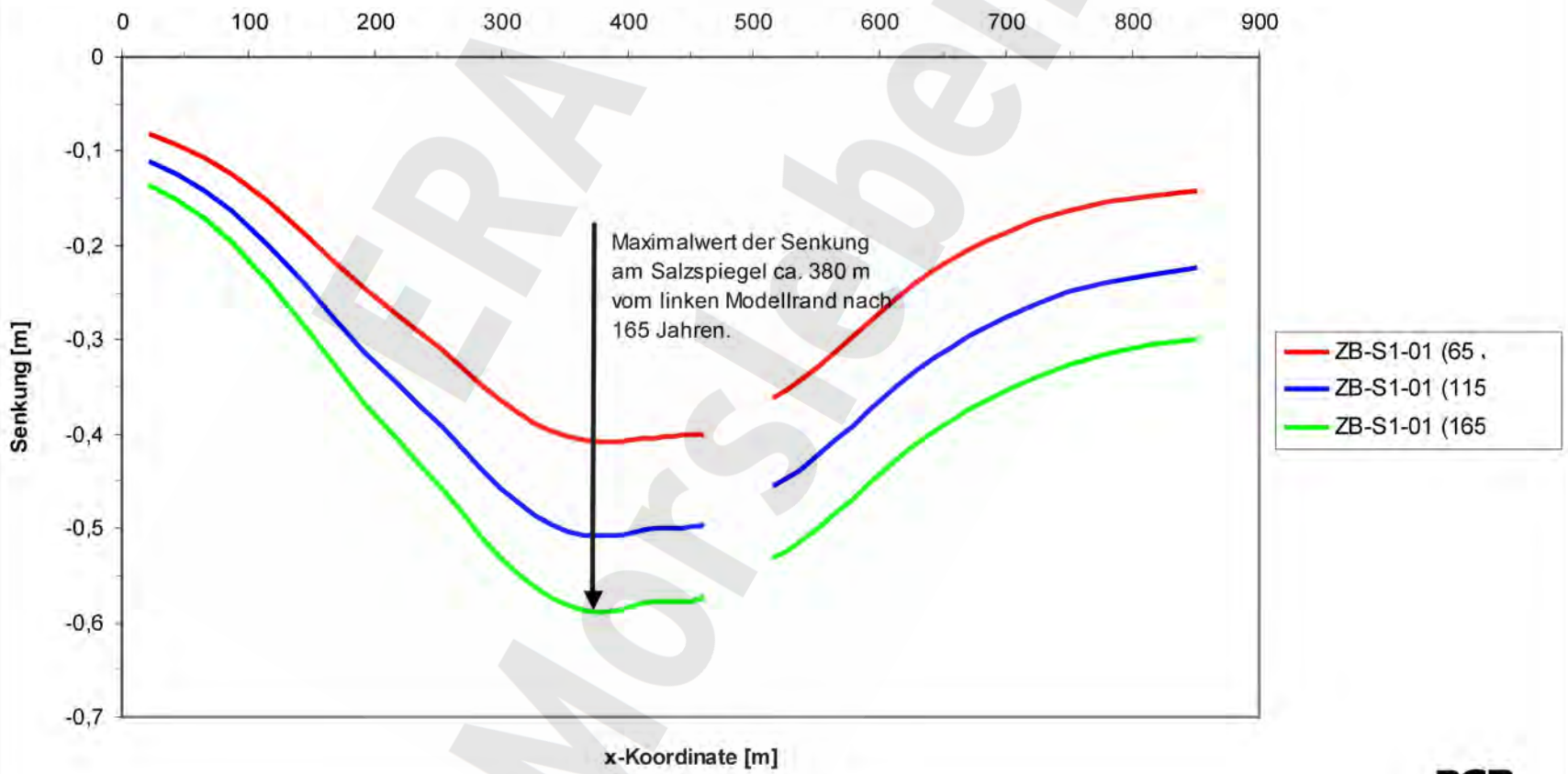


ZB-S1-01: Referenzmodell  
 Differenz zwischen Laugendruck und Kleinster Hauptdruckspannung nach 165 Jahren

ZB-S1-01: Referenzmodell  
Senkung der Geländeoberkante für unterschiedliche Zeitpunkte

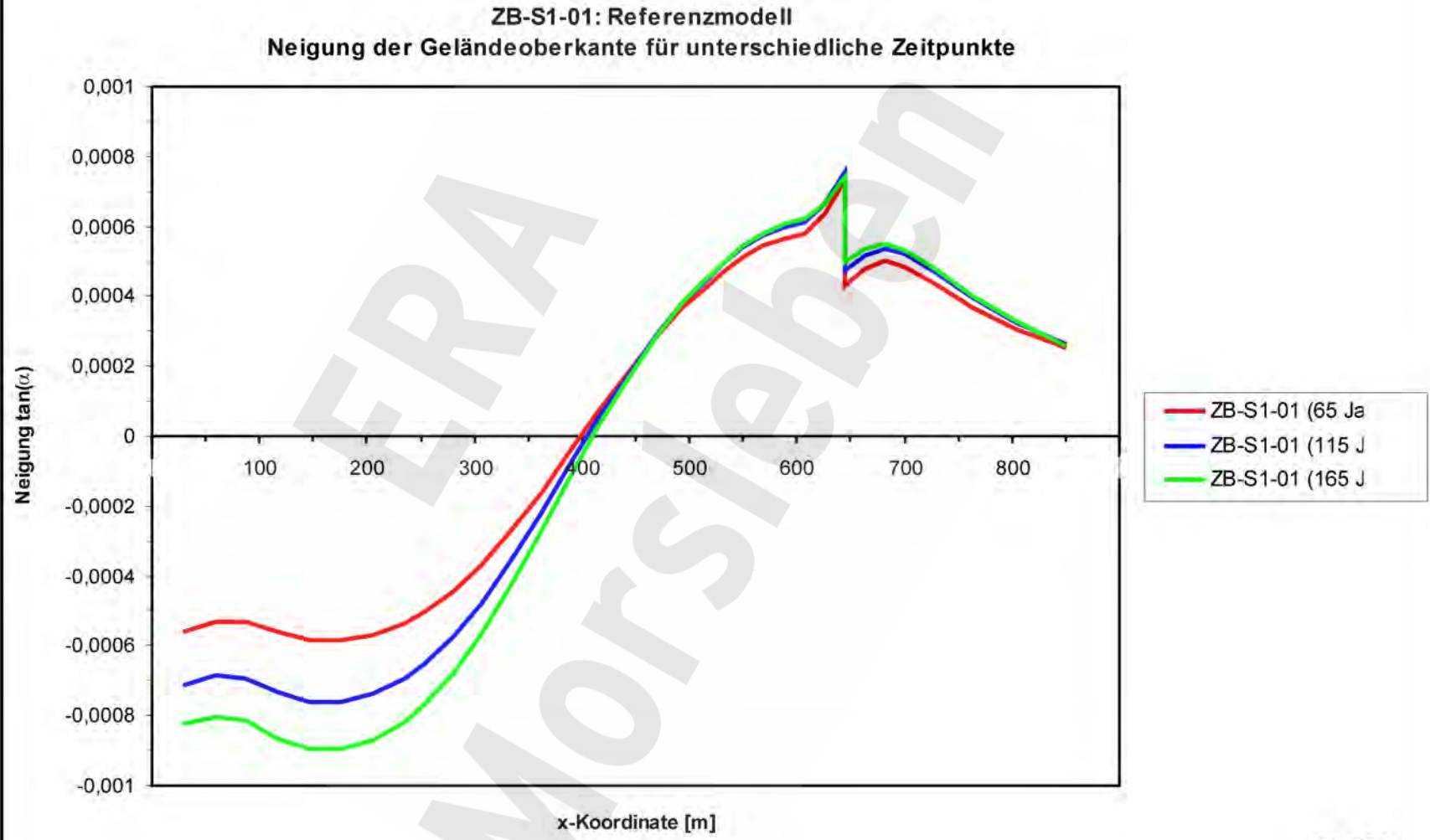


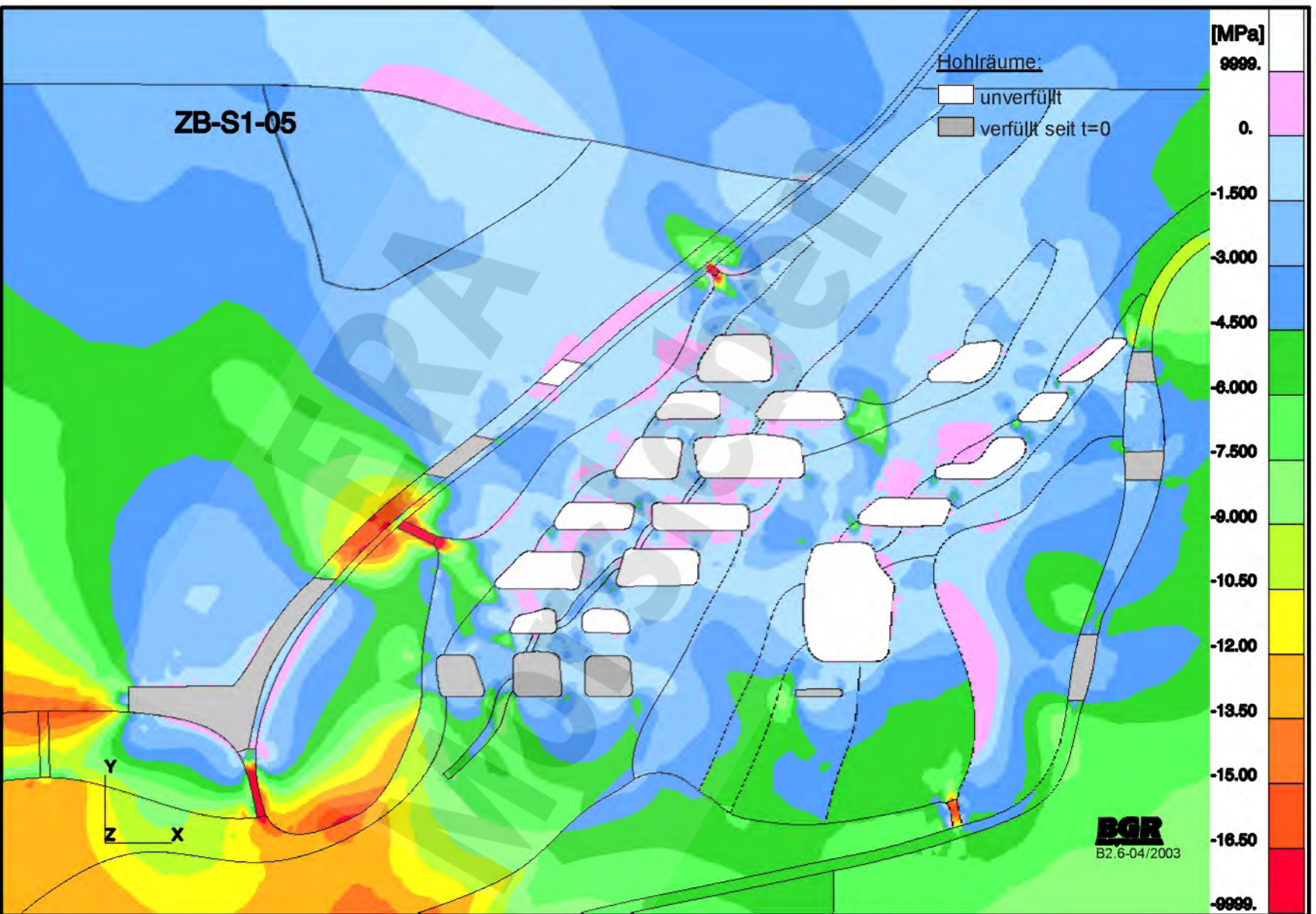
ZB-S1-01: Referenzmodell  
Senkung am Salzspiegel für unterschiedliche Zeitpunkte



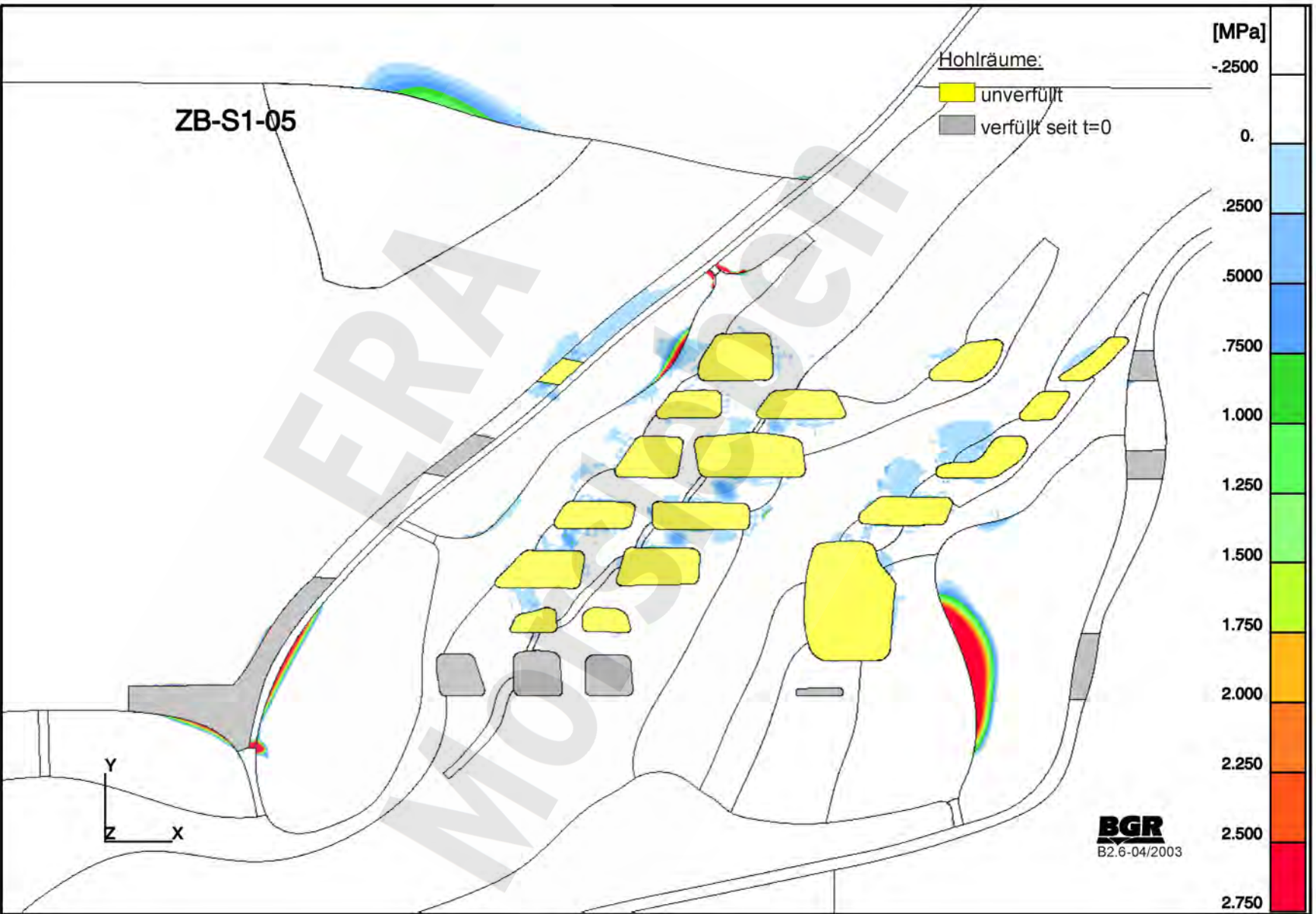


ZB-S1-01: Referenzmodell  
Neigung der Geländeoberkante für unterschiedliche Zeitpunkte

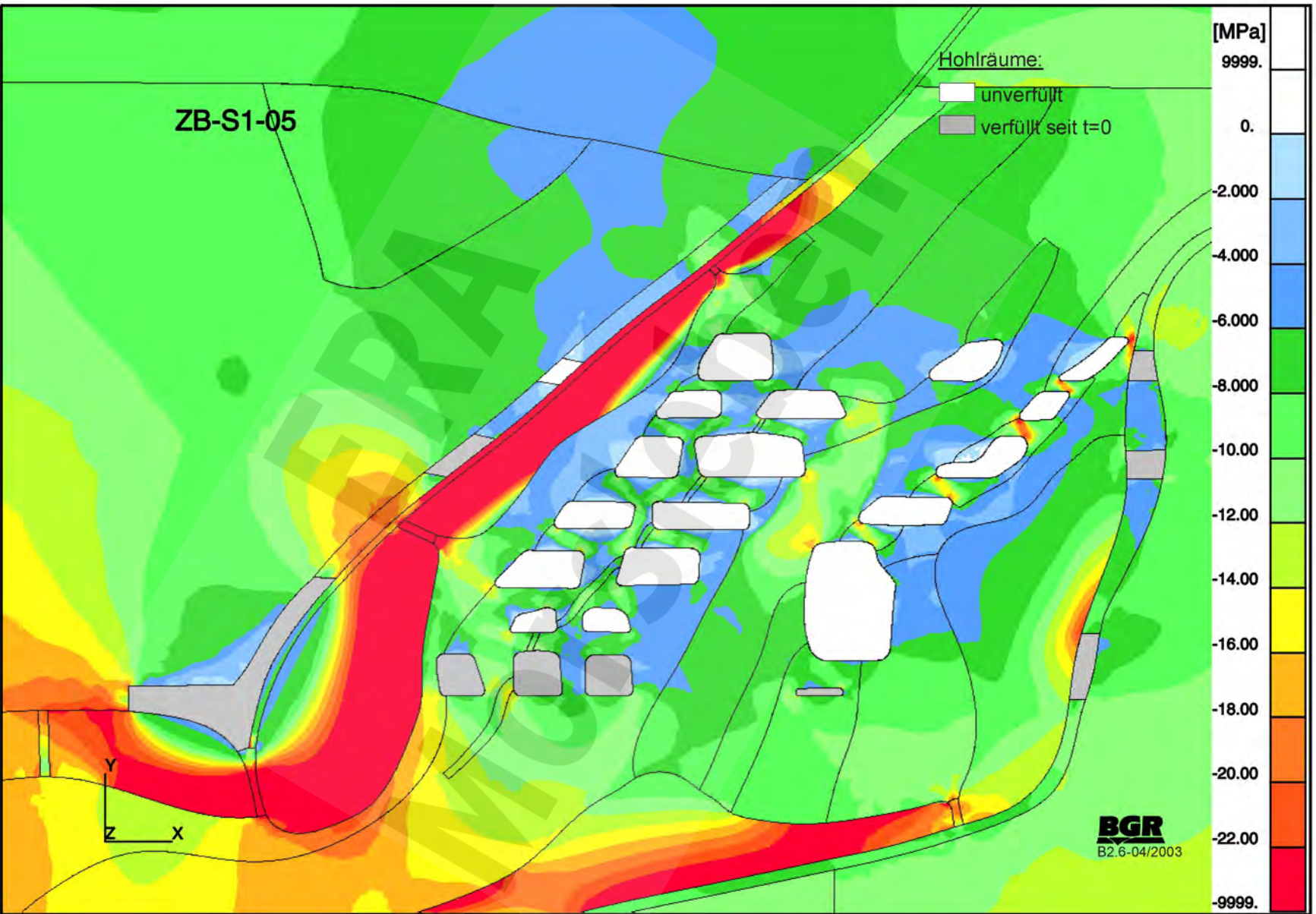




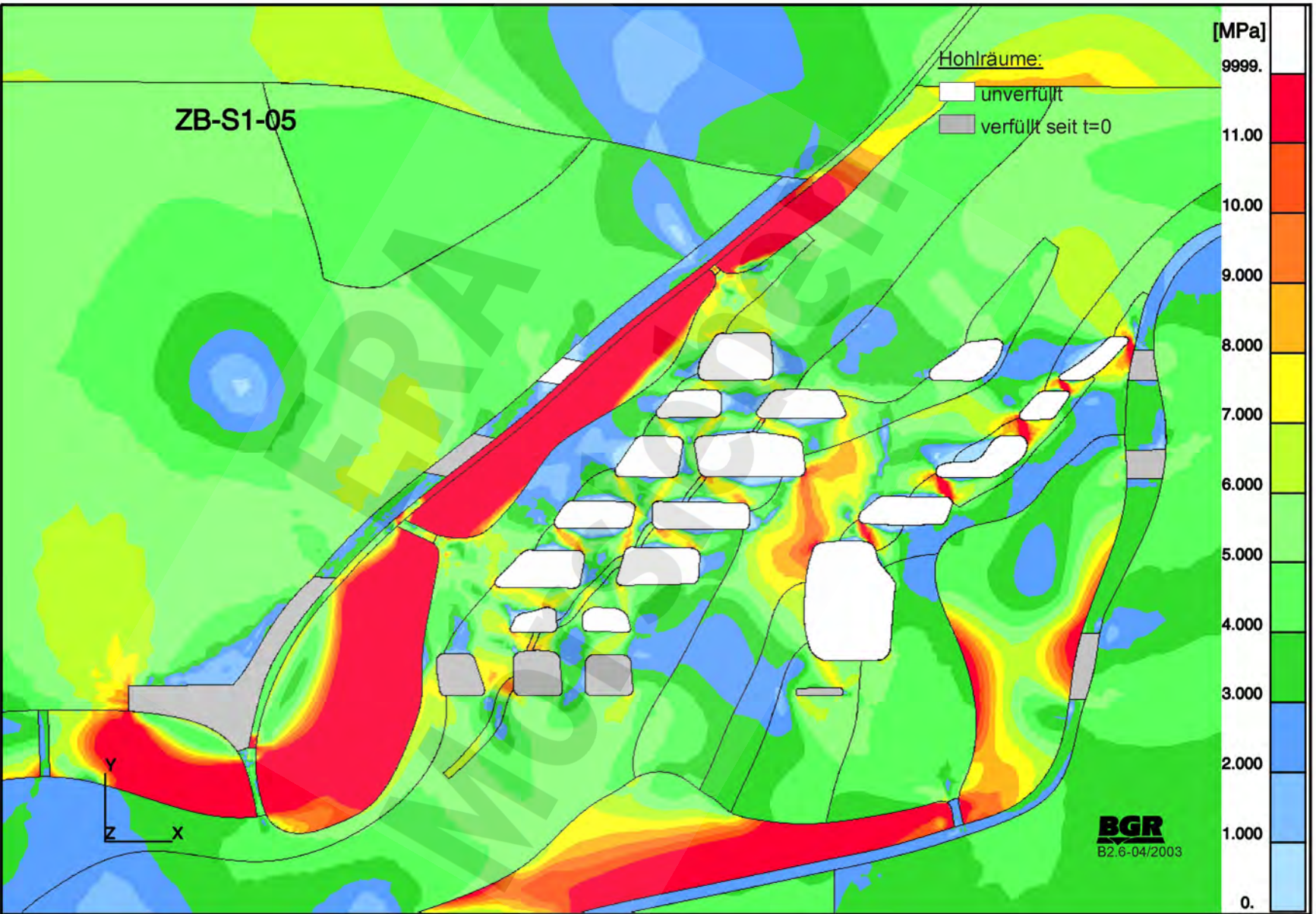
ZB-S1-05: Geringere Duktilität des Liniensalzes  
Kleinste Hauptdruckspannungen S<sub>1</sub> nach 165 Jahren (Ausschnitt)



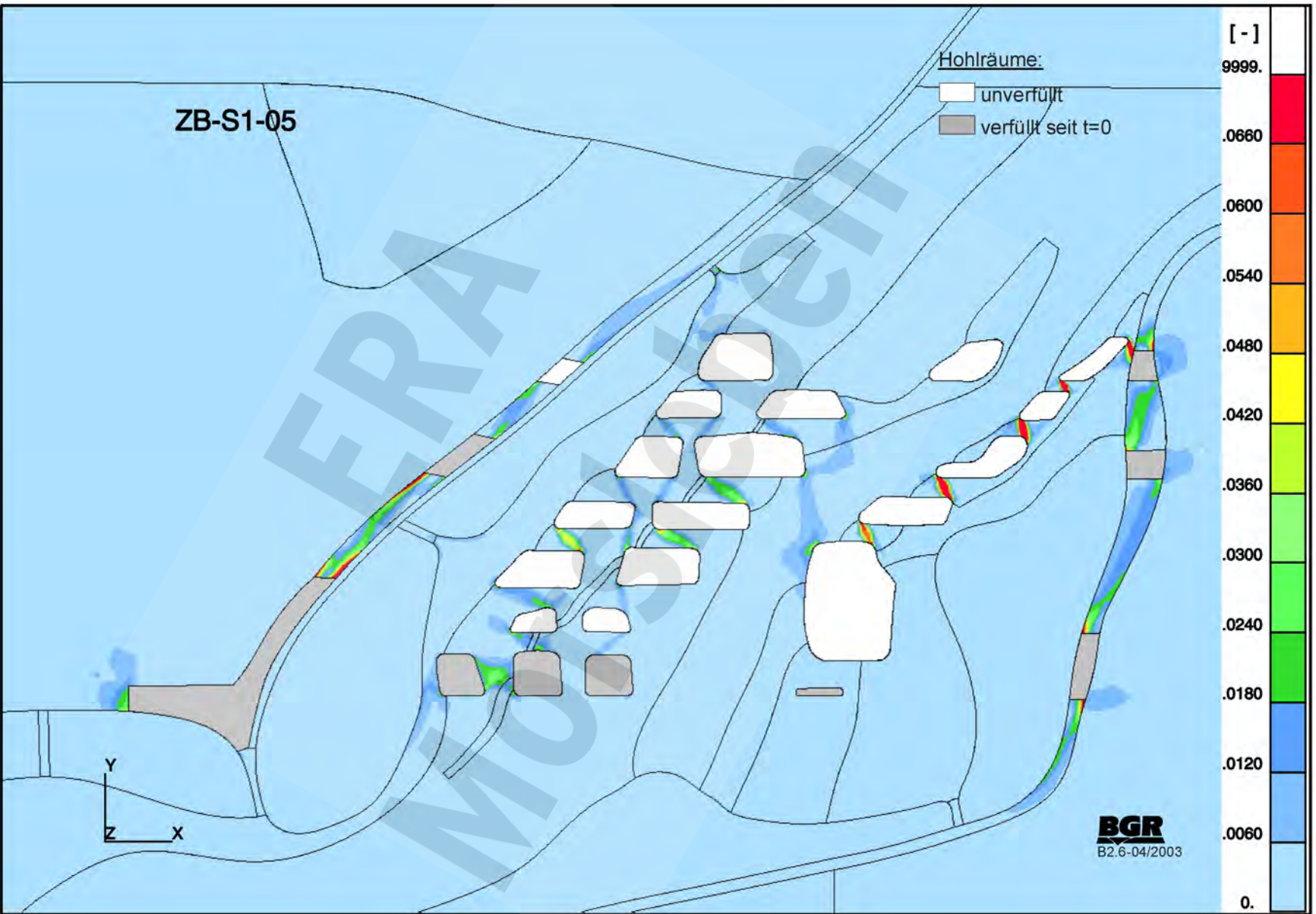
ZB-S1-05: Geringere Duktilität des Liniensalzes  
Zugspannungen nach 165 Jahren (Ausschnitt)



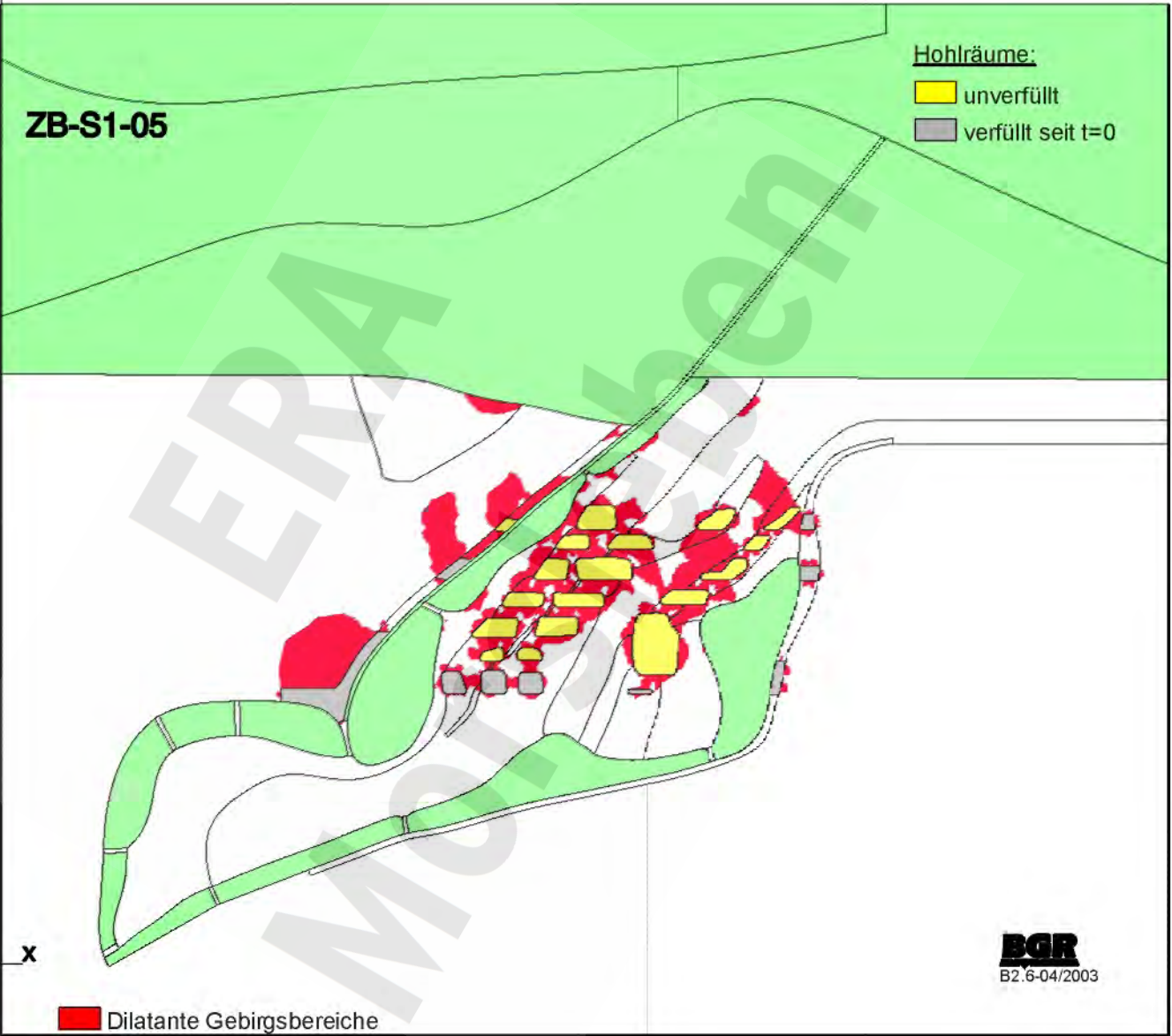
ZB-S1-05: Geringere Duktilität des Liniensalzes  
 Größte Hauptdruckspannungen S<sub>1</sub> nach 165 Jahren (Ausschnitt)



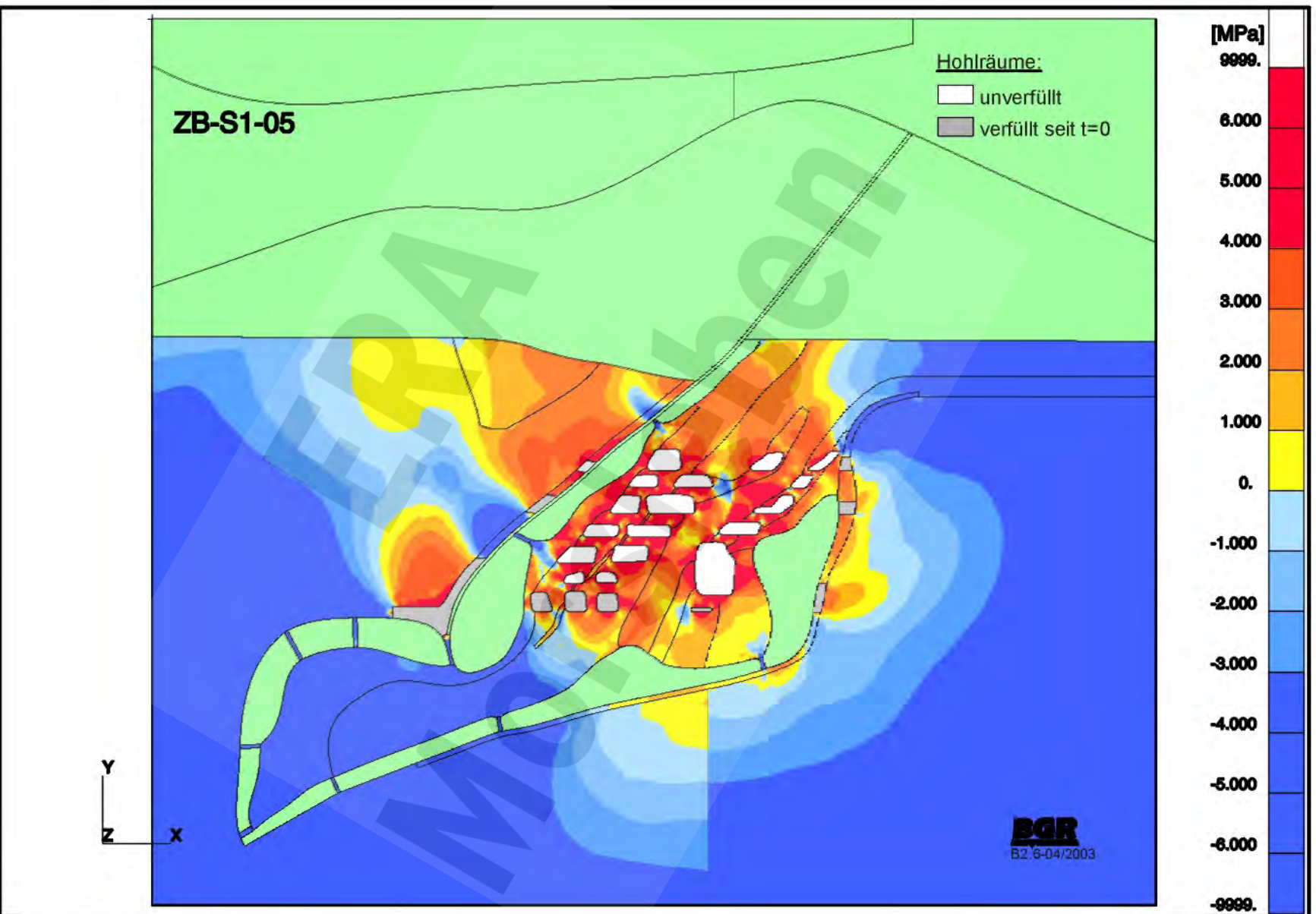
ZB-S1-05: Geringere Duktilität des Linienzsalzes  
 Effektivspannungen nach 165 Jahren (Ausschnitt)



ZB-S1-05: Geringere Duktilität des Liniensalzes  
Effektiververzerrungen nach 165 Jahren (Ausschnitt)



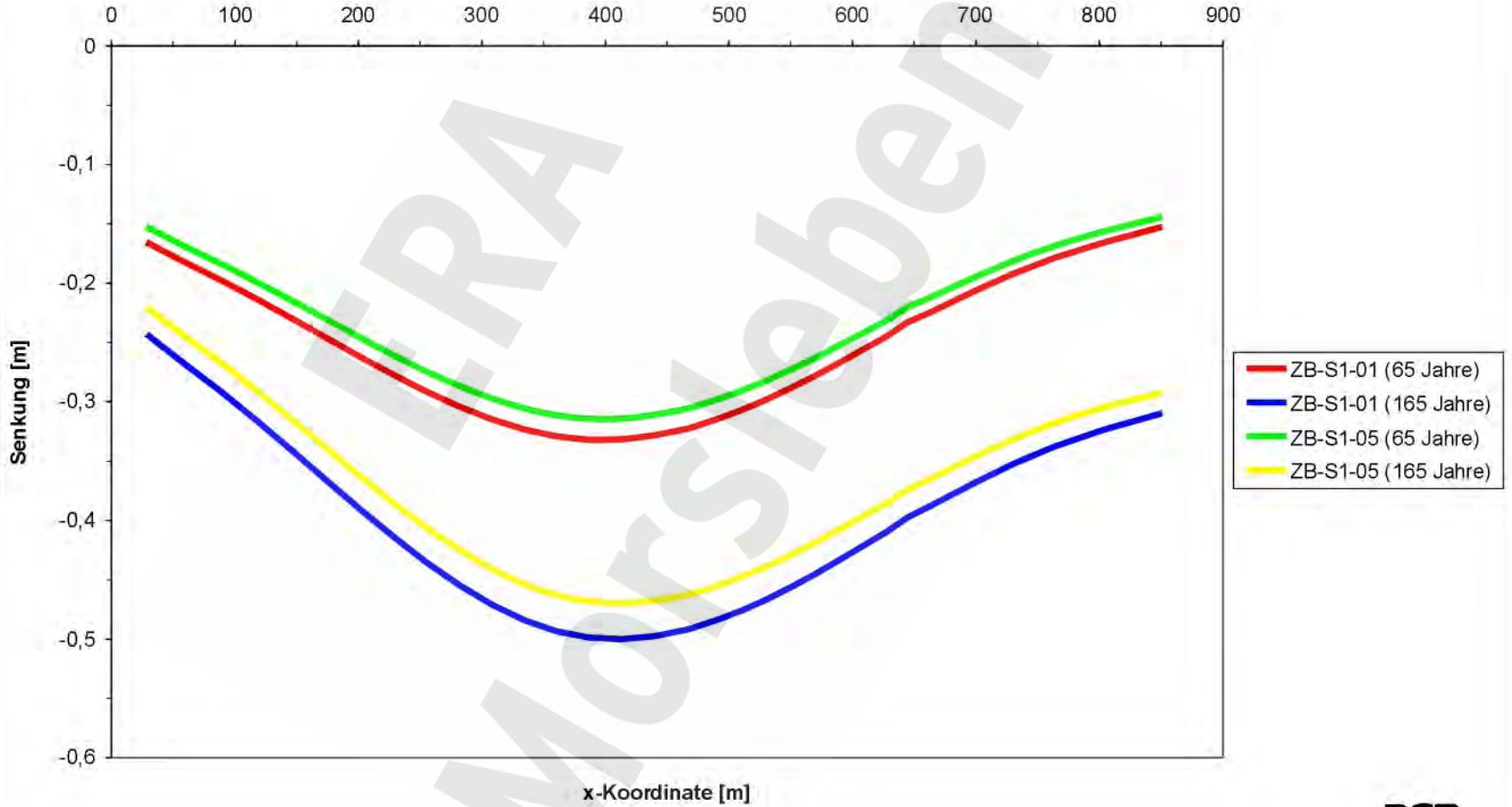
ZB-S1-05: Geringere Duktilität des Liniensalzes  
 Dilatante Gebirgsbereiche nach 165 Jahren



ZB-S1-05: Geringere Duktilität des Liniensalzes  
 Differenz zwischen Laugendruck und kleinster Hauptdruckspannung nach 165 Jahren

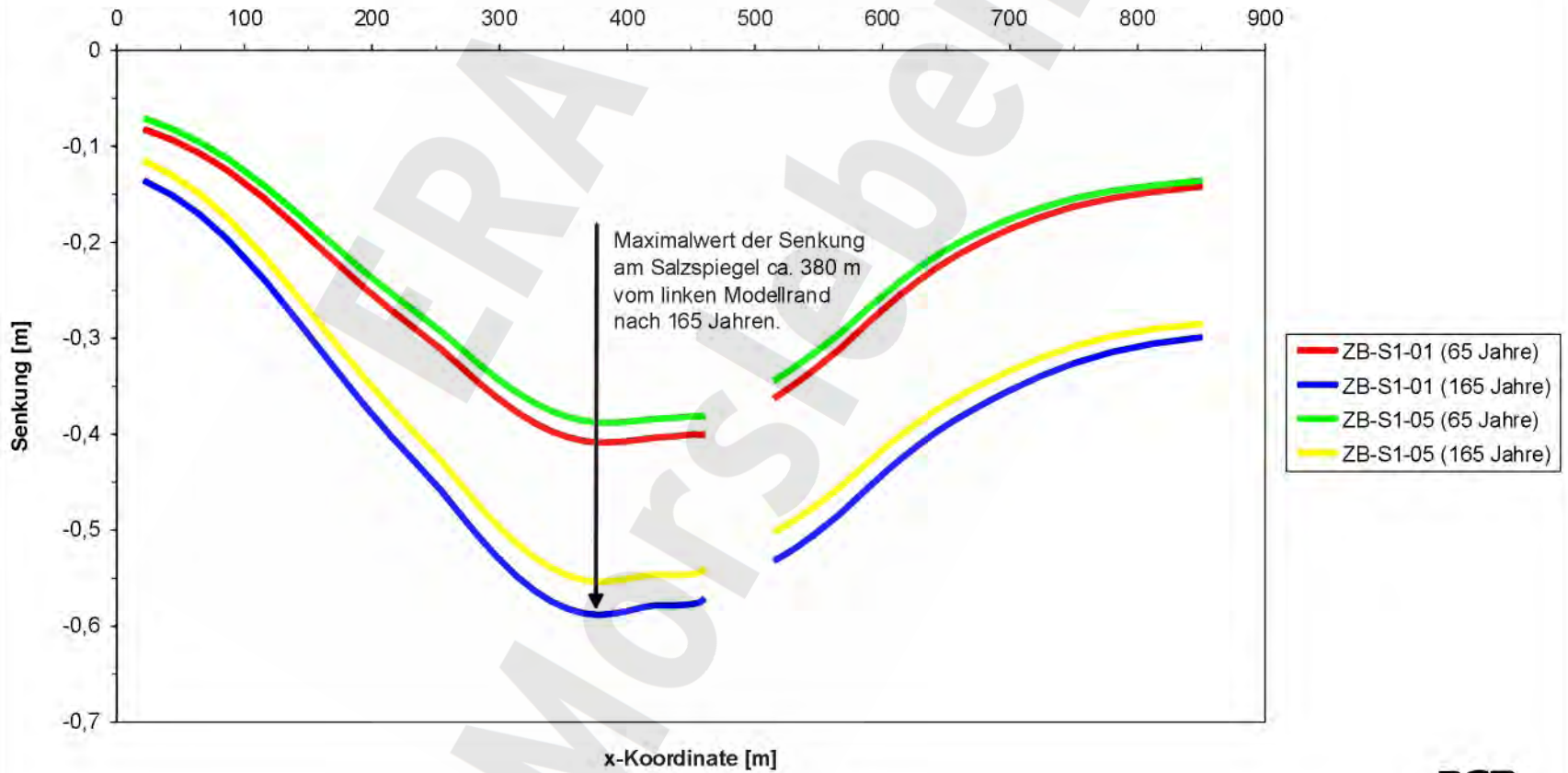


ZB-S1-05: Geringere Duktilität des Liniensalzes  
Senkung der Geländeoberkante im Vergleich zum Referenzmodell



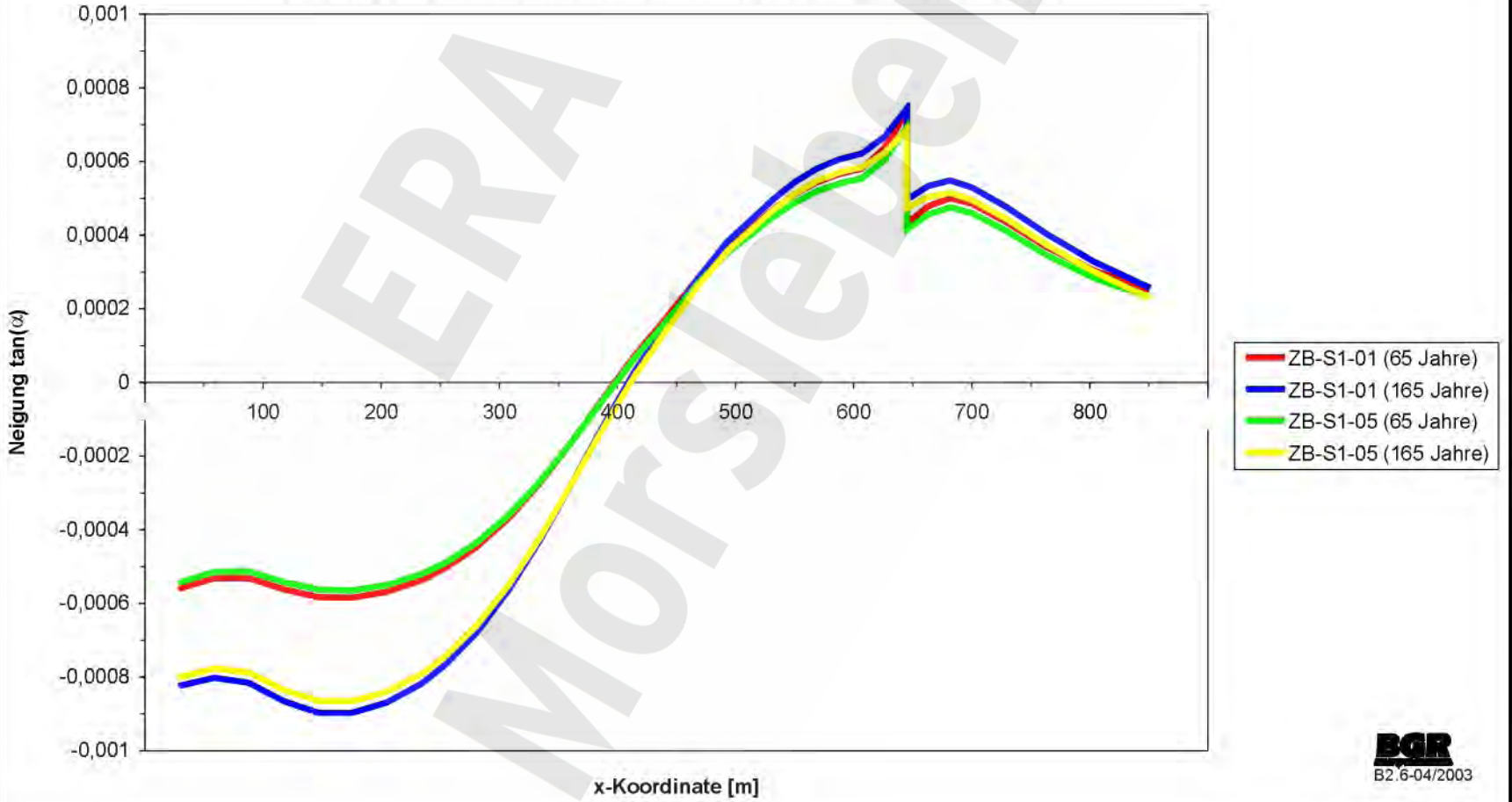
ZB-S1-05: Geringere Duktilität des Liniensalzes  
Senkung der Geländeoberkante im Vergleich zum Referenzmodell

### ZB-S1-05: Geringere Duktilität des Liniensalzes Senkung am Salzspiegel im Vergleich zum Referenzmodell

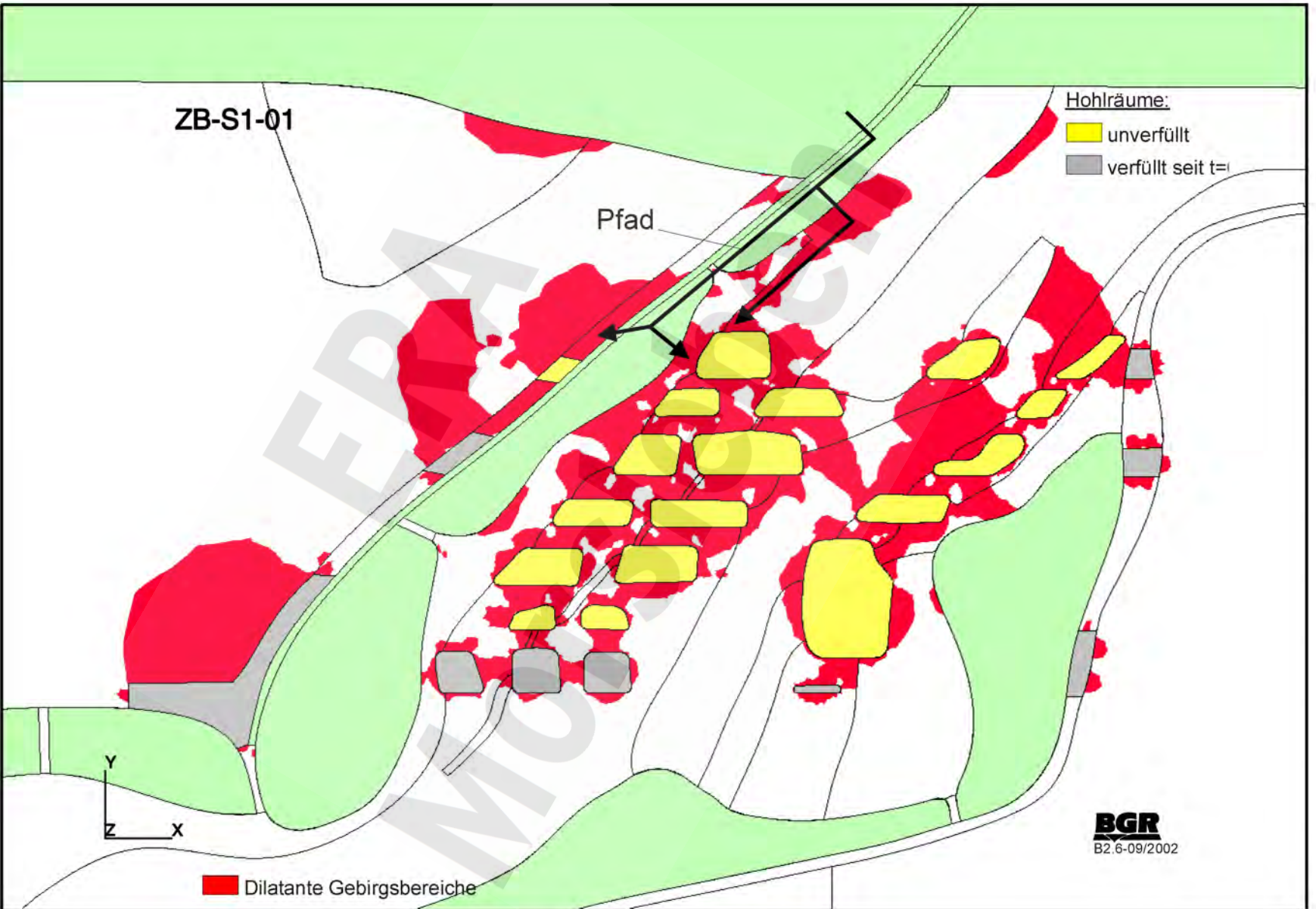


ZB-S1-05: Geringere Duktilität des Liniensalzes  
Senkung am Salzspiegel im Vergleich zum Referenzmodell

ZB-S1-05: Geringere Duktilität des Liniensalzes  
Neigung der Geländeoberkante im Vergleich zum Referenzmodell



ZB-S1-05: Geringere Duktilität des Liniensalzes  
Neigung der Geländeoberfläche im Vergleich zum Referenzmodell



ZB-S1-01: Referenzmodell  
 Pfad eines möglichen Lösungszutritts