

# Planfeststellungsverfahren zur Stilllegung des Endlagers für radioaktive Abfälle Morsleben

## Verfahrensunterlage

**Titel:** Gebirgsmechanische Beurteilung der Integrität der Salzbarriere in der Schachanlage Bartensleben

**Autor:** Heusermann, S. & Nipp, H.K.

**Erscheinungsjahr:** 2000

**Unterlagen-Nr.:** P 099

**Revision:** 00

**Unterlagenteil:**



<b>Inhaltsverzeichnis</b>		<b>Seite</b>
<b>Verkürzte Zusammenfassung</b>		4
<b>1</b>	<b>Vorgang</b>	5
<b>2</b>	<b>Zielsetzung und Vorgehensweise</b>	5
<b>3</b>	<b>Geologische Verhältnisse</b>	6
3.1	Geologische Verhältnisse im Ostfeld	6
3.2	Geologische Verhältnisse im Südfeld	7
3.3	Geologische Verhältnisse im Westfeld	8
3.4	Geologische Verhältnisse im Zentralbereich	10
<b>4</b>	<b>Gebirgsmechanische Modellierung</b>	11
4.1	Hohlräume	11
4.1.1	Hohlräume im Ostfeld	11
4.1.2	Hohlräume im Südfeld	12
4.1.3	Hohlräume im Westfeld	13
4.1.4	Hohlräume im Zentralbereich	13
4.2	Homogenbereiche	15
4.2.1	Homogenbereiche im Ostfeld	15
4.2.2	Homogenbereiche im Südfeld	16
4.2.3	Homogenbereiche im Westfeld	16
4.2.4	Homogenbereiche im Zentralbereich	17
4.3	Primärer Gebirgsspannungszustand	19
4.4	Gebirgstemperatur	19
4.5	Materialmodelle und -parameter	20
<b>5</b>	<b>Modellberechnungen</b>	26
5.1	Modellberechnungen zum Ostfeld	26
5.1.1	Geometrische Idealisierung und Diskretisierung des Ostfeldes	26
5.1.2	Modellvarianten zum Ostfeld	27
5.2	Modellberechnungen zum Südfeld	28
5.2.1	Geometrische Idealisierung und Diskretisierung des Südfeldes	28
5.2.2	Modellvarianten zum Südfeld	29
5.3	Modellberechnungen zum Westfeld	30
5.3.1	Geometrische Idealisierung und Diskretisierung des Westfeldes	30
5.3.2	Modellvarianten zum Westfeld	32
5.4	Modellberechnungen zum Zentralbereich	32
5.4.1	Geometrische Idealisierung und Diskretisierung des Zentralbereichs	32
5.4.2	Modellvarianten zum Zentralbereich	35
<b>6</b>	<b>Darstellung der Berechnungsergebnisse</b>	37
6.1	Berechnungsergebnisse zum Ostfeld	37
6.1.1	Basismodell OF-O3-A („Best-estimate“-Parameter)	37
6.1.2	Modellvariante OF-O3-B (Vernachlässigung der Pfeilertragwirkung)	39

6.1.3	Modellvariante OF-O4-A (aktueller geologischer Kenntnisstand)	39
6.2	Berechnungsergebnisse zum Südfeld	40
6.2.1	Basismodell SF-N1-A („Best-estimate“-Parameter)	40
6.2.2	Modellvariante SF-N1-B (höhere Duktilität einiger Salzsichten)	42
6.2.3	Modellvariante SF-N1-C (steiferes Deckgebirge)	43
6.3	Berechnungsergebnisse zum Westfeld	43
6.3.1	Basismodell WF-H2-A („Best-estimate“-Parameter)	44
6.3.2	Modellvariante WF-H2-B (steiferer Versatz im Kalilager B)	46
6.3.3	Modellvariante WF-H2-C (Vernachlässigung der Pfeilertragwirkung)	46
6.4	Berechnungsergebnisse zum Zentralbereich	47
6.4.1	Basismodell ZB-A2-B („Best-estimate“-Parameter)	47
6.4.2	Modellvariante ZB-A2-C (Verfüllung der Abbaue mit weichem Versatz)	49
6.4.3	Modellvariante ZB-A2-E (Verfüllung der Abbaue mit steifem Versatz)	50
6.4.4	Basismodell ZB-O3-P („Best-estimate“-Parameter)	50
6.4.5	Modellvariante ZB-O3-Q (Verfüllung von Abbauen mit weichem Versatz)	52
6.4.6	Modellvariante ZB-O3-S (Verfüllung von Abbauen mit steifem Versatz)	53
6.4.7	Modellvariante ZB-O3-1 (Aufteilung des Homogenbereichs z2HS)	53
<b>7</b>	<b>Beurteilung der Integrität der Salzbarriere in der Schachanlage Bartensleben</b>	<b>55</b>
7.1	Bewertungskriterien	55
7.2	Bewertung der Ergebnisse der Modellberechnungen	56
7.2.1	Bewertung des Ostfeldes	57
7.2.2	Bewertung des Südfeldes	58
7.2.3	Bewertung des Westfeldes	58
7.2.4	Bewertung des Zentralbereichs	60
7.3	In-situ-Messungen und örtliche Beobachtungen	61
7.3.1	Messungen und Beobachtungen im Ostfeld	61
7.3.2	Messungen und Beobachtungen im Südfeld	62
7.3.3	Messungen und Beobachtungen im Westfeld	62
7.3.4	Messungen und Beobachtungen im Zentralbereich	63
7.4	Zusammenfassende Bewertung der Barrierenintegrität	67
<b>8</b>	<b>Zusammenfassung und Schlussbetrachtung</b>	<b>71</b>
	<b>Literatur- und Unterlagenverzeichnis</b>	<b>74</b>
	<b>Abkürzungsverzeichnis</b>	<b>76</b>
	<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>77</b>
	<b>Anlagenverzeichnis</b>	<b>78</b>
	<b>Anlagen</b>	
	Gesamtblattzahl einschließlich Anlagen:	233

## Verkürzte Zusammenfassung

Autoren: Dr.-Ing. Stefan Heusermann & Dr.-Ing. Hans-Konstantin Nipp

Titel: ERA Morsleben - Gebirgsmechanische Beurteilung der Integrität der Salzbarriere in der Schachtanlage 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 über den Abbaufeldern der Schachtanlage 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.

Für den rechnerischen Nachweis wurden Finite-Elemente-Berechnungen mit verschiedenen zweidimensionalen Modellen für die Einlagerungsfelder (Ostfeld, Südfeld, Westfeld) und für Bereiche mit hohem Durchbaugungsgrad (Zentralbereich) durchgeführt.

Die Salzbarriere oberhalb der Einlagerungsfelder ist aus geomechanischer Sicht als intakt und hydraulisch dicht zu bewerten. Für den Zentralbereich zeigt sich, dass die Salzbarriere im Salzspiegelbereich über den Abbauen zwar intakt ist, jedoch die Integritätskriterien für den Gebirgsbereich zwischen den Abbauen und den westlich angrenzenden Schollen des überkippten Hauptanhydrits rechnerisch nicht erfüllt werden. Da diese Schollen nach geowissenschaftlichem Kenntnisstand bereichsweise durchlässig sind und bis zum Salzspiegel reichen, ist ein Zutritt von Lösungen vom Deckgebirge über die Anhydritschollen in die Abbaue des Zentralbereichs nicht auszuschließen. Dies gilt aufgrund vergleichbarer geologischer Verhältnisse und Abbausituationen auch für das Nordfeld und das Südostfeld.

Die nachhaltige Ertüchtigung dieser potentiell permeationsgefährdeten Bereiche ist durch eine Verfüllung von Abbauen in den o. g. Feldesteilen möglich.

## 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 und Vorgehensweise

Im Zuge des Erkundungs- und Beweissicherungsprogramms für das Endlager für radioaktive Abfälle (ERA) Morsleben, Schachanlage Bartensleben, 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.

Die Beurteilung der Integrität erfolgt auf der Grundlage geomechanischer Modellberechnungen sowie von In-situ-Messungen und örtlichen Beobachtungen. Die Beeinflussung der Integrität durch geochemische Vorgänge ist nicht Gegenstand der vorliegenden Untersuchungen.

Aufgrund der sehr komplexen räumlichen Struktur des Grubengebäudes Bartensleben ist die Untersuchung in verschiedenen Teilbereichen zweckmäßig. Daher wurden für den rechnerischen Nachweis der Integrität der Salzstockbarriere vier im Hinblick auf die Einlagerungsplanung und auf den Durchbauungsgrad repräsentative Bereiche der Schachanlage Bartensleben ausgewählt:

- Ostfeld (Einlagerungsbereich),
- Westfeld (Einlagerungsbereich),
- Südfeld (Einlagerungsbereich) und
- Zentralbereich in der Hauptmulde (Bereich mit höchstem Durchbauungsgrad).

Der Bericht stellt die für diese Bereiche erzielten Ergebnisse der Modellberechnungen sowie die daraus abgeleitete Beurteilung der Integrität der Salzbarriere dar. Die Ergebnisse werden auch auf andere Bereiche der Schachanlage Bartensleben (Nordfeld, Südostfeld) übertragen, für die keine direkten rechnerischen Untersuchungen durchgeführt wurden.

### 3 Geologische Verhältnisse

Grundlage für die gebirgsmechanische Modellierung der geologischen Schichten in den Grubenfeldern der Schachanlage Bartensleben sind die Ergebnisse des geologischen Untersuchungsprogramms zur Erstellung eines geologisch-tektonischen Modells des ERA Morsleben (BGR 1997, BGR 1999b). Diese Ergebnisse sind exemplarisch für den von West nach Ost entlang der Ostquerschläge durch die gesamte Schachanlage Bartensleben reichenden geologischen Schnitt 3.1 in Anlage 3.1<sup>(\*)</sup> dargestellt.

#### 3.1 Geologische Verhältnisse im Ostfeld

Das geologische Profil 3.1 (BGR 1997, BGR 1999b) bildet die Grundlage für die gebirgsmechanische Modellierung der geologischen Schichten im Bereich des Ostfeldes Bartensleben (Anlagen 3.2 und 3.3). Die Abbaue des Ostfeldes liegen in der NNW-SSE streichenden Ostmulde. Im hier betrachteten zentralen Teil des Ostfeldes ist sie durch eine flache, breite Westflanke und durch eine sehr steile, schmale Ostflanke gekennzeichnet. Die Ostmulde besteht aus den salinaren Schichten der Leine-Folge mit Liniensalz (z3LS), Orangesalz (z3OS), Bank-/Bändersalz (z3BK/BD), Anhydritmittelsalz (z3AM) und Schwadensalz (z3SS) und den darauf aufliegenden, bis zum Salzspiegel reichenden salinaren Schichten der Aller-Folge (z4). Die stratigraphischen Einheiten z3LS, z3OS und z3BK/BD im Muldentiefsten werden im zentralen Teil des Ostfeldes zusammengefasst.

An der Ost- und der Westflanke der Ostmulde sind mächtige Anhydritklippen (z3HA) ausgebildet. Unterhalb der tiefsten Abbaue sind sie durch ca. 50 m mächtigen Hauptanhydrit verbunden, unterbrochen nur durch tektonisch bedingte Durchtrennungszonen, in die schnellkriechende Salze wie das Liniensalz oder das Kaliflöz Staßfurt (z2SF) eingedrungen sind.

Bei den Arbeiten zur Firstberaubung und Firstsicherung im Abbau 1 der 4. Sohle wurde Hauptanhydrit aufgeschlossen, der zur Anhydritklippe in der Westflanke der Ostmulde gehört. Diese Klippe erstreckt sich im Bereich des Abbaus 1 als Auskragung bis in die Firste dieses Abbaus. Ferner wurde im östlichen Stoß des Abbaus 4 an der Kontur stellenweise Anhydrit angetroffen. Er gehört zur Hauptanhydritklippe in der Ostflanke der Ostmulde; diese Klippe weist bereichsweise eine nach Westen überkippte Struktur auf. Diese nach 1997 gewonnenen Erkenntnisse sind in BGR (1999b) dargestellt.

---

<sup>(\*)</sup> Die Anlagen sind kapitelweise numeriert. Die erste Ziffer bezieht sich auf das betreffende Hauptkapitel. Ggf. folgt, durch einen Punkt getrennt, die Nummer des betreffenden Unterkapitels. Danach folgt, ebenfalls durch einen Punkt getrennt, die fortlaufende Anlagennummer in dem jeweiligen Haupt- bzw. Unterkapitel.

Das auf dem Salzspiegel in -140 m NN aufliegende Deckgebirge besteht aus dem Hutgestein (cr), das eine von Westen nach Osten abnehmende Mächtigkeit von ca. 120 m bis 40 m besitzt, aus Keuperschichten (km) und bereichsweise aus geringmächtigem Quartär (q).

### 3.2 Geologische Verhältnisse im Südfeld

Das geologische Profil 1.3 (BGR 1997) bildet die Grundlage für die gebirgsmechanische Modellierung der geologischen Schichten im Bereich des Südfeldes Bartensleben (Anlagen 3.4 und 3.5). Die NNW-SSE streichende Südmulde I wird von dem Westlichen Schachtsattel und dem Östlichen Schachtsattel I flankiert. Östlich des Östlichen Schachtsattels I schließen die Südmulde II, der Östliche Schachtsattel II und die Hauptmulde an.

Die Südmulde I besteht aus den salinaren Schichten der Staßfurt- bis Leine-Folge (z2 bis z3) und ist tief eingefaltet. Die einzelnen Schichten besitzen stark unterschiedliche Mächtigkeiten, die stellenweise durch die starke Verfaltung nur im Dezimeterbereich liegen. Eine Trennung dieser Schichten ist nicht immer möglich.

Zwischen den Östlichen Schachtsätteln I und II erstreckt sich die Südmulde II. Sie ist stark ausgewalzt und besteht im wesentlichen aus Hangendsalz (z2HG) mit Relikten des Kaliflözes Staßfurt. Dieses ist im Bereich des Grubengebäudes bis auf wenige Zentimeter ausgedünnt. Zum Salzspiegel hin und in Richtung SE ist eine Verbreiterung zu erwarten.

Östlich des Östlichen Schachtsattels schließt die Hauptmulde an. Die westliche Flanke der Hauptmulde ist vollständig mit Hauptanhydritschollen besetzt, die bis zum Salzspiegel reichen.

Die spröden Schichten des Hauptanhydrits zerbrachen während der Verfaltung, so dass der Hauptanhydrit (z3HA) in Schollen vorliegt, die teilweise aneinander abgeschert oder vollständig voneinander getrennt sind. In diese Durchtrennungsbereiche sind schnellkriechende Salze wie das Liniensalz (z3LS) oder das Kaliflöz Staßfurt (z2SF) eingedrungen.

Auf der östlichen Seite der Südmulde I reicht der Hauptanhydrit nach oben bis auf die 3a-Sohle. Auf der westlichen Seite ist der Hauptanhydrit auf den oberen Sohlen nicht vorhanden. Er reicht hier nur bis zu einer Teufe von ca. -470 m NN, dies entspricht der 6. Sohle.

Der Salzspiegel liegt in einer mittleren Teufe von ca. -140 m NN. Darauf aufliegend befindet sich das Hutgestein (cr). Es keilt nach Westen hin aus und weist eine in Richtung W-E zunehmende Mächtigkeit auf, die von 20 m auf 40 m über der Südmulde bis auf über 150 m oberhalb der Hauptmulde zunimmt. Der Rand des Salzstocks befindet sich im Profil 1.3 ca. 350 m bis 450 m westlich der Abbaue. Das Deckgebirge setzt sich im hier betrachteten westlichen Bereich der Salzstruktur aus Kreide (kr), einer Störungszone bestehend aus Jura (j) und Keuper (k) sowie bereichsweise aus Quartär (q) zusammen. Westlich der Salzstruktur folgt im Nebengebirge weniger gestörter Keuper.

### 3.3 Geologische Verhältnisse im Westfeld

Das geologische Profil 3.1 basiert auf dem geologischen Lagerstättenmodell (BGR 1997). Es bildet die Grundlage für die gebirgsmechanische Modellierung der geologischen Schichten im Bereich des Westfeldes Bartensleben (Anlagen 3.6 und 3.7).

Die Abbaue des Westfeldes liegen in der NNW-SSE streichenden Westmulde mit westlichen Randfalten, an die sich nach Osten der Westliche Schachtsattel, die Südmulde I und der Östliche Schachtsattel I anschließen.

Die westlichen Randfalten sind eine komplizierte Abfolge von Mulden und Sätteln, die vorwiegend durch Scherbewegungen entstanden sind. Die Sättel enthalten nicht mehr zu differenzierende Schichten des Hauptsalzes (z2HS). Der Muldeninhalt besteht aus zerscherten, rudimentären Schichtenfolgen der Leine- und Aller-Folge (z3 bis z4).

Die Westmulde besteht aus zwei Teilmulden, die durch einen Sattel mit Schichten der Staßfurt-Folge (z2) getrennt sind. Der Sattel ist auf der 4. Sohle Bartensleben im Bereich des Westquerschlages abgequetscht. Durch eine komplizierte Stauchfaltung wurde im Teufenbereich von -350 m bis -400 m NN die große Mächtigkeit des Kaliflözes verursacht, durch dessen Abbau die großen Hohlräume auf der 4. Sohle entstanden.

Der Westliche Schachtsattel zeigt einen den westlichen Randfalten sehr ähnlichen Baustil. Von Westen aus gesehen bildet er die erste klar zu gliedernde Falteneinheit. Der Sattel besteht aus dem Kaliflöz Staßfurt und den Steinsalzschiefern der Staßfurt-Folge (z2), im wesentlichen aus Hauptsalz (z2HS).

Die Südmulde I besteht im Bereich des geologischen Profils 3.1 aus den salinaren Schichten der Staßfurt- bis Leine-Folge (z2 bis z3) und ist bis in die tiefsten Bereiche der Salzstruktur eingefaltet. Die Schichten besitzen stark unterschiedliche Mächtigkeiten, die stellenweise

durch die starke Verfaltung nur im Dezimeterbereich liegen. Eine Trennung der einzelnen stratigraphischen Einheiten ist nicht immer möglich. Nur auf der östlichen Flanke der Mulde ist hier auf allen Sohlen Hauptanhydrit (z3HA) aufgeschlossen.

Zwischen den beiden Südmulden I und II erstreckt sich der Östliche Schachtsattel I. Er taucht nach Norden hin ab und ist ca. 400 m nördlich nicht mehr ausgebildet. Der Sattelkern besteht aus Hauptsalz der Staßfurt-Folge (z2HS).

Der spröde Hauptanhydrit (z3HA) zerbrach während der Verfaltung, so dass er in Schollen vorliegt. Diese sind teilweise vollständig voneinander getrennt. In die Durchtrennungszonen sind mobile Salze wie das Kaliflöz Staßfurt (z2SF) oder untergeordnet das Liniensalz (z3LS) eingedrungen.

In den westlichen Randfalten und der Westmulde ist mit größeren Hauptanhydritschollen vom Muldentiefsten bis in die Teufe der 3. Sohle zu rechnen, wo sich die obersten nachweisbaren Hauptanhydritaufschlüsse befinden.

Auf der östlichen Flanke der Südmulde I erstreckt sich der Hauptanhydrit vom Muldentiefsten bis ca. 40 m über die 1. Sohle und erreicht somit im geologischen Schnitt 3.1 nicht den Salzspiegel. Erst im Nordfeld, 350 bis 400 m nördlich, reichen einzelne isolierte Anhydritschollen bis an den Salzspiegel.

Der Salzspiegel liegt in einer mittleren Teufe von ca. -140 m NN. Darauf aufliegend befindet sich Hutgestein (cr). Das Deckgebirge darüber setzt sich im hier betrachteten westlichen Bereich der Salzstruktur aus Kreide (kr), einer Störungszone bestehend aus Jura (j) und Keuper (k) sowie bereichsweise aus Quartär (q) zusammen. Westlich der Salzstruktur folgt im Nebengebirge weniger gestörter Keuper. Der Rand der Salzstruktur befindet sich im Profil 3.1 ca. 80 m bis 100 m westlich der Abbaue. Sein Verlauf ergibt sich aus der Salzstrukturoberfläche, die aufgrund von flachseismischen Untersuchungen und Bohrergebnissen konstruiert wurde. Nach neueren Unterlagen, die zum Zeitpunkt der gebirgsmechanischen Modellierung noch nicht zur Verfügung standen, verläuft der Rand der Salzstruktur ca. 80 m weiter westlich als hier modelliert. Der Abstand zu den Abbauen vergrößert sich entsprechend, so dass die hier gewählte Modellierung im Hinblick auf die Bewertung der Barrierenintegrität als konservativ gelten kann.

### 3.4 Geologische Verhältnisse im Zentralbereich

Die geologischen Profile 3.1 und 3.3 (BGR 1997) bilden die Grundlage für die gebirgsmechanische Modellierung der geologischen Schichten im Zentralbereich Bartensleben (Anlagen 3.8 bis 3.10). Sie verlaufen nahezu senkrecht zu den geologischen Großstrukturen, die in NNW-SSE-Richtung streichen. Das Profil 3.1 liegt in der Nähe der Ostquerschläge und verläuft nahezu parallel zu diesen. Das Profil 3.3 liegt um ca. 120 m nördlicher und schneidet die Hohlräume der Abbaureihe 1.

Die Strukturen im Westteil der Salzstruktur zeigen einen überkippten Bau, im Osten einen aufrechten Faltenbau. Für das gebirgsmechanische Modell des Zentralbereichs wurden der Östliche Schachtsattel (I und II, getrennt durch die Südmulde II), die Hauptmulde und der Ostsattel berücksichtigt. Die Sättel werden aus Salinargestein der Staßfurtfolge z2 gebildet (z2HS, z2HG-UE, z2SF). Die Hauptmulde besteht aus Einheiten der Leineserie z3.

Im geologischen Profil 3.1 liegt der Hauptanhydrit auf der Westflanke der Hauptmulde nahezu im Verband vor. Er ist nur an einigen Stellen durchtrennt. Im Profil 3.3 ist der Verband der Anhydritschollen aufgelöst, aber die Westflanke der Hauptmulde wird weiterhin nachgezeichnet. Die Durchtrennungszonen des Anhydrit sind nur stellenweise durch die Grubenkartierung und durch Bohrungen nachgewiesen und haben im geologischen Lagerstättenmodell eher exemplarischen Charakter. Diese Zonen sind mit Sekundärmineralen (Steinsalz, Carnallit, Sylvin etc.) bzw. Flözmaterial (Trümmern carnallit) und Liniensalz besetzt. Entsprechende Lokationen sind durch die Grubenkartierung bekannt.

Der Salzspiegel liegt in einer mittleren Teufe von ca. -140 m NN und weist im geologischen Schnitt 3.1 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).

## 4 Gebirgsmechanische Modellierung

Die gebirgsmechanische Modellierung ausgewählter Grubenfelder der Schachanlage Bartensleben umfasst Angaben und Festlegungen zu den Hohlräumen (Lage, Größe und Geometrie), zu den Homogenbereichen (Bereiche mit gleichen geomechanischen Eigenschaften, hier insbesondere hinsichtlich der Steifigkeit und der Duktilität), zum primären Gebirgsspannungszustand, zur Gebirgstemperatur sowie zu den verwendeten Materialmodellen und -parametern.

Für die in den ausgewählten Grubenfeldern betrachteten Modellschnitte werden folgende Kürzel verwendet:

- Ostfeld, Modellschnitt entlang des Profils 3.1: OF-O3,
- Südfeld, Modellschnitt entlang des Profils 1.3: SF-N1,
- Westfeld, Modellschnitt entlang des Profils 3.1: WF-H2,
- Zentralbereich, Modellschnitt entlang des Profils 3.1: ZB-O3,
- Zentralbereich, Modellschnitt entlang des Profils 3.3: ZB-A2.

### 4.1 Hohlräume

#### 4.1.1 Hohlräume im Ostfeld

Nach Auffahrung einer nach Süden ausgerichteten Strecke auf der 4. Sohle (372-m-Sohle) des Ostfeldes im Jahre 1951 wurden zwischen 1957 und 1959 vier Abbaue auf der 4. Sohle sowie die Abbaue 1 auf der 2. und 3. Sohle aufgefahren. Die letztgenannten Abbaue befinden sich über dem Abbau 3 der 4. Sohle und setzen sich weiter südlich als Strecken fort. Auf der 2. Sohle wurde ein flacher, kleiner Abbau über dem Abbau 1 der 4. Sohle aufgefahren. 1991 wurde eine neue Strecke, das Flachen 4, rampenförmig aufgefahren. Im Zuge der Herrichtung des Ostfeldes für die Einlagerung radioaktiver Abfälle erfolgte schließlich im Jahr 1996 die Auffahrung einer neuen Strecke, des Flachen 4a bzw. 4b.

Bei der gebirgsmechanischen Modellierung im Modellschnitt OF-O3 wurden die folgenden, in Anlage 4.1 dargestellten Abbaue und Strecken berücksichtigt (BfS/DBE 1997):

- Abbau 1 der 2. Sohle,
- Erkundungsstrecke auf der 3. Sohle,
- Abbaue 1 und 4 der 4. Sohle,
- Flachen 4, 4a und 4b,
- 1. südliche Strecke.

#### 4.1.2 Hohlräume im Südfeld

Die bergmännischen Tätigkeiten im Südfeld der Grube Bartensleben begannen ca. 1914 mit ersten Auffahrungen im Kalilager B. Die Abbaue im Kalilager B entstanden ungefähr in folgenden Zeiträumen: von 1914 bis 1915, von 1924 bis 1937 und von 1949 bis 1950. Aus geomechanischer Sicht werden die Steinsalzabbaue des Südfeldes durch die Kaliabbaue im Lager B nicht oder nur unwesentlich beeinflusst.

Die Auffahrung der 1. südlichen Richtstrecke auf der 4. Sohle erfolgte in drei Abschnitten in der Zeit von 1926 bis 1937 von Norden nach Süden. Von 1979 bis 1980 wurde das Streckenprofil für den Einlagerungsbetrieb nachgerissen. Der Querschnitt dieser Strecke variiert über die Streckenlänge.

Die Steinsalzabbaue des Südfeldes wurden in der zeitlichen Abfolge jeweils von Norden nach Süden angelegt. Sie sind durch horizontale Durchhiebe miteinander verbunden. Zunächst wurden die Abbaue auf der 3. Sohle (8 Nord, 8 Süd, 9 Nord und 9 Süd) von 1932 bis 1937 aufgefahren. 1939 begann die Auffahrung der Abbaue auf der 2. Sohle. Diese Abbaue (8 Nord, 8 Süd und 9 Nord) waren bis 1942 vollständig aufgefahren. Ab 1942 entstanden die Abbaue auf der 3a-Sohle (8 Nord, 8 Süd, 9 Nord und 9 Süd). Das Ende der Auffahrung dieser Abbaue ist aus den vorliegenden Unterlagen nicht ersichtlich. In den Jahren 1948 und 1949 wurden die Abbaue 8 Nord und 8 Süd auf der 2a-Sohle angelegt.

Die Richtstrecke Südfeld auf der 5. Sohle wurde in den Jahren 1950 bis 1954 aufgefahren. Die Einlagerungskammern auf der 5a-Sohle entstanden von 1943 bis 1957. Der Abbau 1 wurde im Jahr 1943, der Abbau 2 im Jahr 1952 bis 1956 und der Abbau 3 im Jahr 1957 aufgefahren. Diese Abbaue sind mit horizontalen Durchhieben verbunden. Sie sind über vertikale Fahr- und Förderrolllöcher mit der darunterliegenden 5. Sohle verbunden. Die Schweben zwischen diesen Abbauen und der darüber verlaufenden Südstrecke auf der 4. Sohle sind unterschiedlich stark ausgebildet. Unterhalb der 5a-Sohle wurden keine weiteren Steinsalzabbaue angelegt. In den Abbauen 1, 2 und 3 auf der 5a-Sohle wurden radioaktive Abfälle eingelagert.

Für die gebirgsmechanische Modellierung des Südfeldes im Modellschnitt SF-N1 wurden die folgenden, in Anlage 4.2 dargestellten Abbaue und Strecken berücksichtigt (BfS/DBE 1997):

- Abbaue des Kalilagers B in einer Teufe von -332 m NN bis -372 m NN,
- 1. südliche Richtstrecke auf der 4. Sohle,
- Steinsalzabbaue 9n von der 2. bis zur 4a-Sohle,
- Richtstrecke Südfeld auf der 5. Sohle,
- Einlagerungskammer (Abbau 2) auf der 5a-Sohle.

#### 4.1.3 Hohlräume im Westfeld

Die Abbaue im Westfeld wurden zwischen 1925 und 1926 erstellt. Die Hohlräume auf der 4. Sohle folgen der geologischen Struktur des Hartsalzlagers W. In der Anstauchung des Lagers im Bereich des Westquerschlages entstanden die großräumigen Abbaue 1n und 1s auf der 4. Sohle. Die Abbaue 1n und 1s sind durch einen ungefähr in WE-Richtung verlaufenden Pfeiler getrennt. Sie wurden bis zu 13 m unter derzeitigem Sohlenniveau abgebaut, sind aber bis zu dieser Höhe mit Versatz verfüllt. Östlich der Abbaue 1n und 1s verläuft auf der 4. Sohle die „Richtstrecke nach Süden“ in ungefährer SSE-Richtung. Auf der 3. Sohle befindet sich eine weitere kleine Abbaukammer des Lagers W.

Westlich des Schachtes Bartensleben wurden von 1928 bis 1931 die Steinsalzabbaue der Abbaureihe 1 aufgeföhren. Auf den Sohlen 1 bis 3 entstanden mehrere Hohlräume, die teilweise wieder verfüllt wurden.

Die Abbaue im Kalilager B entstanden in den Jahren 1925 bis 1931. Während des Abbaus wurden die Abbaue sukzessive verfüllt, so dass nur noch wenige Bereiche der Kaliabbaue offen blieben.

Für die gebirgsmechanische Modellierung des Westfeldes im Modellschnitt WF-H2 wurden nach Anlage 4.3a und 4.3b folgende Abbaue und Strecken berücksichtigt (BfS/DBE 1997):

- Abbaue des Hartsalzlagers W auf der 3. Sohle und der 4. Sohle (Abbaue 1n und 1s),
- Richtstrecke nach Süden auf der 4. Sohle,
- Steinsalzabbaue 1 Süd von der 1. bis zur 3. Sohle,
- Abbaue des Kalilagers B in einer Teufe von -245 m NN bis -475 m NN.

#### 4.1.4 Hohlräume im Zentralbereich

Die Aufföhren im Zentralbereich der Grube Bartensleben begannen ca. 1913 mit dem Abbau im Kalilager C. Diese Lagerstätte liegt an der westlichen Flanke des Hauptanhydrit.

Die ersten Auffahrungen fanden auf der 1. und 3. Sohle statt. Es folgten in kurzen Abständen von ca. einem Jahr die Auffahrungen auf der 4. und 2. Sohle, die bis ca. 1927 dauerten. In den Jahren 1926 und 1930 wurde mit weiteren Auffahrungen auf den Zwischensohlen -357 m NN und 4a fortgefahren.

Der Abbau im Kalilager D begann 1914 auf den Hauptsohlen 1 und 4 und wenig später auf den Hauptsohlen 3 und 2. Um 1923 wurde mit der Auffahrung von Zwischensohlen (-357-m-Sohle und 4a-Sohle) begonnen. Der Abbau von Kali wurde im wesentlichen 1927 abgeschlossen. Lediglich auf der 4a-Sohle des Kalilagers wurde mit dem Ausbruch bis 1939 fortgefahren.

In den Jahren 1918 bis 1920 entstanden die ersten Steinsalzabbau auf der 2. und 4. Sohle, wobei mit der 2. und 3. Abbaureihe begonnen wurde. Es folgten 1924 die Hohlräume der 3. Abbaureihe auf der 3. Sohle und ein Jahr später die 3. Abbaureihe auf der 1. Sohle. Die Auffahrung der 2. Abbaureihe dieser Sohlen erfolgte ca. 3 - 4 Jahre später. In dieser Zeit entstanden auch die ersten Abbau der 4. Abbaureihe. Auffahrungen von Abbauen, die wie z.B. die Abbau 13 und 14 weiter vom Ostquerschlag entfernt liegen, erfolgten anschließend. Der Abbau von Steinsalz erfolgte bis in die sechziger Jahre. Im Jahre 1963 wurde auch der Betrieb der Abbau 1a eingestellt.

Für die gebirgsmechanische Modellierung der Hohlräume im nördlichen Modellschnitt ZB-A2 (Bereich des Profils 3.3, das die Abbaureihe 1 des Zentralbereichs schneidet) wurden nach Anlage 4.4 folgende Abbau und Strecken berücksichtigt (BfS/DBE 1997):

- Kaliabbau im Lager C auf der 1. Sohle und 2. Sohle,
- Steinsalzabbau 1a auf der 1a-Sohle, 2a-Sohle, 2. Sohle, 3a-Sohle (Abbau 1an) und 3. Sohle,
- Steinsalzabbau 1an auf der 4a-Sohle.

Für die gebirgsmechanische Modellierung der Hohlräume im südlichen Modellschnitt ZB-O3 (Bereich des Profils 3.1, das die Abbaureihen 2, 3 und 4 des Zentralbereichs schneidet) wurden nach Anlage 4.5 folgende Abbau und Strecken berücksichtigt (BfS/DBE 1997):

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

Die Geometrie der Steinsalzabbaue wurde von der Deutschen Gesellschaft zum Bau und Betrieb von Endlagern für Abfallstoffe mbH (DBE) mit einem Scannerverfahren aufgenommen und ausgewertet. Zu jedem derart erfassten Abbau wurden Horizontal- und Vertikalschnitte angefertigt. Die Horizontalschnitte haben Abstände von 1 - 5 m, die Vertikalschnitte, die als Längs- und Querschnitte erstellt wurden, haben Abstände von 5 - 10 m. Für den Modellschnitt ZB-O3 entlang der Ostquerschläge standen nicht für alle Abbaue Scanneraufnahmen zur Verfügung. Die nicht gescannten Abbaue wurden auf der Grundlage des Risswerkes (BfS/DBE 1997) modelliert. Für den Modellschnitt ZB-A3 durch die Abbaureihe 1 waren alle benötigten Scanneraufnahmen der Steinsalzabbaue verfügbar.

## 4.2 Homogenbereiche

### 4.2.1 Homogenbereiche im Ostfeld

Der Kenntnisstand zur Geologie und zu den Homogenbereichen im Ostfeld, insbesondere hinsichtlich des Konturverlaufs der westlichen Hauptanhydritklippe im Modellschnitt OF-O3, ist während der mehrjährigen Bearbeitung fortgeschritten (s. dazu Kap. 3.1). Daraus resultiert ein älterer Kenntnisstand, der durch die in Anlage 4.6a dargestellten Homogenbereiche sowie durch die frühere Modellbezeichnung OF-O3 repräsentiert wird, sowie ein neuerer Kenntnisstand, der durch die in Anlage 4.6b dargestellten Homogenbereiche sowie durch die aktuelle Modellbezeichnung OF-O4 repräsentiert wird. Die Schnittlage der beiden Modelle OF-O3 und OF-O4 ist identisch.

Für die gebirgsmechanische Modellierung im Modellschnitt OF-O3 bzw. OF-O4 wurden die folgenden kriechfähigen Schichten berücksichtigt (Anlagen 4.6a und 4.6b):

- Schwadensalz (z3SS),
- Anhydritmittelsalz (z3AM),
- Linien-, Orange- und Bank-/Bändersalz (z3LS-OS-BK/BD), zusammengefasst zu einem Homogenbereich,
- Carnallitit (z2SF),
- Staßfurt-Folge (z2).

Als Homogenbereiche mit ausschließlich elastischen Materialeigenschaften wurden folgende Schichten im Modell unterschieden (Anlagen 4.6a und 4.6b):

- Keuper (km),
- Hutgestein (cr),
- Hauptanhydrit (z3HA).

#### 4.2.2 Homogenbereiche im Südfeld

Zwischen dem westlichen Rand der Salzstruktur und der Hauptmulde erstreckt sich eine Folge mehrerer Sättel und Mulden mit einer Vielzahl von teilweise sehr dünnen Salzschichten, deren Mächtigkeit stellenweise unter 1 m liegt. Da eine detaillierte Modellierung in dieser Größenordnung nicht notwendig ist, wurden die geologischen Strukturen mit annähernd gleichem mechanischen Verhalten zu Homogenbereichen zusammengefasst.

Die folgenden kriechfähigen Schichten wurden im Modellschnitt SF-N1 unterschieden (Anlage 4.7):

- Leine-Aller-Folge (z3-z4),
- Anhydritmittelsalz (z3AM),
- Orange- und Bank-/Bändersalz (z3OS-BK/BD), zusammengefasst zu einem Homogenbereich,
- Liniensalz (z3LS),
- Steinsalzschieben z3(Ost) der Leine-Folge im östlichen Randbereich zur Hauptmulde hin,
- Hartsalz (z2SF),
- Hauptsalz (z2HS), unterschieden in z2HS(West), z2HS(Ost) und z2HS(Basis),
- Steinsalzschieben z2(West) der Staßfurt-Folge im westlichen Randbereich zum Deckgebirge hin.

Als Homogenbereiche mit rein elastischen Materialeigenschaften wurden folgende Schichten berücksichtigt (Anlage 4.7):

- Keuper - Jura (k-j),
- Hutgestein (cr),
- Hauptanhydrit (z3HA),
- Werra-Anhydrit (z1WA).

#### 4.2.3 Homogenbereiche im Westfeld

Die westlichen Randfalten zeichnen sich durch eine stellenweise extrem engständige Faltenstruktur aus. Der Internbau ist durch zwei Teilmulden und teilweise dünne Salzschichten gekennzeichnet. Da eine detaillierte Modellierung in dieser Größenordnung nicht notwendig ist, wurden die geologischen Strukturen mit annähernd gleichem mechanischen Verhalten zu Homogenbereichen zusammengefasst. Darüber hinaus wurden Bereiche mit kleinräumigem Wechsel der geomechanischen Eigenschaften, z. B. in der Westmulde, durch eine repräsentative Folge weniger Homogenbereiche ersetzt.

Die folgenden kriechfähigen Schichten wurden im Modellschnitt WF-H2 unterschieden (Anlage 4.8):

- Leine-Aller-Folge (z3-z4) einschließlich Bank-/Bändersalz (z3BK/BD),
- kieseritisches Hartsalz (z2SF) einschließlich Übergangsschichten (z2UE) und Hangensalz (z2HG),
- sylvinitisches Hartsalz bis Übergangsschichten (z2SF-UE),
- Hauptsalz (z2HS) einschließlich Anhydritmittelsalz (z3AM).

Als Homogenbereiche mit rein elastischen Materialeigenschaften wurden folgende Schichten berücksichtigt (Anlage 4.8):

- Keuper (km),
- Hutgestein (cr) einschließlich Kreide (kr),
- Hauptanhydrit (z3HA) einschließlich Leinekarbonat (z3LK) und Decksteinsalz (z2DS).

#### 4.2.4 Homogenbereiche im Zentralbereich

##### Modellschnitt ZB-A2 durch die Abbaureihe 1

Der Modellschnitt ZB-A2 liegt in der Nähe des geologischen Profils 3.3 (Anlage 3.10), so dass dieses Profil für die Modellierung der Geologie herangezogen werden kann.

Zwischen dem westlichen Hauptanhydrit und dem Ostsattel erstreckt sich eine Folge mehrerer Sättel und Mulden mit einer Vielzahl teilweise sehr dünner Salzsichten, deren Mächtigkeit stellenweise unter 1 m liegt. Da eine detaillierte Modellierung in dieser Größenordnung nicht erforderlich ist, wurden die geologischen Strukturen idealisiert und durch eine charakteristische Folge weniger Schichten nachgebildet.

Die Schichten des Orangesalzes (z3OS) lassen sich in situ nicht eindeutig von denen des Bank-/Bändersalzes (z3BK/BD) trennen. Ihr Übergang ist fließend. Laborergebnisse liegen in einigen Fällen nur für ein Gemisch von Orangesalz und Bank-/Bändersalz vor. Bei der gebirgsmechanischen Modellierung wurden diese beiden Salze zu einem Homogenbereich zusammengefasst. Eine Ausnahme bilden die Schichten in der Nähe des östlichen Hauptanhydrits. Hier kann die Schichtgrenze zwischen Orangesalz und Bank-/Bändersalz als gesichert angesehen werden.

Die geringmächtigen Schichten des Schwadensalzes (z3SS) und das angrenzende Anhydritmittelsalz (z3AM) weisen nur geringfügig unterschiedliche mechanische Eigenschaften auf und werden deshalb nicht unterschieden. Die dünnen Bänder des Hangend- und des

Übergangssalzes (z2HG-z2UE) oberhalb des westlichen Hauptanhydrits werden dem Hauptsalz z2HS zugeschlagen. Alle weiteren im geologischen Profil 3.3 vorkommenden Schichten haben eine vergleichsweise geringe Mächtigkeit (z. B. z2DS-z3LK) und wurden nicht als eigenständiger Homogenbereich berücksichtigt.

Der zu Beginn der Modellierung vorliegende Kenntnisstand zur Geologie beschränkte sich auf den Bereich bis zu einer Teufe von ca. -400 m NN. Zusätzlich ist aufgrund von Radarmessungen die Oberseite des Basalanhydrits (z2BA) bekannt. Über den dazwischen liegenden Bereich liegen derzeit keine Kenntnisse der geologischen Struktur vor. Es wird angenommen, dass dieser Bereich vorwiegend aus Hauptsalz (z2HS) mit einem Anhydritanteil von ca. 20 - 30 % besteht. Um diese Gegebenheiten zu berücksichtigen, wurden zwar die Kriechkennwerte für Hauptsalz verwendet, jedoch ein etwas höherer Elastizitätsmodul gewählt. Das Hauptsalz z2HS2 und z2HS3 an den Modellrändern wird als ein homogener Bereich betrachtet und in seinen mechanischen Eigenschaften zunächst nicht weiter unterschieden.

Folgende kriechfähigen Homogenbereiche wurden im Modellschnitt ZB-A2 unterschieden (Anlage 4.9):

- Anhydritmittel- und Schwadensalz (z3AM-SS),
- Orangesalz (z3OS),
- Orange- und Bank-/Bändersalz (z3OS-BK/BD),
- Liniensalz (z3LS),
- Carnallitit (z2SF),
- Hauptsalz (z2HS-z3HA), stark verunreinigt durch Anhydrit,
- Hauptsalz (z2HS).

Als Homogenbereiche mit rein elastischen Materialeigenschaften wurden folgende Schichten berücksichtigt (Anlage 4.9):

- Hutgestein (cr),
- Hauptanhydrit (z3HA),
- Basalanhydrit (z2BA).

#### Modellschnitt ZB-O3 durch die Abbaureihen 2, 3 und 4 entlang der Ostquerschläge

Der Modellschnitt ZB-O3 verläuft in der Nähe des geologischen Profils 3.1, weist jedoch eine Verschwenkung von ca. 10° auf (Anlage 3.8). Die größten Abweichungen zwischen Modellschnitt ZB-O3 und im Profil 3.1 treten im Osten des Modells auf. Deshalb wurden zusätzlich die geologischen Sohlenrisse zur Modellierung der Homogenbereiche herangezogen.

Form und Lage der Anhydritschichten unterscheiden sich wesentlich von denen des nördlichen Modellschnitts ZB-A2. Der sich von Westen über das Abbaugelände ziehende überkippte Hauptanhydrit ist nur in wenige Schollen zerlegt. Die im geologischen Profil 3.1 eingezeichneten Durchtrennungszonen können als repräsentativ gelten und wurden bei der gebirgsmechanischen Modellierung berücksichtigt.

Folgende kriechfähigen Homogenbereiche wurden im Modellschnitt ZB-O3 unterschieden (Anlage 4.10a):

- Anhydritmittel- und Schwadensalz (z3AM-SS),
- Bank-/Bändersalz (z3BK/BD),
- Orangesalz (z3OS),
- Liniensalz (z3LS),
- Carnallit (z2SF),
- Hauptsalz (z2HS).

Um den Ergebnissen aktueller Kriechuntersuchungen Rechnung zu tragen, wurde das Hauptsalz (z2HS) in zwei Bereiche mit unterschiedlichen Kriecheigenschaften unterteilt. Die entsprechenden Homogenbereiche z2HS(West) und z2HS(Ost) sind in Anlage 4.10b dargestellt.

Als Homogenbereiche mit rein elastischen Materialeigenschaften wurden folgende Schichten berücksichtigt (Anlagen 4.10a und 4.10b):

- Hutgestein (cr),
- Hauptanhydrit (z3HA).

#### 4.3 Primärer Gebirgsspannungszustand

Als primärer Gebirgsspannungszustand wird ein mit der Tiefe 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 Tiefe festgelegt. Dabei wird der für Salzgebirge gültige Temperaturgradient ( $2 \text{ K/100 m}$ ) auch für das Deckgebirge gewählt. Die Temperatur am oberen Rand der gebirgsmechanischen Modelle (i. allg. 130 m unter Geländeoberkante) beträgt  $290,8 \text{ K}$ .

#### 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  $\dot{\epsilon}_{ij}$  zusammengefasst:

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

Darin bedeuten:

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

#### Elastische Formänderungen

Die elastische Verzerrungsrate ist bestimmt durch das erweiterte Hookesche Gesetz:

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

mit

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

und den Materialkonstanten

- E = Elastizitätsmodul (MPa),
- $\nu$  = Querdehnungszahl (-).

Die in den Berechnungen verwendeten Werte für die elastischen Materialkonstanten sind 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 geomechani-

sche Verhalten des Anhydrits wiedergeben. Daher wird konservativ die experimentell für den Nachbruchbereich ermittelte Steifigkeit von Hauptanhydrit verwendet. Die Materialdaten für das Hutgestein wurden ebenfalls im Labor ermittelt. Die Kennwerte für Keuper bzw. Keuper-Jura sind aus Erfahrungswerten abgeschätzt.

Geologische Einheit	Symbol	E-Modul (MPa)	Querdehnungszahl
Keuper	k, km	2000	0,27
Keuper-Jura	k-j	2000	0,27
Hutgestein	cr	10000	0,27
Hauptanhydrit	z3HA	30000	0,27
Basalanhydrit	z2BA	50000	0,27
Werra-Anhydrit	z1WA	50000	0,27
alle kriechfähigen Salze	z2, z3, z4	25000	0,27

Tab. 4.1: Elastische Kennwerte der geologischen Schichten

#### 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

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

In der dreidimensionalen Verallgemeinerung ist die Richtung des stationären Kriechens 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 (BGR 1998c). Die in Laboruntersuchungen für die Salze der einzelnen Homogenbereiche ermittelten Werte für  $A^*$  sind für die hier untersuchten Grubenfelder in den Tabellen 4.2 bis 4.5 zusammengestellt (BGR 1998c).

Homogenbereich	Symbol	$A^*$	Bandbreite von $A^*$	Anmerkung
Schwadensalz	z3SS	1/8	1/32 – 1/4	Datenübertrag aus Nordstrecke
Anhydritmittelsalz	z3AM	1/16	1/32 – 1/8	
Linien-, Orange- und Bank-/Bändersalz	z3LS-OS-BK/BD	1	1/8 - 2	zusammengefasster Homogenbereich bestehend aus z3LS, z3OS und z3BK/BD
Carnallit	z2SF	10	1 - 100	
Staßfurt-Folge	z2	1/2	1/8 - 4	zusammengefasst

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

Homogenbereich	Symbol	$A^*$	Bandbreite von $A^*$	Anmerkung
Leine-Aller-Folge	z3-z4	1/8	1/16 – 1/2	
Anhydritmittelsalz	z3AM	1/32	1/64 – 1/32	
Orange- und Bank-/Bändersalz	z3OS-BK/BD	1/4	1/4 – 1/2	Datenübertrag aus Südostfeld
Linien-salz	z3LS	1	1/8 - 2	
Leine-Folge	z3(Ost)	1/4	1/8 – 1/2	im Bereich der Hauptmulde, zusammengefasst, Datenübertrag aus Südostfeld
Hartsalz	z2SF	1/32	1/64 – 1/16	
Hauptsalz	z2HS(West)	1	1/2 - 2	im Westlichen Schachtsattel
Hauptsalz	z2HS(Ost)	1/16	1/16 – 1/4	im Östlichen Schachtsattel
Hauptsalz	z2HS(Basis)	1/16	1/16 – 1/4	oberhalb des Werra-Anhydrits
Staßfurt-Folge	z2(West)	1/4	-	westl. d. Westl. Schachtsattels, außerhalb des Probenahmebereichs, geschätzt

Tab. 4.3: Relative Kriechfähigkeit  $A^*$  der modellierten Homogenbereiche im Südfeld

Homogenbereich	Symbol	A*	Bandbreite von A*	Anmerkung
Leine-Aller-Folge	z3-z4	1/8	1/16 – 1/2	einschließlich z3BK/BD
Hartsalz (kieserit.)	z2SF	1/32	1/64 – 1/16	einschließlich z2UE und z2HG
Hartsalz (sylvinit.)	z2SF-UE	1/2	1/8 - 1	
Hauptsalz	z2HS	1	1/2 - 2	einschließlich z3AM

Tab. 4.4: Relative Kriechfähigkeit A\* der modellierten Homogenbereiche im Westfeld

Homogenbereich	Symbol	A*	Bandbreite von A*	Anmerkung
Anhydritmittel- und Schwadensalz	z3AM-SS	1/32	1/64 - 1/32	
Bank-/Bändersalz	z3BK/BD	1/8	1/8 - 1/2	nur im Profil ZB-O3
Orange- und Bank-/Bändersalz	z3OS-BK/BD	1/8	1/64 - 1/2	nur im Profil ZB-A2
Orangesalz	z3OS	1/2	1/8 - 2	
Liniensalz	z3LS	1/2	1/8 - 2	
Carnallit	z2SF	10	1 - 100	
Hauptsalz	z2HS	1/16	1/16 - 1/4	einschließlich aller übrigen Salzsichten des z2
Hauptsalz (mit Anhydrit)	z2HS-z3HA	1/16	1/16 - 1/4	stark verunreinigtes Hauptsalz im Profil ZB-A2

Tab. 4.5: Relative Kriechfähigkeit A\* der modellierten Homogenbereiche im Zentralbereich

### 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:

$$F = 0 = \alpha \cdot J_1 + \sqrt{J_2^D} - k \quad (6)$$

- 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:

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

mit  $\eta$  = Viskosität (MPa·d),  
 $Q$  = 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 überschritten 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.

### Bruchverhalten von Anhydrit

Für die Beurteilung der Beanspruchung des Hauptanhydrits werden die Ergebnisse triaxialer Kompressionsversuche an Hauptanhydritproben herangezogen. Im Hinblick auf die in situ anzutreffende Gebirgsklüftigkeit und die damit verbundene Reduzierung der Verbandsfestigkeit gegenüber der Festigkeit des ungeklüfteten kompakten Gesteins werden nur die im

Labor an ungeklüfteten Prüfkörpern ermittelten Nachbruchfestigkeiten im Sinne einer konservativen Betrachtungsweise verwendet. Diese Nachbruchfestigkeiten können für den im ERA Morsleben relevanten Spannungsbereich in guter Näherung durch das Drucker-Prager-Kriterium analog zu Gl. (6) beschrieben werden.

Als Parameter für dieses Bruchkriterium wurden auf der Grundlage der o. g. Laborversuche folgende Werte ermittelt:

$$\alpha = 0,415,$$

$$k = 0,0 .$$

#### Materialverhalten von Versatz

Sofern in den Modellberechnungen die Verfüllung von Abbauen, beispielsweise in den Kalilagern, zu berücksichtigen ist, wird das Verfüllmaterial (Versatz) 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  $\nu = 0,45$  angenommen. Aus diesen Werten resultiert ein Kompressionsmodul von  $K = 58,3 \text{ MPa}$ . In einigen zusätzlichen Berechnungsvarianten wird die Versatzsteifigkeit auf  $E = 3500 \text{ MPa}$  erhöht.

## 5 Modellberechnungen

Alle hier betrachteten Grubenfelder weisen, insbesondere aufgrund der vorliegenden Hohlraumkonfigurationen, eine mehr oder weniger deutlich ausgeprägte dreidimensionale Tragwirkung auf, die im strengen Sinn nur mit entsprechenden räumlichen Berechnungsmodellen zu erfassen ist. Da bei der Diskretisierung der Berechnungsmodelle ein sehr hoher Detaillierungsgrad erforderlich ist, ist die Durchführung derartiger räumlicher Berechnungen aber nur sehr begrenzt möglich. Daher werden die untersuchten Grubenfelder vereinfachend in zweidimensionalen Modellen abgebildet. Im Hinblick auf die aus den Modellberechnungen abzuleitende geomechanische Beurteilung der Barrierenintegrität ist diese Vorgehensweise zulässig, da die zweidimensionalen Modelle i. a. zu ungünstigeren Spannungs- und Verformungszuständen führen und damit konservativ abdeckend sind.

In allen Berechnungsmodellen wurde neben der Salzstruktur nicht das gesamte Deckgebirge, sondern vereinfachend nur der vom Salzspiegel bis ca. 0 m NN reichende Teil abgebildet. Der darüber liegende, bis zur Geländeoberfläche reichende Teil wurde in seiner Tragwirkung vernachlässigt, in seiner Lastwirkung jedoch durch entsprechende Ersatzlasten berücksichtigt, die sich aus einer angenommenen mittleren Deckgebirgsdichte von  $2,2 \text{ kg/dm}^3$  ergeben.

### 5.1 Modellberechnungen zum Ostfeld

#### 5.1.1 Geometrische Idealisierung und Diskretisierung des Ostfeldes

Aufgrund der ausgeprägten NNW-SSE-Richtung der geologischen Struktur und der ebenso ausgerichteten Abbaureihen im Ostfeld sowie aufgrund des scheibenförmigen Pfeilers zwischen den Abbauen 1 und 4 ist eine geometrische Idealisierung des Ostfeldes als zweidimensionales Modell zweckmäßig. Als Berechnungsebene für diese Modellierung wird ein vertikal verlaufender Schnitt durch den zentralen Bereich des Ostfeldes gewählt, der in der Nähe des geologischen Profils 3.1 (BGR 1997, BGR 1999b) verläuft. Der für die Modellierung gewählte Berechnungsausschnitt beträgt in horizontaler Richtung 650 m und in vertikaler Richtung 485 m. Die Oberkante des Berechnungsmodells liegt ca. 130 m unterhalb der Geländeoberkante.

Für die Berechnungen wurden zwei verschiedene FE-Modelle erstellt:

- Das Modell OF-O3 berücksichtigt bezüglich des Konturverlaufs des Hauptanhydrits den älteren geologischen Kenntnisstand (Anlage 4.6a).

- Das Modell OF-O4 berücksichtigt den aktuellen geologischen Kenntnisstand (Anlage 4.6b), d. h. die Kontur der östlich und westlich der Abbaue anstehenden Hauptanhydritklippen ist gegenüber Modell OF-O3 anders modelliert. Insbesondere wurde der sich als Auskragung bis in die Firste des Abbaus 1 erstreckende Hauptanhydrit berücksichtigt. Darüber hinaus reicht in diesem Modell der Hauptanhydrit in der östlichen Klippe lokal bis an den Stoß des Abbaus 4.

Die Diskretisierung der beiden FE-Modelle ist den Anlagen 5.1 bis 5.4 zu entnehmen. Das Modell OF-O3 umfasst 7566 isoparametrische 8-Knoten-Elemente und 22633 Knoten. Das Modell OF-O4 weist 8256 isoparametrische 8-Knoten-Elemente und 24703 Knoten auf. Die Knoten des östlichen und westlichen Modellrandes sind vertikal verschieblich gelagert und in horizontaler Richtung mit Federelementen elastisch gebettet. Sie sind so ausgelegt, dass ihre Steifigkeit einem Gebirgsbereich von 650 m Breite mit einem Elastizitätsmodul von  $E = 25000 \text{ MPa}$  und einer Querdehnungszahl von  $\nu = 0,27$  entspricht. Die Knoten des unteren Modellrandes sind horizontal verschieblich gelagert und in vertikaler Richtung fixiert.

#### 5.1.2 Modellvarianten zum Ostfeld

Folgende Basismodelle und Berechnungsvarianten wurden gewählt:

- OF-O3-A: Das Basismodell OF-O3-A berücksichtigt die früher angenommene Kontur des Hauptanhydrits im Bereich der Abbaue 1 und 4 des Ostfeldes.
- OF-O3-B: Diese Modellvariante unterscheidet sich vom Basismodell OF-O3-A dadurch, dass hier die Tragwirkung des Pfeilers zwischen den Abbauen 1 und 4 auf der 4. Sohle unberücksichtigt bleibt, um die Auswirkung eines Pfeilerversagens auf die großräumigen Spannungs- und Verformungszustände und damit auch auf die Integrität der Salzbarriere beurteilen zu können.
- OF-O4-A: Dieses Modell berücksichtigt den gegenwärtigen Kenntnisstand zur Geologie im Ostfeld und unterscheidet sich vom Basismodell OF-O3-A durch die während der Herrichtungsarbeiten in den Abbauen 1 und 4 festgestellte veränderte Kontur der westlichen und östlichen Hauptanhydritklippen.

Der Berechnungszeitraum beträgt jeweils insgesamt 100 Jahre. Er beginnt mit dem Auffahrtzeitpunkt der Abbaue (ca. 1951) und endet im Jahr 2051, so dass über die Betriebsdauer hinaus ein ausreichend großer Prognosezeitraum betrachtet wird. Der gegenwärtige Zeitpunkt, bezogen auf den Zeitpunkt der Modellerstellung, ist ungefähr nach 45 Jahren Berechnungsdauer erreicht; dies entspricht dem Jahr 1996.

## 5.2 Modellberechnungen zum Südfeld

### 5.2.1 Geometrische Idealisierung und Diskretisierung des Südfeldes

Die ausgeprägte NNW-SSE-Richtung der geologischen Struktur und die ebenso ausgerichteten Abbaureihen im Südfeld ermöglichen eine geometrische Idealisierung als zweidimensionales Modell. Zwar wird die dreidimensionale Tragwirkung im Bereich der Pfeiler zwischen den Abbaureihen nicht berücksichtigt, dennoch ist die 2D-Modellierung insbesondere für den mittleren Bereich der langgestreckten Abbaue zulässig. Als Berechnungsebene für das 2D-Modell wird ein vertikal verlaufender Schnitt festgelegt, der entlang dem geologischen Profil 1.3 verläuft (Anlage 4.7). Die Ebene des gewählten Profils steht nahezu senkrecht auf der Streichrichtung der geologischen Struktur und den Längsachsen der Abbaue auf den einzelnen Sohlen.

Die Lage der Berechnungsebene wurde so gewählt, weil dieser Schnitt genau durch den Abbau 2 des Einlagerungsbereiches auf der 5a-Sohle verläuft. Da dieser Abbau im Vergleich zu den anderen Einlagerungskammern die größten Querschnittsabmessungen aufweist, erfasst der gewählte Schnitt den Gebirgsbereich mit dem höchsten Durchbauungsgrad. Aufgrund des hohen Durchbauungsgrades und der Nähe der dortigen Abbaue zum Hauptanhydrit werden in diesem Schnitt die für die Bewertung der Barrierenintegrität ungünstigsten Beanspruchungen erwartet.

Für den Profilschnitt SF-N1 wurde ein ebenes Berechnungsmodell erstellt. Das Modell hat eine Höhe von 800 m und eine Breite von 1000 m. Der obere Rand des Modells liegt in einer Tiefe von 0 m NN und somit ca. 120 m unter der Geländeoberfläche. Der untere Rand des Berechnungsmodells liegt bei 800 m unter NN und somit in den oberen Strukturen des Werra-Anhydrits. Der untere Modellrand befindet sich nahezu 400 m unterhalb der am tiefsten gelegenen Steinsalzabbaue auf der 5a-Sohle, so dass Einflüsse aus den Randbedingungen auf die Berechnungsergebnisse für den betrachteten Zeitraum von 100 Jahren ausgeschlossen werden können.

Der rechte Modellrand befindet sich mehr als 400 m östlich vom Kalilager B im Bereich der Hauptmulde. Der linke Rand des Berechnungsmodells liegt ca. 500 m entfernt von den Steinsalzabbauen auf der 5a-Sohle und reicht damit im Teufenbereich der Grube bis in die Schichten des Jura hinein. Damit weisen auch die seitlichen Modellränder einen genügend großen Abstand von den hier betrachteten Hohlraumbereichen auf.

Kontur und Lage der Hohlräume entsprechen dem Kenntnisstand des Jahres 1998. Zwischenzeitlich wurden diese Angaben auf der Basis neuer Hohlraumvermessungen aktualisiert. Daraus resultieren Veränderungen in der geometrischen Form, der Größe und Lage der Hohlräume, die bezüglich der großräumigen mechanischen Beanspruchung und der daraus abgeleiteten Beurteilung der Barrierenintegrität jedoch nur von untergeordneter Bedeutung sind.

Die Diskretisierung des FE-Modells SF-N1 ist den Anlagen 5.5 und 5.6 zu entnehmen. Das Modell enthält einschließlich der Hohlräume 11493 isoparametrische 8-Knoten-Elemente und 34670 Knoten. Unter Berücksichtigung der Randbedingungen ergeben sich damit 69029 Freiheitsgrade. Nach dem Ausbruch der Hohlräume verbleiben 9829 Elemente mit 30198 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  $E = 25000 \text{ MPa}$  und einer Querdehnungszahl von  $\nu = 0,27$  ausgegangen wird. Damit ergibt sich in den Randelementen mit der Annahme eines ebenen Verzerrungszustandes ein Elastizitätsmodul von  $2075 \text{ MPa}$ . Die Querdehnungszahl wird in diesen Elementen zu  $\nu = 0$  angenommen. Die Knoten des unteren Modellrandes sind horizontal verschieblich gelagert und in vertikaler Richtung fixiert.

### 5.2.2 Modellvarianten zum Südfeld

Neben dem Basismodell wurden mehrere Modellvarianten untersucht:

SF-N1-A: Dieses Modell ist das Basismodell in der Berechnungsebene SF-N1. Die Beurteilung der Integrität der Salzbarriere erfolgt auf der Grundlage dieses Basismodells.

SF-N1-B: Diese Variante unterscheidet sich von dem Basismodell SF-N1-A durch ein höheres Kriechvermögen im Homogenbereich z2(West) sowie im Hauptsalz des Östlichen Schachtsattels z2HS(Ost).

SF-N1-C: Diese Variante unterscheidet sich von dem Basismodell SF-N1-A durch die Annahme eines steiferen Deckgebirges. Die Steifigkeit des Homogenbereiches Keuper - Jura entspricht hier der Steifigkeit des Hutgesteins ( $E = 10000 \text{ MPa}$ ).

Der Ausbruch der Hohlräume wurde jeweils auf das Jahr 1939 gelegt. Dies entspricht annähernd dem Mittel der Ausbruchszeitpunkte der einzelnen Hohlräume. Dementsprechend ergibt sich rechnerisch eine heutige Standzeit von 59 Jahren. Vergleichende Berechnungen haben gezeigt, dass das sukzessive Ausbrechen, d. h. das Auffahren der Hohlräume zu den wirklichen Zeitpunkten, nur in den ersten zwei Jahrzehnten zu anderen Ergebnissen führt. Um eine Prognose für die zukünftige Betriebs- bzw. Nachbetriebszeit zu ermöglichen, erstreckt sich der Berechnungszeitraum auf 100 Jahre. Das Ende der Berechnung entspricht somit dem Jahr 2039.

### 5.3 Modellberechnungen zum Westfeld

#### 5.3.1 Geometrische Idealisierung und Diskretisierung des Westfeldes

Die Abbaureihe 1 und das Kalilager B sowie die Geologie im Westfeld sind in N-S- bis NNW-SSE-Richtung ausgerichtet. Dies ermöglicht eine geometrische Idealisierung als zweidimensionales Modell. Als Berechnungsebene für das 2D-Modell wird ein vertikal verlaufender Schnitt festgelegt, der östlich des Schachtes Bartensleben entlang dem geologischen Profil 3.1 verläuft. Westlich des Schachtes knickt die Schnittebene ab. Sie verläuft im Westfeld ungefähr in WSW-ENE-Richtung. Die gewählte Schnittebene steht nahezu senkrecht auf den Streichrichtungen der geologischen Struktur und den Längsachsen der Abbaue auf den einzelnen Sohlen.

Die Lage der Berechnungsebene wurde so gewählt, dass der Schnitt durch die Abbaue 1n bzw. 1s des Westfeldes verläuft. Da diese Abbaue im Vergleich mit den weiter nördlich liegenden Abbauen 2 und 3 die größten Querschnittsabmessungen aufweisen, erfasst der gewählte Schnitt den Gebirgsbereich mit dem höchsten Durchbaugungsgrad. Daher werden in diesem Schnitt die für die Bewertung der Integrität ungünstigsten Beanspruchungen erwartet, die konservativ abdeckend auf die ebenfalls für die Einlagerung genutzten Abbaue 2 und 3 übertragen werden können.

Die Abbaue 1n und 1s haben einen annähernd quadratischen Grundriss und weisen daher ein räumliches Tragverhalten auf. Durch die zweidimensionale Idealisierung dieser Hohlraumstruktur wird eine Tragwirkung nur in WSW-ENE-Richtung berücksichtigt. Die Tragwirkung des Pfeilers zwischen den Abbauen 1n und 1s kann nicht vernachlässigt werden, lässt sich aber wegen der parallel zur Modellebene verlaufenden Pfeilerachse nicht direkt erfassen. Daher wird diese Tragwirkung näherungsweise durch eine Drehung des Pfeilers um  $90^{\circ}$  berücksichtigt. In Anlage 3.6 zeigt sich dies durch einen Sprung im Schnittlinienverlauf. Der

linke und der rechte Abbau repräsentieren näherungsweise die östlichen und westlichen Bereiche der Abbaue 1n und 1s.

Der genaue Verlauf der Hohlraumkontur unter dem heutigen Sohlenniveau ist nicht bekannt. Der linke und der rechte Abbau werden in ihrer Form symmetrisch angenommen.

Das FE-Modell hat eine Höhe von 650 m und eine Breite von 1100 m. Der obere Rand des Modells liegt in einer Teufe von 0 m NN und somit ca. 130 m unter der Geländeoberfläche. Der untere Rand des Berechnungsmodells liegt bei 650 m unter NN und somit in den oberen Strukturen des Werra-Anhydrits. Der untere Modellrand befindet sich nahezu 175 m unterhalb der am tiefsten gelegenen Kaliabbaue im Lager B und 270 m unterhalb der großen Abbaue im Lager W auf der 4. Sohle, so dass Einflüsse aus den Randbedingungen auf die Berechnungsergebnisse für den betrachteten Zeitraum von 100 Jahren ausgeschlossen werden können.

Der rechte Modellrand befindet sich mehr als 380 m östlich vom Kalilager B im Bereich der Hauptmulde. Der linke Rand des Berechnungsmodells liegt ca. 340 m entfernt von den Hartsalzabbauen 1n und 1s auf der 4. Sohle und reicht damit bis in das Nebengebirge hinein. Damit weisen die auch die seitlichen Modellränder einen genügend großen Abstand von den betrachteten Hohlräumen auf, um eine gegenseitige Beeinflussung zu vermeiden.

Die Diskretisierung des FE-Modells WF-H2 ist den Anlagen 5.7 bis 5.9 zu entnehmen. Das Modell enthält einschließlich der Hohlräume 7877 isoparametrische 8-Knoten-Elemente und 23816 Knoten. Unter Berücksichtigung der Randbedingungen ergeben sich damit 47389 Freiheitsgrade. Nach dem Ausbruch der Hohlräume verbleiben 7351 Elemente mit 22556 Knoten. Die Knoten des linken und rechten Modellrandes sind vertikal verschieblich gelagert und in horizontaler Richtung elastisch gebettet. Die seitliche Bettung wird durch horizontale Federelemente entlang der beiden Ränder simuliert, bei deren Auslegung von einem 650 m breiten elastischen Gebirge mit einem Elastizitätsmodul von  $E = 25000 \text{ MPa}$  und einer Querdehnungszahl von  $\nu = 0,27$  ausgegangen wird. Die Knoten des unteren Modellrandes sind horizontal verschieblich gelagert und in vertikaler Richtung fixiert.

### 5.3.2 Modellvarianten zum Westfeld

Neben dem Basismodell wurden mehrere Modellvarianten untersucht:

WF-H2-A: Dieses Modell ist das Basismodell in der Berechnungsebene WF-H2. Die Beurteilung der Integrität der Salzbarriere erfolgt auf der Grundlage dieses Basismodells.

WF-H2-B: Diese Variante unterscheidet sich von dem Basismodell WF-H2-A durch die Steifigkeit des Versatzes im Kalilager B. Während im Basismodell für den Versatz ein Elastizitätsmodul von 17,5 MPa angesetzt wird, wird er in der Variante WF-H2-B mit 3500 MPa angenommen.

WF-H2-C: In dieser Variante wird die Tragwirkung des Pfeilers zwischen den Abbaukammern 1n und 1s vernachlässigt, so dass beide Abbaue als ein Hohlraum modelliert sind.

Der Ausbruch der Hohlräume wurde auf das Jahr 1925 gelegt. Dies entspricht annähernd dem Mittel der Ausbruchszeitpunkte der einzelnen Hohlräume. Dementsprechend ergibt sich rechnerisch eine heutige Standzeit von ca. 72 Jahren. Vergleichende Berechnungen haben gezeigt, dass das sukzessive Ausbrechen der Hohlräume zu den wirklichen Zeitpunkten nur in den ersten zwei Jahrzehnten zu anderen Ergebnissen führt. Um eine Prognose für die zukünftige Betriebs- bzw. Nachbetriebszeit zu ermöglichen, erstreckt sich der Berechnungszeitraum auf 100 Jahre. Das Ende der Berechnung entspricht somit dem Jahr 2025.

## 5.4 Modellberechnungen zum Zentralbereich

### 5.4.1 Geometrische Idealisierung und Diskretisierung des Zentralbereichs

Für die geomechanische Modellierung des Zentralbereichs der Grube Bartensleben wurden zwei vertikale Berechnungsebenen gewählt. Die Lage dieser Schnitte wurde so festgelegt, dass sie für den Zentralbereich repräsentativ sind:

- Das Profil ZB-A2 verläuft durch das Abbausystem 1a. Es schneidet sechs Steinsalzabbau und zwei Abbaue des Kalilagers C (Anlage 4.4). Der Durchbauungsgrad ist in diesem Schnitt im Vergleich zu anderen Teilen des Zentralbereichs relativ gering. Der Hauptanhydrit ist stark zerbrochen und liegt in Schollen vor. Die Berechnungen in dieser Profilebene ermöglichen insbesondere Aussagen über die gebirgsmechanische Beanspruchung der Salzbarriere im Bereich des Abbaus 1a der 1. Sohle.
- Das parallel verlaufende und 120 m südlicher liegende Profil ZB-O3 schneidet den Zentralbereich in der Nähe der Ostquerschläge. Neben den Abbauen der Kalilager C und D

werden Steinsalzabbaue der 2., 3. und 4. Abbaureihe geschnitten (Anlage 4.5). Das Profil befindet sich an der Stelle des Zentralbereichs mit dem größten Durchbauungsgrad. Im Gegensatz zum Profil ZB-A2 liegt der Hauptanhydrit hier in kompakterer Form vor. Er ist nur an wenigen Stellen durchtrennt.

Die ausgeprägte NNW-SSE-Richtung der geologischen Struktur und die ebenso ausgerichteten Abbaureihen ermöglichen eine geometrische Idealisierung als zweidimensionale Modelle. Die Schnittebene der Profile wurde so gelegt, dass sie möglichst senkrecht auf den Streichrichtungen der geologischen Struktur auf den einzelnen Sohlen und den Längsachsen der Abbaue steht.

Für die beiden Profilschnitte wurden unterschiedliche Modelle erstellt. Der obere Rand der Modelle liegt in einer Teufe von 0 m NN und somit ca. 130 m unter der Geländeoberfläche. Der untere Rand der Modelle liegt mindestens 190 m unterhalb der tiefsten Abbaue, so dass Randeinflüsse weitgehend ausgeschlossen werden können.

Der rechte Modellrand befindet sich in dem nach Osten an die Hauptmulde angrenzenden Ostsattel, der aus Hauptsalz z2HS mit geringer Kriechfähigkeit besteht. Es befinden sich in diesem Bereich keine Abbaue. Dadurch sind dort nur geringe, vernachlässigbare Verschiebungen zu erwarten. Dementsprechend werden die kinematischen Randbedingungen festgelegt. Sie erlauben Vertikal-, aber keine Horizontalbewegungen.

Der linke Modellrand liegt im Östlichen Schachtsattel und in ausreichend großem Abstand zu den Abbauen. Die Knoten des linken Randes sind in vertikaler Richtung verschieblich. In horizontaler Richtung ist der Modellrand elastisch gebettet. Die Federelemente sind so vorgespannt, dass sie im Gleichgewicht mit dem lithostatischen Gebirgsdruck stehen. Die Dichte des Gebirges wird dabei mit  $\gamma = 2,2 \text{ kg/dm}^3$  berücksichtigt. Zur Auslegung der Federsteifigkeit wird von einem angrenzenden 650 m breiten elastischen Gebirge mit einem E-Modul von  $E = 25000 \text{ MPa}$  und einer Querdehnungszahl von  $\nu = 0,27$  ausgegangen.

Zur Modellierung der Kontur der Abbaue wurde die Vermessung der DBE herangezogen. Da Breite, Höhe und Kontur eines Abbaus über seine Länge i. a. veränderlich sind, wurde aus den vermessenen Profilen dasjenige ausgewählt, das im Bereich der Schnittebene des FE-Modells repräsentativ ist.

Aus der Festlegung der Lage und der Kontur übereinanderliegender Abbaue resultiert die geometrische Konfiguration der Schweben zwischen diesen Abbauen. Die Schwebenabmessungen wurden im Anschluss an die Modellbildung kontrolliert. Dazu wurde die Kontur der Sohle und der Firste jedes Abbaus im Grundriss ermittelt. Die Überlappung der Sohlkontur eines Abbaus mit der Firstkontur des darunterliegenden Abbaus ergibt eine gemeinsame Schnittfläche, aus der eine repräsentative mittlere Schwebenbreite bestimmt wurde. Ggf. wurde dann die Breite der Abbaue in den Berechnungsmodellen so angepasst, dass sich daraus diese mittlere Schwebenbreite ergibt.

Der Abstand der Abbaue zu geologischen Schichtgrenzen, insbesondere zum Hauptanhydrit, wurde in den Berechnungsmodellen ggf. an die realen Gegebenheiten angepasst.

Das ggf. berücksichtigte Verfüllen von Abbauen mit Versatz wurde derart modelliert, dass der Versatz in einem Schritt eingebracht wird und zu diesem Zeitpunkt spannungslos ist. Ein bei der Verfüllung eventuell verbleibender oder sich durch Setzung bildender Spalt unter der Abbaufirste wurde nicht berücksichtigt.

#### FE-Modell ZB-A2

Das FE-Modell ZB-A2 hat eine Höhe von 700 m und eine Breite von 620 m. In vertikaler Richtung ist der Bereich vom Hutgestein bei 0 m NN bis in die oberen Strukturen des Basalanhydrits modelliert. Die Diskretisierung des FE-Modells ZB-A2 ist den Anlagen 5.10 und 5.11 zu entnehmen. Das Modell enthält 6892 isoparametrische 8-Knoten-Elemente und 20889 Knoten. Unter Berücksichtigung der Randbedingungen ergeben sich damit 41503 Freiheitsgrade. Nach dem Ausbruch der Abbaue verbleiben 5816 Elemente mit 18055 Knoten und 35835 Freiheitsgraden.

#### FE-Modell ZB-O3

Das FE-Modell ZB-O3 erstreckt sich bis in eine Teufe von -575 m NN. Der ab dieser Teufe vorliegende Basalanhydrit wurde bei der Modellierung nicht berücksichtigt. Im Kalilager C wurden drei Abbaue berücksichtigt, von denen die Abbaue auf der 2. und 4. Sohle bereits seit mehreren Jahrzehnten verfüllt sind. Daher wurden diese Abbaue generell mit Versatz modelliert.

Die Diskretisierung des FE-Modells ZB-O3 ist den Anlagen 5.12 und 5.13 zu entnehmen. Das Modell umfasst 29140 Knoten und 9745 isoparametrische 8-Knoten-Elemente mit 49525 Freiheitsgraden. Nach Ausbruch der Hohlräume verbleiben 8252 Elemente mit 25558 Knoten und 50940 Freiheitsgraden.

#### 5.4.2 Modellvarianten zum Zentralbereich

Für die beiden Berechnungsschnitte ZB-A2 und ZB-O3 wurde jeweils ein Basismodell erstellt, das die bestmögliche Modellierung des Zentralbereichs unter Berücksichtigung der zum Zeitpunkt der Modellerstellung bekannten geologischen Aufnahmen und Materialkennwerte darstellt. Darüber hinaus sind mehrere Varianten der Modelle untersucht worden, um die Wirksamkeit der Verfüllung der Abbaue zu untersuchen.

Folgende Basismodelle und Berechnungsvarianten wurden gewählt:

- ZB-A2-B: Dieses Modell ist das Basismodell für den Berechnungsschnitt ZB-A2. Eine Verfüllung der Abbaue wird nicht berücksichtigt. Die Beurteilung der Integrität der Salzbarriere erfolgt auf der Grundlage dieses Basismodells.
- ZB-A2-C: In dieser Variante wird angenommen, dass alle Abbaue 60 Jahre nach ihrem Ausbruch verfüllt werden. Das Versatzmaterial wird kompressibel und elastisch mit einem Elastizitätsmodul von  $E = 17,5 \text{ MPa}$  (entspricht einem Kompressionsmodul von  $K = 58,3 \text{ MPa}$ ) angenommen.
- ZB-A2-E: Diese Variante entspricht der Variante ZB-A2-C. Es wird jedoch für die Verfüllung der Abbaue ein steiferes Versatzmaterial mit einem Elastizitätsmodul von  $E = 3500 \text{ MPa}$  (entspricht einem Kompressionsmodul von  $K = 11667 \text{ MPa}$ ) angenommen.
- ZB-O3-P: Dieses Modell ist das Basismodell für den Berechnungsschnitt ZB-O3. Eine sofortige und vollständige Verfüllung erfolgt in den Abbauen des Kalilagers C auf der 2. bis 4. Sohle. Die Beurteilung der Integrität der Salzbarriere erfolgt auf der Grundlage dieses Basismodells.
- ZB-O3-Q: In dieser Variante wird angenommen, dass alle offenstehenden Abbaue 60 Jahre nach ihrem Ausbruch verfüllt werden. Das Versatzmaterial wird kompressibel und elastisch mit einem Elastizitätsmodul von  $E = 17,5 \text{ MPa}$  (entspricht einem Kompressionsmodul von  $K = 58,3 \text{ MPa}$ ) angenommen.

ZB-O3-S: Diese Variante entspricht der Variante ZB-O3-Q. Es wird jedoch für die Verfüllung der Abbaue ein steiferes Versatzmaterial mit einem Elastizitätsmodul von  $E = 3500 \text{ MPa}$  (entspricht einem Kompressionsmodul von  $K = 11667 \text{ MPa}$ ) angenommen.

ZB-O3-1: Diese Variante entspricht dem Basismodell ZB-O3-P. Es erfolgt hier jedoch eine Trennung des Homogenbereichs z2HS in einen westlichen Teil, z2HS(West), und in einen östlichen Teil, z2HS(Ost), um im Hinblick auf aktuelle Laborergebnisse eine unterschiedliche Duktilität dieser beiden Teilbereiche berücksichtigen zu können. Ferner sind aufgrund des aktuellen Kenntnisstandes für folgende Homogenbereiche andere Werte für die relative Kriechfähigkeit  $A^*$  gewählt worden: z3BK/BD ( $A^* = 1/16$ ), z3OS ( $A^* = 1/16$ ) und z3LS ( $A^* = 1$ ).

Der Ausbruch der Hohlräume wurde auf das Jahr 1936 festgelegt. Dies entspricht annähernd dem Mittel der Ausbruchzeitpunkte der einzelnen Hohlräume. Daraus ergibt sich eine heutige Standzeit von 60 Jahren, bezogen auf den Zeitpunkt der Modellerstellung. Vergleichende Berechnungen zeigen, dass das sukzessive Ausbrechen, d. h. das Auffahren der Hohlräume zu den wirklichen Zeitpunkten, nur in den ersten zwei Jahrzehnten zu anderen Ergebnissen führt. Nach 60 Jahren sind die Ergebnisse beider Berechnungen nahezu identisch. Deshalb wurden alle Berechnungen mit instantanem Ausbruch der Hohlräume durchgeführt.

In den Basismodellen ZB-A2-B und ZB-O3-P sowie in Variante ZB-O3-1 wurde ein Berechnungszeitraum von 100 Jahren gewählt, der für die Prognose der zukünftigen Beanspruchungszustände als ausreichend angesehen wird. Das Ende der mit diesen Modellen durchgeführten Berechnungen entspricht somit dem Jahr 2036.

Die Berechnungen, in denen Verfüllmaßnahmen berücksichtigt werden, umfassen einen Zeitraum von 160 Jahren. Dabei wird angenommen, dass die Verfüllung nach 60 Jahren Standzeit, also etwa zum gegenwärtigen Zeitpunkt eingebracht und wirksam wird. Danach folgt ein Berechnungszeitraum von weiteren 100 Jahren. Das Ende dieser Berechnungen entspricht also dem Jahr 2096.

## 6 Darstellung der Berechnungsergebnisse

Die gebirgsmechanischen Berechnungen wurden mit dem FE-Programmsystem ANSALT I (BGR 1991) durchgeführt. Auswertung und Darstellung der Ergebnisse erfolgten mit dem Programmsystem INCA (BGR 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 Spannungen ist MPa, die Einheit für Verschiebungen ist m.

### 6.1 Berechnungsergebnisse zum Ostfeld

Für die mit dem Basismodell OF-O3-A durchgeführten Berechnungen sind exemplarisch folgende Ergebnisse dargestellt:

- Verformte Modellstruktur (Modellausschnitt) nach 45 Jahren,
- Verschiebungsvektoren (Modellausschnitt) nach 45 Jahren,
- Hauptspannungen  $S_1$  und  $S_2$  als Isoflächenplots (Modellausschnitt) nach 100 Jahren,
- Effektivspannungen als Isoflächenplots (Modellausschnitt) nach 100 Jahren,
- Effektivverzerrungen als Isoflächenplots (Modellausschnitt) nach 100 Jahren.

Darüber hinaus sind für das Basismodell OF-O3-A sowie für die Modellvarianten OF-O3-B und OF-O4-A exemplarisch folgende Ergebnisse dargestellt:

- Dilatante Salzgebirgsbereiche als Isoflächenplot (Gesamtmodell), in denen bis zum Zeitpunkt 45 bzw. 100 Jahre die Dilatanzgrenze mindestens einmal erreicht oder überschritten wurde,
- 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  $S_1$  nach 45 und 100 Jahren als Isoflächenplot (Gesamtmodell). Bereiche, in denen dieser Laugendruck die kleinste Hauptdruckspannung überschreitet, werden nachfolgend als hypothetisch laugendruckgefährdete Bereiche bezeichnet.

#### 6.1.1 Basismodell OF-O3-A („Best-estimate“-Parameter)

Die berechneten Gebirgsverformungen sind als verformte Modellstruktur in Anlage 6.1.1 sowie als Verschiebungsvektoren in Anlage 6.1.2 für den gegenwärtigen Zeitpunkt (ca.

45 Jahre nach Auffahrung der Abbaue) dargestellt. Das Verschiebungsbild, insbesondere auch hinsichtlich der Pfeilerverformungen, ist plausibel.

Anlage 6.1.3 zeigt für den Zeitpunkt 100 Jahre die Verteilung der kleinsten Hauptdruckspannungen  $S_1$  im Bereich der Ostmulde. Für diesen Bereich werden vorwiegend sehr geringe Spannungsbeträge berechnet. Lokal treten auch geringe Zugspannungen auf, z. B. in der Firste des Abbaus 1, bedingt durch die ungünstige Firstkontur. In geringerem Maße werden auch Zugspannungen für den Firstbereich des Abbaus 4, für den Pfeiler zwischen den Abbauen 1 und 4 sowie für den Sohlbereich des Flächen 4b ermittelt. Im Zeitraum zwischen 45 und 100 Jahren Standzeit der Abbaue treten rechnerisch nur noch geringe Änderungen des Spannungszustandes auf.

Die größten Hauptdruckspannungen  $S_2$  sind in Anlage 6.1.4 ebenfalls für den Zeitpunkt 100 Jahre dargestellt. Die gesamte Ostmulde zwischen den Hauptanhydritklippen weist vergleichsweise geringe Spannungsbeträge auf, während für den Hauptanhydrit westlich und östlich sowie unterhalb des Ostfeldes deutlich höhere Spannungen ermittelt werden.

Die in Anlage 6.1.5 dargestellten Effektivspannungen weisen in der Ostmulde für die Salinarschicht z3LS-OS-BK/BD i. a. sehr geringe Beträge bis ca. 4,5 MPa aus, lokal auch bis ca. 6 MPa, z. B. im Pfeiler zwischen den Abbauen 1 und 4 sowie zwischen Abbau 4 und Flächen 4a. Dies belegt, dass das gesamte Salzgebirge im Bereich des Abbaufeldes weitgehend entlastet ist. Oberhalb des Abbaufeldes, im Bereich des Abbaus 1 auf der 2. Sohle, treten im weniger kriechfähigen z3AM etwas höhere Effektivspannungen auf. Ferner wird deutlich, dass der an die Ostmulde angrenzende Hauptanhydrit aufgrund seines elastischen Verhaltens und seiner vergleichsweise hohen Steifigkeit Spannungen „anzieht“ und insbesondere an seiner Kontur bereichsweise sehr hohe Effektivspannungen aufweist.

In Anlage 6.1.6 sind die für 100 Jahre berechneten Effektivverzerrungen dargestellt. Für weite Gebirgsbereiche werden lediglich geringe Verzerrungsbeträge bis ca. 0,25 % ermittelt. Im Nahbereich der Abbaue 1 und 4 der 4. Sohle, hier insbesondere im Pfeiler zwischen den Abbauen sowie zwischen Abbau 4 und Flächen 4a, treten lokal Verzerrungsbeträge von mehr als 3 % auf.

Die für 45 und 100 Jahre berechneten dilatanten Bereiche im Salzgebirge sind in den Anlagen 6.1.7 und 6.1.8 dargestellt. Es wird deutlich, dass sich die Dilatanzbereiche und die damit verbundenen Auflockerungszonen im Salzgebirge auf den unmittelbaren Nahbereich der Abbaue und Strecken im Ostfeld beschränken. Im Bereich der Abbaue 1 und 4 auf der 4. Sohle weisen Firste, Stöße und Sohle dilatante Zonen auf, die bis ca. 12 m in das Gebirge

hineinreichen. Der Pfeiler zwischen den Abbauen ist über seine gesamte Querschnittsfläche dilatant. In den Salzschieben oberhalb der 2. Sohle des Ostfeldes treten rechnerisch keine dilatanten Bereiche auf.

Die Anlagen 6.1.9 und 6.1.10 zeigen die für eine Standzeit von 45 und 100 Jahren berechnete Differenz zwischen dem in der jeweiligen Teufe theoretisch möglichen Laugendruck und der kleinsten Hauptdruckspannung  $S_1$  im Salzgebirge. Gelb bis rot eingefärbt sind die hypothetisch laugendruckgefährdeten Bereiche. Dort liegt der fiktive Laugendruck über dem Druckniveau von  $S_1$ . Nahezu das gesamte Salzgebirge in der Ostmulde zwischen den Anhydritklippen ist diesen Bereichen zuzuordnen. Sie reichen bis ca. 20 m oberhalb des Abbaus 1 auf der 2. Sohle.

#### 6.1.2 Modellvariante OF-O3-B (Vernachlässigung der Pfeilertragwirkung)

Die mit Modellvariante OF-O3-B ohne Pfeiler zwischen den Abbauen 1 und 4 für 45 und 100 Jahre berechneten dilatanten Bereiche im Salzgebirge sind in den Anlagen 6.1.11 und 6.1.12 dargestellt. Im Vergleich zum Basismodell OF-O3-A ergeben sich lediglich in der Firste und in der Sohle der Abbaue 1 und 4 signifikante Unterschiede. So sind dort infolge Vernachlässigung der Pfeilertragwirkung deutlich größere Bereiche dilatant, sie reichen aber auch bei dieser Modellvariante nur bis ca. 15 m in das Gebirge.

Die Anlagen 6.1.13 und 6.1.14 zeigen für eine Standzeit von 45 und 100 Jahren die hypothetisch laugendruckgefährdeten Bereiche im Salzgebirge. Hinsichtlich der räumlichen Erstreckung dieser Bereiche ergeben sich gegenüber Basismodell OF-O3-A keine signifikanten Unterschiede.

#### 6.1.3 Modellvariante OF-O4-A (aktueller geologischer Kenntnisstand)

Die mit Modell OF-O4-A (Anhydrit in der Firste des Abbaus 1) für 45 und 100 Jahre berechneten dilatanten Bereiche im Salzgebirge sind in den Anlagen 6.1.15 und 6.1.16 dargestellt. Gegenüber dem Basismodell OF-O3-A ergeben sich nur unwesentlich veränderte Bereiche, für die Dilatanz und damit Auflockerung berechnet werden. In den Stößen der Abbaue 1 und 4 sowie in der Firste des Abbaus 1 reichen die dilatanten Zonen bis an den Hauptanhydrit heran.

Die Anlagen 6.1.17 und 6.1.18 zeigen für eine Standzeit von 45 und 100 Jahren die hypothetisch laugendruckgefährdeten Bereiche im Salzgebirge. Aufgrund der stärker abschirmenden Wirkung der über den Abbau 1 reichenden Anhydritauskragung und der östlichen, bis an den Abbau 4 reichenden Anhydritklippe ist die räumliche Erstreckung dieser Bereiche geringer, verglichen mit den Ergebnissen des Basismodells OF-O3-A, dem der frühere geologische Kenntnisstand zugrunde lag.

## 6.2 Berechnungsergebnisse zum Südfeld

Für die mit dem Basismodell SF-N1-A durchgeführten Berechnungen sind exemplarisch folgende Ergebnisse dargestellt:

- Verformte Modellstruktur (Modellausschnitt) nach 59 Jahren,
- Verschiebungsvektoren (Modellausschnitt) nach 59 Jahren,
- Hauptspannungen  $S_1$  und  $S_2$  als Isoflächenplots (Modellausschnitt) nach 100 Jahren,
- Effektivspannungen als Isoflächenplots (Modellausschnitt) nach 100 Jahren,
- Effektivverzerrungen als Isoflächenplots (Modellausschnitt) nach 100 Jahren.

Darüber hinaus sind für das Basismodell SF-N1-A sowie für die Modellvarianten SF-N1-B und SF-N1-C exemplarisch folgende Ergebnisse dargestellt:

- Dilatante Salzgebirgsbereiche als Isoflächenplots (Gesamtmodell), in denen bis zum Zeitpunkt 59 bzw. 100 Jahre die Dilatanzgrenze mindestens einmal erreicht bzw. überschritten wurde,
- 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  $S_1$  nach 59 und 100 Jahren als Isoflächenplot (Gesamtmodell). Bereiche, in denen dieser Laugendruck die kleinste Hauptdruckspannung überschreitet, werden nachfolgend als hypothetisch laugendruckgefährdete Bereiche bezeichnet.

### 6.2.1 Basismodell SF-N1-A („Best-estimate“-Parameter)

In den Anlagen 6.2.1 und 6.2.2 ist die verformte Struktur der Abbaue im Südfeld dargestellt. Generell gilt, dass alle Verformungen im Südfeld in Richtung auf die Hohlräume verlaufen. Dabei sind die Verformungsbeträge an den westlichen Stößen einschließlich der Schwebenbereiche deutlich größer als an den östlichen Stößen. Dieses Verformungsverhalten wird im wesentlichen geprägt durch die abschirmende Wirkung des östlich von der Südmulde I gelegenen Hauptanhydrits und durch die versetzt übereinander angeordneten Abbaue. Die Ver-

formungen klingen mit zunehmendem Abstand von den Abbauen schnell ab. Im Deckgebirge oberhalb der Abbaue treten erwartungsgemäß Senkungen auf.

In den Anlagen 6.2.3 und 6.2.4 sind die Hauptspannungen  $S_1$  und  $S_2$  zum Zeitpunkt 100 Jahre nach Hohlraumerstellung dargestellt. Aus der Verteilung der Hauptspannungen  $S_1$  geht hervor, dass die Gebirgsbereiche im Nahbereich der Abbaue erheblich entlastet werden. Die Spannungsbeträge liegen deutlich unter dem Teufendruck. Die Verteilung der Hauptspannungen  $S_2$  zeigt ebenfalls ein geringeres, unter dem Teufendruck liegendes Spannungsniveau des Salzgebirges im Nahbereich der Abbaue. Ein deutlicher Anstieg der Druckspannungen ergibt sich bei angrenzenden Schichten, die entweder eine geringere Kriechfähigkeit aufweisen, oder besonders bei rein elastisch reagierenden Schichten mit hoher Steifigkeit wie z. B. dem Hauptanhydrit.

Die in Anlage 6.2.5 dargestellte Verteilung der Effektivspannungen zeigt, dass die höchsten Spannungsbeträge im Hauptanhydrit unmittelbar östlich der Abbaue auf der 5a-Sohle und darunterliegenden Sohlen auftreten. Erwartungsgemäß werden die größten Beanspruchungen in den Schweben ermittelt. Das Deckgebirge wird lediglich im Bereich des Hutgesteins oberhalb der Abbaue deutlich beansprucht. Die wesentlichen Spannungsumlagerungen sind bis zum heutigen Zeitpunkt bereits eingetreten. Zukünftig sind nur noch geringe Spannungsumlagerungen zu erwarten. Daher kann die derzeitige Spannungsverteilung im Südfeld als weitgehend stationär angesehen werden.

In Anlage 6.2.6 sind die Effektivverzerrungen zum Zeitpunkt 100 Jahre nach Hohlraumerstellung dargestellt. Erwartungsgemäß treten die größten Verzerrungsbeträge generell im Bereich der Schweben auf. Die Zone der größten Effektivverzerrungen (rot:  $>2,75\%$ ) 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. Die Effektivverzerrungen werden vor allem im Bereich der Schweben zukünftig weiter zunehmen. Dies ist auf den nahezu stationären Spannungszustand zurückzuführen, der im Bereich der Hohlräume zu stationären Konvergenzraten und damit zu einem kontinuierlichen Anstieg der Schwebenstauchung führt.

Die für 59 und 100 Jahre berechneten dilatanten Bereiche im Salzgebirge sind in den Anlagen 6.2.7 und 6.2.8 dargestellt. Durch Hohlraumauflagerung bedingt, treten insbesondere in den Firsten, Sohlen und Stößen der Abbaue dilatante Bereiche auf. Sie reichen stellenweise bis ca. 10 m in das angrenzende Salzgebirge. Einer erheblichen Beanspruchung unterliegen vor allem die Schweben, für die durchgängige dilatante Bereiche ermittelt werden.

Die Anlagen 6.2.9 und 6.2.10 zeigen die für eine Standzeit von 59 und 100 Jahren berechnete Differenz zwischen dem in der jeweiligen Teufe theoretisch möglichen Laugendruck und der kleinsten Hauptdruckspannung  $S_1$  im Salzgebirge. Bedingt durch den Hohlräumeausbruch tritt rechnerisch eine deutliche Abnahme der kleinsten Hauptdruckspannung insbesondere im Bereich der Abbaue auf. In den konturnahen Zonen liegt sie um mehr als 3 MPa unterhalb des Laugendrucks. Mit zunehmendem Abstand wird diese Differenz geringer. Gelb bis rot eingefärbt sind die hypothetisch laugendruckgefährdeten Bereiche. Nach Westen breiten sich diese Bereiche am weitesten aus, erreichen aber nicht das Deck- oder Nebengebirge. Das Salzgebirge östlich der Abbaureihe 9n ist bis zum Hauptanhydrit deutlich entlastet. Darüber hinaus reicht der hypothetisch laugendruckgefährdete Bereich über den Östlichen Schachtsattel bis zum angrenzenden Hauptanhydrit. Ein Vergleich der Ergebnisse zum Zeitpunkt 59 Jahre nach Ausbruch (entspricht rechnerisch dem Jahr 1998) und zum Zeitpunkt 100 Jahre nach Ausbruch zeigt, dass nur eine geringfügige Vergrößerung dieser Bereiche auftritt.

#### 6.2.2 Modellvariante SF-N1-B (höhere Duktilität einiger Salzsichten)

Die mit höherer Duktilität der Homogenbereiche z2(West) und z2HS(Ost) berechneten dilatanten Gebirgsbereiche (Anlagen 6.2.11 bis 6.2.12) entsprechen weitgehend den Ergebnissen des Basismodells. Lediglich im Bereich zwischen dem Abbau 9n der 3. Sohle und dem östlich anstehenden Hauptanhydrit ist der Auflockerungsbereich stärker ausgeprägt als im Basismodell. Ein größerer dilatanter Gebirgsbereich tritt auch um die Abbaue des Kalilagers B auf. Die veränderten Kriecheigenschaften der beiden o. g. Homogenbereiche haben demnach keinen wesentlichen Einfluss auf die berechneten dilatanten Bereiche.

In der Anlagen 6.2.13 und 6.2.14 ist die Differenz zwischen dem theoretisch möglichen Laugendruck und der kleinsten Hauptdruckspannung 59 Jahre und 100 Jahre nach der Auffahrung dargestellt. Die kleinste Hauptdruckspannung nimmt durch die schneller verlaufende Spannungsumlagerung im Fernfeld der Abbaue geringfügig schneller ab als im Basismodell. Die dargestellte Differenzspannung ist dadurch im Salzspiegelbereich oberhalb der Abbaue kleiner als im Basismodell. Es ist jedoch auch zum Zeitpunkt 100 Jahre noch ein Bereich von mehr als 40 m unter dem Salzspiegel vorhanden, in dem die kleinste Hauptdruckspannung über dem fiktiven Laugendruck liegt. Die veränderten Kriecheigenschaften der beiden o.g. Homogenbereiche haben auch hier keinen wesentlichen Einfluss auf die berechneten, hypothetisch laugendruckgefährdeten Bereiche.

### 6.2.3 Modellvariante SF-N1-C (steiferes Deckgebirge)

Die Variation der Steifigkeit des Deck- und Nebengebirges hat keinen nennenswerten Einfluss auf die berechneten dilatanten Gebirgsbereiche, die wie beim Basismodell nur im Nahbereich der Abbaue auftreten (Anlagen 6.2.15 und 6.2.16).

Die Anlagen 6.2.17 und 6.2.18 zeigen, dass im Vergleich zum Basismodell lokal geringere Werte für die Differenz zwischen dem theoretisch möglichen Laugendruck und der kleinsten Hauptdruckspannung berechnet werden. So verringert sich am Salzspiegel diese Differenz auf unter 1 MPa. Es verbleibt jedoch auch 100 Jahre nach Auffahrung der Abbaue ein mehr als 20 m tiefer Gebirgsbereich unterhalb des Salzspiegels, in dem die kleinste Hauptdruckspannung über dem fiktiven Laugendruck liegt. Ein Vergleich der Ergebnisse zum Zeitpunkt 59 Jahre nach Ausbruch (entspricht rechnerisch dem Jahr 1998) und zum Zeitpunkt 100 Jahre nach Ausbruch zeigt, dass nur eine geringfügige Vergrößerung des hypothetisch laugendruckgefährdeten Bereichs auftritt.

### 6.3 Berechnungsergebnisse zum Westfeld

Für die mit dem Basismodell WF-H2-A durchgeführten Berechnungen sind exemplarisch folgende Ergebnisse dargestellt:

- Verformte Modellstruktur (in 2 Modellausschnitten) nach 72 Jahren,
- Verschiebungsvektoren (in 2 Modellausschnitten) nach 72 Jahren,
- Hauptspannungen  $S_1$  und  $S_2$  als Isoflächenplots (in 2 Modellausschnitten) nach 100 Jahren,
- Effektivspannungen als Isoflächenplots (in 2 Modellausschnitten) nach 100 Jahren,
- Effektivverzerrungen als Isoflächenplots (in 2 Modellausschnitten) nach 100 Jahren.

Darüber hinaus sind für das Basismodell WF-H2-A sowie für die Modellvarianten WF-H2-B und WF-H2-C exemplarisch folgende Ergebnisse dargestellt:

- Dilatante Salzgebirgsbereiche als Isoflächenplots (Gesamtmodell), in denen bis zum Zeitpunkt 72 bzw. 100 Jahre die Dilatanzgrenze mindestens einmal erreicht oder überschritten wurde,
- 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  $S_1$  nach 72 und 100 Jahren als Isoflächenplot (Gesamtmodell). Bereiche, in denen dieser Laugendruck die kleinste Hauptdruckspannung überschreitet, werden hier als hypothetisch laugendruckgefährdete Bereiche bezeichnet.

### 6.3.1 Basismodell WF-H2-A („Best-estimate“-Parameter)

In den Anlagen 6.3.1a bis 6.3.2b sind die verformte Struktur bzw. die Verschiebungsvektoren dargestellt. Bedingt durch die große Konvergenz des Lagers B treten im Gebirge unterhalb der Abbaue des Westfeldes großräumige Verschiebungen nach Osten, oberhalb der Abbaue nach Osten und nach unten gerichtet auf. Die Konvergenzen der Abbaue des Westfeldes und der Südmulde sind wesentlich geringer als die der Abbaue im Lager B. Die Abbaue 1n und 1s des Westfeldes zeigen insbesondere in vertikaler Richtung Konvergenzen.

Die Anlagen 6.3.3a und 6.3.3b zeigen die kleinsten Hauptdruckspannungen  $S_1$ . Im Gebirgsbereich um die Abbaue der Abbaureihe 1 der Südmulde und des Kalilagers B ist eine weiträumige starke Entlastung zu erkennen. Die Druckspannungen liegen hier deutlich unter dem Teufendruck. Der Entlastungsbereich um die Abbaue 1n und 1s im Westfeld ist wesentlich kleinräumiger. In der Firste dieser Abbaue treten infolge der geomechanisch ungünstigen Kontur Zugspannungen auf.

Die in den Anlagen 6.3.4a und 6.3.4b dargestellten größten Hauptdruckspannungen  $S_2$  zeigen im Gebirgsbereich um die Abbaue 1 der Südmulde und des Kalilagers B ebenfalls ein z. T. deutlich unter dem Teufendruck liegendes Spannungsniveau. Der Entlastungsbereich um die Abbaue 1n und 1s im Westfeld ist vergleichsweise gering.

Die Anlagen 6.3.5a und 6.3.5b zeigen die Effektivspannungen. Die höchsten Spannungsbeiträge treten in den Hauptanhydritschollen auf, die im Nahfeld eines Abbaus liegen, z.B. im Hauptanhydrit westlich des Kalilagers B und in den beiden Anhydritschollen westlich oberhalb und unterhalb der Abbaue 1n und 1s des Westfeldes. Die größten Effektivspannungen in den kriechfähigen Salzgesteinen treten in den Schweben zwischen den Abbauen auf (Abbaureihe 1 der Südmulde und Abbaue des Kalilagers B). Das Nebengebirge zeigt nur geringe Effektivspannungen. Im Deckgebirge treten lediglich am Salzspiegel oberhalb des Westlichen Schachtsattels etwas höhere Effektivspannungen auf. Die wesentlichen Spannungsumlagerungen sind bis zum heutigen Zeitpunkt bereits eingetreten, so dass nur noch geringe Spannungsänderungen zu erwarten sind. Daher kann die derzeitige Spannungsverteilung im Westfeld als weitgehend stationär angesehen werden.

In den Anlagen 6.3.6a und 6.3.6b sind die Effektivverzerrungen zum Zeitpunkt 100 Jahre nach Hohlraumerstellung dargestellt. Signifikante Verzerrungen treten nur in den kriechfähigen Salzgesteinen um das Lager B, dort insbesondere in den Schweben, und um die Abbaue 1n und 1s des Westfeldes, dort insbesondere im Pfeiler zwischen den Abbauen auf.

Die Berechnungen belegen, dass die Effektivverzerrung auch zukünftig kontinuierlich zunehmen wird. Dies ist auf den nahezu stationären Spannungszustand im Salzgebirge zurückzuführen, der zu einem weiteren Anstieg der Schweben- und Pfeilerstauchungen führt.

Die durch Auffahrung der Hohlräume verursachte Beanspruchung des Gebirges führt erwartungsgemäß im Nahbereich der Abbaue zu dilatanten Auflockerungsbereichen (Anlagen 6.3.7 und 6.3.8), dort insbesondere in den Firsten, Sohlen und Stößen. Die Schweben zwischen den oberen Abbauen 1 der Südmulde und die Schweben im Kalilager B zeigen durchgängige Dilatanz. Im östlichen Stoß der Abbaue der Südmulde reicht die Auflockerungszone max. 10 m in das angrenzende Gebirge hinein, so dass rechnerisch bis zum Hauptanhydrit noch ein mindestens 14 m breiter Gebirgsbereich verbleibt, in dem keine Dilatanz auftritt. Das Gebirge oberhalb dieser Abbaue ist, abgesehen von den hohlraumnahen Bereichen, nur gering beansprucht. Zum Salzspiegel hin wird keine Dilatanz berechnet. Im Westfeld zeigen die Berechnungsergebnisse im Nahbereich der Abbaue ebenfalls dilatante Auflockerungszonen, die jedoch nicht bis an die benachbarten Anhydritschollen heranreichen.

Die Anlagen 6.3.9 und 6.3.10 zeigen die für eine Standzeit von 72 und 100 Jahren berechnete Differenz zwischen dem in der jeweiligen Teufe theoretisch möglichen Laugendruck und der kleinsten Hauptdruckspannung  $S_1$  im Salzgebirge. Der Ausbruch der Hohlräume führt zu einer Abnahme der kleinsten Hauptdruckspannung insbesondere im Bereich der Abbaue. In den konturnahen Zonen liegt sie um mehr als 3 MPa unterhalb des Laugendrucks. Mit zunehmendem Abstand wird diese Differenz geringer. Gelb bis rot eingefärbt sind die hypothetisch laugendruckgefährdeten Bereiche. Im Gebirgsbereich zwischen der Abbaureihe 1 der Südmulde und dem Hauptanhydrit liegt die kleinste Hauptdruckspannung bis zu 3 MPa unterhalb des Laugendrucks. Der hypothetisch laugendruckgefährdete Bereich breitet sich von der Abbaureihe 1 nach Westen ca. 85 m bis an den Westlichen Schachtsattel, vom Kalilager B nach Osten ca. 55 m in das angrenzende Gebirge und in Richtung Salzspiegel ca. 50 m aus. Unterhalb des Salzspiegels verbleibt ein Gebirgsbereich mit einer Mächtigkeit von ca. 50 m, in dem die kleinste Hauptdruckspannung über dem fiktiven Laugendruck liegt. Der hypothetisch laugendruckgefährdete Bereich um die Abbaue 1n und 1s des Westfeldes erstreckt sich von den Abbauen bis zu den angrenzenden Anhydritschollen. Eine weitere Ausbreitung wird durch die abschirmende Wirkung der Anhydritschollen begrenzt. Ein Vergleich der Ergebnisse zum Zeitpunkt 72 Jahre nach Ausbruch und zum Zeitpunkt 100 Jahre nach Ausbruch zeigt, dass nur eine geringfügige Vergrößerung dieses Bereichs auftritt.

### 6.3.2 Modellvariante WF-H2-B (steiferer Versatz im Kalilager B)

Generell führt der in dieser Variante gewählte steifere Versatz im Kalilager B zu etwas günstigeren Spannungszuständen. Die berechneten dilatanten Auflockerungsbereiche (Anlagen 6.3.11 und 6.3.12) sind denen des Basismodells sehr ähnlich. Etwas kleinere dilatante Bereiche im Vergleich zum Basismodell werden in den östlichen Stößen der Abbaue des Lagers B und stellenweise um die Abbaue der Südmulde berechnet.

In den Anlagen 6.3.13 und 6.3.14 ist die Differenz zwischen dem theoretisch möglichen Laugendruck und der kleinsten Hauptdruckspannung für die Zeitpunkte 72 und 100 Jahre nach Auffahrung dargestellt. Für die Abbaue des Westfeldes macht sich die Variation der Versatzsteifigkeit nur geringfügig bemerkbar. In der Südmulde und im Kalilager B reichen die hypothetisch laugendruckgefährdeten Bereiche aufgrund der höheren Stützwirkung des Versatzes deutlich weniger weit in das umgebende Gebirge hinein.

### 6.3.3 Modellvariante WF-H2-C (Vernachlässigung der Pfeilertragwirkung)

Die Vernachlässigung der Tragwirkung des Pfeilers zwischen den Kammern 1n und 1s auf der 4. Sohle des Westfeldes hat erwartungsgemäß nur einen geringen Einfluss auf das großräumige Spannungsfeld der Südmulde und des östlich anschließenden Gebirges. Eine erhöhte Beanspruchung ergibt sich im Nahbereich, insbesondere in der Firste dieser Abbaue. Die in den Anlagen 6.3.15 und 6.3.16 dargestellten dilatanten Zonen sind im Firstbereich der o. g. Abbaue deutlich größer und erstrecken sich bis zur westlichen, über den Abbauen liegenden Anhydritscholle sowie bis zum Abbau auf der 3. Sohle. Auch in der Sohle der Abbaue 1n und 1s treten deutlich größere dilatante Zonen auf. In größerer Entfernung macht sich die Vernachlässigung der Pfeilertragwirkung nicht mehr bemerkbar. So werden für die Südmulde und das Kalilager B annähernd die gleichen Auflockerungsbereiche wie im Basismodell berechnet.

In den Anlagen 6.3.17 und 6.3.18 ist die Differenz zwischen dem theoretisch möglichen Laugendruck und der kleinsten Hauptdruckspannung für die Zeitpunkte 72 und 100 Jahre nach Auffahrung dargestellt. Für den Gebirgsbereich um die Abbaue des Westfeldes ergeben sich deutlich größere hypothetisch laugendruckgefährdete Bereiche, die bis zu den an das Westfeld angrenzenden Anhydritschollen reichen. In der Südmulde und im Kalilager B macht sich die Vernachlässigung der Pfeilertragwirkung nicht bemerkbar. Hier ergeben sich annähernd die gleichen Ergebnisse wie im Basismodell.

## 6.4 Berechnungsergebnisse zum Zentralbereich

Für die mit den Basismodellen ZB-A2-B (für Berechnungsschnitt ZB-A2) und ZB-O3-P (für Berechnungsschnitt ZB-O3) durchgeführten Berechnungen sind exemplarisch folgende Ergebnisse dargestellt:

- Verformte Modellstruktur (Modellausschnitt) nach 60 Jahren,
- Verschiebungsvektoren (Modellausschnitt) nach 60 Jahren,
- Hauptspannungen  $S_1$  und  $S_2$  als Isoflächenplots (Modellausschnitt) nach 100 Jahren,
- Effektivspannungen als Isoflächenplots (Modellausschnitt) nach 100 Jahren,
- Effektivverzerrungen als Isoflächenplots (Modellausschnitt) nach 100 Jahren.

Darüber hinaus sind für die Basismodelle sowie für die Modellvariante ZB-O3-1 exemplarisch folgende Ergebnisse dargestellt:

- Dilatante Salzgebirgsbereiche als Isoflächenplots (Gesamtmodell), in denen bis zum Zeitpunkt 60 bzw. 100 Jahre die Dilatanzgrenze mindestens einmal erreicht oder überschritten wurde,
- 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  $S_1$  nach 60 und 100 Jahren als Isoflächenplot (Gesamtmodell). Bereiche, in denen dieser Laugendruck die kleinste Hauptdruckspannung überschreitet, werden nachfolgend als hypothetisch laugendruckgefährdete Bereiche bezeichnet.

Ferner sind für die Modellvarianten ZB-A2-C und ZB-A2-E sowie ZB-O3-Q und ZB-O3-S, in denen Verfüllmaßnahmen der Abbaue simuliert wurden, exemplarisch folgende spezielle Ergebnisse dargestellt:

- Momentan dilatante Salzgebirgsbereiche als Isoflächenplots (Gesamtmodell), in denen zu verschiedenen Zeitpunkten die Dilatanzgrenze erreicht oder überschritten ist,
- 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  $S_1$  nach 100 und 160 Jahren als Isoflächenplot (Gesamtmodell).

### 6.4.1 Basismodell ZB-A2-B („Best-estimate“-Parameter)

In den Anlagen 6.4.1 und 6.4.2 sind die verformte Struktur der Abbaue bzw. die Verschiebungsvektoren im Zentralbereich, Abbaureihe 1, dargestellt. Es zeigt sich, dass an den west-

lichen Stößen und in den Firsten der Abbaureihe 1 deutlich größere Verformungen als an den östlichen Stößen und in den Sohlen auftreten. Dies führt auch zu dem aus Anlage 6.4.1 ersichtlichen charakteristischen Verformungsbild der Schweben.

In den Anlagen 6.4.3 und 6.4.4 sind die Hauptspannungen  $S_1$  und  $S_2$  zum Zeitpunkt 100 Jahre nach Hohlraumerstellung dargestellt. Aus der Verteilung der Hauptspannungen  $S_1$  geht hervor, dass die Gebirgsbereiche im Zentralbereich entlastet werden. Die Spannungsbeträge liegen deutlich unter dem Teufendruck. Bereichsweise, z. B. an der Hohlraumkontur oder am Übergang von Schichten, werden Zugspannungen ermittelt. Die Hauptspannungen  $S_2$  zeigen im Zentralbereich ebenfalls ein geringeres, unter dem Teufendruck liegendes Niveau.

Die in Anlage 6.4.5 dargestellte Verteilung der Effektivspannungen zeigt, dass die höchsten Spannungsbeträge in den Hauptanhydritschollen sowie in den Schweben der Abbaureihe 1 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, Abbaureihe 1, als weitgehend stationär angesehen werden.

In Anlage 6.4.6 sind die Effektivverzerrungen zum Zeitpunkt 100 Jahre nach Hohlraumerstellung dargestellt. Erwartungsgemäß treten die größten Verzerrungsbeträge in den Schweben auf. Die Zone der größten Effektivverzerrungen (rot:  $>2,75\%$ ) 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. Auch im Bereich der Abbaue des Kalilagers C treten höhere Verzerrungen auf. Die Verzerrungen werden insbesondere in den Schweben weiter zunehmen. Dies ist auf den nahezu stationären Spannungszustand zurückzuführen, der im Bereich der Hohlräume zu stationären Konvergenzraten und damit zu einem kontinuierlichen Anstieg der Schwebenstauchung führt.

Die für 60 und 100 Jahre berechneten dilatanten Bereiche im Salzgebirge sind in den Anlagen 6.4.7 und 6.4.8 dargestellt. Die durch Hohlraumauffahrung bedingte gebirgsmechanische Beanspruchung führt im Nahbereich der Abbaue zu dilatanten Auflockerungszonen, insbesondere in den Firsten, Sohlen und Stößen der Abbaue. Sie reichen stellenweise bis an die angrenzenden Anhydritschollen, insbesondere auch im Bereich des Abbaus 1a auf der 1a-Sohle. Ein kleinerer dilatanter Gebirgsbereich ergibt sich rechnerisch auch zwischen den beiden obersten Anhydritschollen oberhalb der Abbaureihe 1. Der Vergleich der nach 60 Jahren und nach 100 Jahren auftretenden Dilatanzbereiche zeigt, dass sich in diesem

Zeitraum nur noch sehr geringfügige Änderungen ergeben.

Die Anlagen 6.4.9 und 6.4.10 zeigen die für eine Standzeit von 60 und 100 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 rechnerisch eine deutliche Abnahme der kleinsten Hauptdruckspannung insbesondere im Bereich der Abbaue und in der Salzbarriere zwischen den oberen Anhydritschollen und dem Salzspiegel auf. Im Nahbereich der Abbaue liegt sie um mehr als 4 MPa unterhalb des Laugendrucks. Mit zunehmendem Abstand wird diese Differenz geringer. Gelb bis rot eingefärbt sind die hypothetisch laugendruckgefährdeten Bereiche, die weiträumig bis an die angrenzenden Anhydritschollen sowie oberhalb der oberen Schollen bis an den Salzspiegel heranreichen. Der Vergleich der nach 60 Jahren und nach 100 Jahren auftretenden hypothetisch laugendruckgefährdeten Bereiche zeigt, dass sich nur noch geringfügige Änderungen ergeben.

#### 6.4.2 Modellvariante ZB-A2-C (Verfüllung der Abbaue mit weichem Versatz)

Bei dieser Berechnungsvariante wurde eine Verfüllung aller Abbaue 60 Jahre nach deren Ausbruch simuliert. Dabei wurde eine sehr geringe Versatzsteifigkeit angenommen.

In den Anlagen 6.4.11 bis 6.4.13 sind für drei verschiedene Zeitpunkte (60, 100 und 160 Jahre) die Gebirgsbereiche blau gekennzeichnet, in denen die Dilatanzgrenze momentan, d. h. zum jeweiligen Berechnungszeitpunkt gerade erreicht oder überschritten ist. Infolge der Stützwirkung der in dieser Variante angenommenen, relativ weichen Verfüllung der Abbaue zum Zeitpunkt 60 Jahre werden die im Gebirge vorhandenen deviatorischen Spannungen allmählich reduziert, so dass sie bereichsweise wieder unter der Dilatanzgrenze liegen. Dieser Vorgang lässt sich als Verheilungsprozess von während der Auflockerung entstandenen Mikrorissen interpretieren. Zum Zeitpunkt 100 Jahre (d. h. 40 Jahre nach Verfüllung der Abbaue) ist bereits ein deutlicher Rückgang ehemals dilatanter Gebirgsbereiche zu verzeichnen. Zum Zeitpunkt 160 Jahre (100 Jahre nach Verfüllung) treten rechnerisch nur noch gering ausgedehnte dilatante Bereiche auf, z. B. zwischen einigen Abbauen der Abbaureihe 1 und den westlich angrenzenden Anhydritschollen sowie an der Kontur des Abbaus 1an auf der 4a-Sohle.

Die berechneten, hypothetisch laugendruckgefährdeten Gebirgsbereiche sind sowohl nach 100 Jahren (40 Jahre nach Verfüllung) wie auch nach 160 Jahren (100 Jahre nach Verfüllung) nahezu identisch mit den Ergebnissen der ohne Verfüllung durchgeführten Berechnungen (Anlagen 6.4.14 und 6.4.15). Die stützende Wirkung des Versatzes macht sich aufgrund

der angenommenen geringen Versatzsteifigkeit hier noch nicht nennenswert bemerkbar.

#### 6.4.3 Modellvariante ZB-A2-E (Verfüllung der Abbaue mit steifem Versatz)

Bei dieser Berechnungsvariante wurde ebenfalls eine Verfüllung aller Abbaue 60 Jahre nach deren Ausbruch angenommen, jedoch mit einer gegenüber Variante ZB-A2-C deutlich höheren Versatzsteifigkeit.

In den Anlagen 6.4.16 bis 6.4.18 sind für drei verschiedene Zeitpunkte (60, 64 und 80 Jahre) die Gebirgsbereiche blau gekennzeichnet, in denen die Dilatanzgrenze momentan, d. h. zum jeweiligen Berechnungszeitpunkt gerade erreicht oder überschritten ist. Infolge der hohen Stützwirkung der in dieser Variante angenommenen, steiferen Verfüllung der Abbaue zum Zeitpunkt 60 Jahre werden die im Gebirge vorhandenen deviatorischen Spannungen vergleichsweise schnell reduziert. Zum Zeitpunkt 64 Jahre (d. h. nur 4 Jahre nach Verfüllung der Abbaue) ist bereits ein erheblicher Rückgang ehemals dilatanter Gebirgsbereiche zu verzeichnen. Zum Zeitpunkt 80 Jahre (20 Jahre nach Verfüllung) tritt rechnerisch nur noch ein sehr kleiner dilatanter Bereich zwischen den beiden obersten Anhydritschollen auf.

Die berechneten, hypothetisch laugendruckgefährdeten Gebirgsbereiche zeigen sowohl nach 100 Jahren (40 Jahre nach Verfüllung) wie auch nach 160 Jahren (100 Jahre nach Verfüllung) einen deutlichen Rückgang der hypothetisch laugendruckgefährdeten Bereiche (Anlagen 6.4.14 und 6.4.15), bedingt durch die hohe Stützwirkung des steiferen Versatzes. Dabei wird nicht nur die räumliche Ausdehnung dieser Bereiche reduziert, sondern es verringern sich auch deutlich die Differenzbeträge zwischen dem fiktiven Laugendruck und der kleinsten Hauptdruckspannung auf größtenteils weniger als 2 MPa.

#### 6.4.4 Basismodell ZB-O3-P („Best-estimate“-Parameter)

In den Anlagen 6.4.21 und 6.4.22 sind die verformte Struktur und die Verschiebungsvektoren im Zentralbereich, Abbaureihen 2, 3 und 4, dargestellt. Es zeigt sich, dass insbesondere an den westlichen Stößen und in den Firsten der Abbaureihen 2 und 3 deutlich größere Verformungen als an den östlichen Stößen und in den Sohlen auftreten. Dies führt auch zu dem aus Anlage 6.4.21 ersichtlichen charakteristischen Verformungsbild der Schweben.

In den Anlagen 6.4.23 und 6.4.24 sind die Hauptspannungen  $S_1$  und  $S_2$  zum Zeitpunkt 100 Jahre nach Hohlraumerstellung dargestellt. Aus der Verteilung der Hauptspannungen  $S_1$  geht hervor, dass die Gebirgsbereiche im Zentralbereich entlastet werden. Die Spannungsbeträge liegen deutlich unter dem Teufendruck. Bereichsweise, z. B. an der Hohlraumkontur oder an der Grenze von Schichten mit unterschiedlichem Verformungsverhalten, werden Zugspannungen ermittelt. 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 Anlage 6.4.25 dargestellte Verteilung der Effektivspannungen zeigt, dass etwas höhere Spannungsbeträge in den Schweben der Abbaureihe 3 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 2, 3 und 4, als weitgehend stationär angesehen werden.

In Anlage 6.4.26 sind die Effektivverzerrungen zum Zeitpunkt 100 Jahre nach Hohlraumerstellung dargestellt. Erwartungsgemäß treten die größten Verzerrungsbeträge in den Schweben auf. Die Zone der größten Effektivverzerrungen (rot:  $>2,75\%$ ) 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. Auch im Bereich der Abbaue des Kalilagers C treten höhere Verzerrungen auf. Die Verzerrungen werden insbesondere in den Schweben weiter zunehmen.

Die für 60 und 100 Jahre berechneten dilatanten Bereiche im Salzgebirge sind in den Anlagen 6.4.27 und 6.4.28 dargestellt. Die durch Hohlraumauffahrung bedingte gebirgsmechanische Beanspruchung führt im Nahbereich der Abbaue zu dilatanten Auflockerungszonen, insbesondere in den Firsten, Sohlen und Stößen der Abbaue. Sie reichen stellenweise bis an die angrenzenden Anhydritschollen, treten insbesondere aber auch im Bereich zwischen der Abbaureihe 3 und dem westlich angrenzenden Anhydrit auf. Der Vergleich der nach 60 Jahren und nach 100 Jahren auftretenden Dilatanzbereiche zeigt, dass sich in diesem Zeitraum nur noch sehr geringfügige Änderungen ergeben. Im Bereich des Salzspiegels treten im betrachteten Zeitraum keine dilatanten Bereiche auf.

Die Anlagen 6.4.29 und 6.4.30 zeigen die für eine Standzeit von 60 und 100 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 rechnerisch eine deutliche Abnahme der kleinsten Hauptdruckspannung insbesondere im Bereich der Abbaue und in der Salzbarriere zwischen den oberen Anhydritschollen und dem Salzspiegel auf. Im Nahbereich der Abbaue liegt sie um mehr als 4 MPa unterhalb des Laugendrucks. Mit zunehmendem Abstand wird diese Differenz geringer. Gelb bis rot eingefärbt sind die hypothetisch laugendruckgefährdeten Bereiche, die weiträumig bis an die angrenzenden Anhydritschollen sowie westlich oberhalb der oberen Anhydritschollen, aber in einem kleinen Bereich nach 100 Jahren auch östlich bis an den Salzspiegel heranreichen. Der Vergleich der nach 60 Jahren und nach 100 Jahren auftretenden hypothetisch laugendruckgefährdeten Bereiche zeigt, dass sich nur noch geringfügige Änderungen ergeben.

#### 6.4.5 Modellvariante ZB-O3-Q (Verfüllung von Abbauen mit weichem Versatz)

Bei dieser Variante wurde eine Verfüllung aller offenstehenden Abbaue 60 Jahre nach deren Ausbruch simuliert. Dabei wurde eine sehr geringe Versatzsteifigkeit angenommen.

In den Anlagen 6.4.31 bis 6.4.33 sind für drei verschiedene Zeitpunkte (60, 100 und 160 Jahre) die Gebirgsbereiche blau gekennzeichnet, in denen die Dilatanzgrenze momentan, d. h. zum jeweiligen Berechnungszeitpunkt gerade erreicht oder überschritten ist. Infolge der Stützwirkung der in dieser Variante angenommenen, relativ weichen Verfüllung der Abbaue zum Zeitpunkt 60 Jahre werden die im Gebirge vorhandenen deviatorischen Spannungen allmählich reduziert, so dass sie bereichsweise wieder unter der Dilatanzgrenze liegen. Dieser Vorgang lässt sich als Verheilungsprozess von während der Auflockerung entstandenen Mikrorissen interpretieren. Zum Zeitpunkt 100 Jahre (d. h. 40 Jahre nach Verfüllung der Abbaue) ist bereits ein deutlicher Rückgang ehemals dilatanter Gebirgsbereiche zu verzeichnen. Zum Zeitpunkt 160 Jahre (100 Jahre nach Verfüllung) treten rechnerisch nur noch gering ausgedehnte dilatante Bereiche auf, z. B. zwischen einigen Abbauen der Abbaureihen 2, 3 und 4, zwischen einigen Abbauen der Abbaureihe 2 und dem westlich angrenzenden Hauptanhydrit sowie zwischen Abbauen der Abbaureihe 4 und der östlich angrenzenden Anhydritscholle.

Die berechneten, hypothetisch laugendruckgefährdeten Gebirgsbereiche sind sowohl nach 100 Jahren (40 Jahre nach Verfüllung) wie auch nach 160 Jahren (100 Jahre nach Verfüllung) nahezu identisch mit den Ergebnissen der ohne Verfüllung durchgeführten Berechnungen (Anlagen 6.4.34 und 6.4.35). Die stützende Wirkung des Versatzes macht sich aufgrund der geringen Versatzsteifigkeit hier noch nicht nennenswert bemerkbar.

#### 6.4.6 Modellvariante ZB-O3-S (Verfüllung von Abbauen mit steifem Versatz)

Bei dieser Berechnungsvariante wurde ebenfalls eine Verfüllung aller offenstehenden Abbaue 60 Jahre nach deren Ausbruch angenommen, jedoch mit einer gegenüber Variante ZB-O3-Q deutlich höheren Versatzsteifigkeit.

In den Anlagen 6.4.36 bis 6.4.38 sind für drei verschiedene Zeitpunkte (60, 64 und 80 Jahre) die Gebirgsbereiche blau gekennzeichnet, in denen die Dilatanzgrenze momentan, d. h. zum jeweiligen Berechnungszeitpunkt gerade erreicht oder überschritten ist. Infolge der hohen Stützwirkung der in dieser Variante angenommenen, steiferen Verfüllung der Abbaue zum Zeitpunkt 60 Jahre werden die im Gebirge vorhandenen deviatorischen Spannungen vergleichsweise schnell reduziert. Zum Zeitpunkt 64 Jahre (d. h. nur 4 Jahre nach Verfüllung der Abbaue) ist bereits ein erheblicher Rückgang ehemals dilatanter Gebirgsbereiche zu verzeichnen. Zum Zeitpunkt 80 Jahre (20 Jahre nach Verfüllung) treten rechnerisch nur noch sehr wenige dilatante Bereiche auf, z. B. im Bereich des Kalilagers C und im Bereich zwischen Abbau 2n auf der 2. Sohle und dem westlich angrenzenden Anhydrit.

Die berechneten, hypothetisch laugendruckgefährdeten Gebirgsbereiche zeigen sowohl nach 100 Jahren (40 Jahre nach Verfüllung) wie auch nach 160 Jahren (100 Jahre nach Verfüllung) einen deutlichen Rückgang der hypothetisch laugendruckgefährdeten Bereiche (Anlagen 6.4.39 und 6.4.40), bedingt durch die hohe Stützwirkung des steiferen Versatzes. Dabei wird nicht nur die räumliche Ausdehnung dieser Bereiche reduziert, sondern es verringern sich für den Bereich der Steinsalzabbaue auch deutlich die Differenzbeträge zwischen dem fiktiven Laugendruck und der kleinsten Hauptdruckspannung auf größtenteils weniger als 3 MPa.

#### 6.4.7 Modellvariante ZB-O3-1 (Aufteilung des Homogenbereichs z2HS)

In dieser Variante wird eine Trennung des Homogenbereichs z2HS in einen westlichen Teil, z2HS(West), und in einen östlichen Teil, z2HS(Ost), mit unterschiedlichen Kriechkennwerten untersucht.

Die für 60 und 100 Jahre berechneten dilatanten Bereiche im Salzgebirge sind in den Anlagen 6.4.41 und 6.4.42 dargestellt. Im Vergleich zum Basismodell ZB-O3-P ergeben sich hinsichtlich der räumlichen Erstreckung der dilatanten Gebirgsbereiche nur geringfügige Unterschiede.

Die Anlagen 6.4.43 und 6.4.44 zeigen die für eine Standzeit von 60 und 100 Jahren berechnete Differenz zwischen dem in der jeweiligen Teufe theoretisch möglichen Laugendruck und der kleinsten Hauptdruckspannung  $S_1$  im Salzgebirge. Die ermittelten hypothetisch laugendruckgefährdeten Bereiche sind denen mit dem Basismodell ZB-O3-P berechneten Bereichen sehr ähnlich.

ERA  
Morsleben

## 7 Beurteilung der Integrität der Salzbarriere in der Schachtanlage Bartensleben

### 7.1 Bewertungskriterien

Ziel der Untersuchungen ist es, die Wirksamkeit der Salzbarriere im Bereich der Schachtanlage Bartensleben rechnerisch nachzuweisen oder zumindest nach derzeitigem wissenschaftlichen Erkenntnisstand ihr Isolationsvermögen zu bewerten.

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 Entstehung 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 wissenschaftlichen Kenntnisstand für die Bereiche mit kriechfähigem Salzgestein zwei Kriterien herangezogen werden:

- 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 Dichtigkeit 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 Drucks in der entsprechenden Teufe fällt. Der hydrostatische Druck ergibt sich aus einer 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. Dieser Vorgehensweise liegt folgende Modellvorstellung zugrunde:

- Fall A: Ist durch Spannungsentlastungen infolge der Bergbautätigkeit die kleinste Hauptdruckspannung in der Salzbarriere kleiner als der entsprechende hydrostatische Teufendruck (das Laugendruckkriterium ist nicht erfüllt), aber in der Salzbarriere werden noch keine dilatanten Zonen berechnet (das Dilatanzkriterium ist erfüllt), so steht die Lösung vor einer ungeschädigten, rissfreien Barriere. Ein Eindringen in diese Salzschichten oder eine Permeation der Barriere kann langfristig ausgeschlossen werden. Die Integrität ist dauerhaft gewährleistet.
- Fall B: Die Bedingung, dass das Dilatanzkriterium rechnerisch nicht eingehalten wird, das Laugendruckkriterium aber erfüllt ist, tritt nur bei hohen Spannungen auf. Die Bedingung ist deshalb für die Situation in Bartensleben nicht relevant und wird hier nicht betrachtet.
- Fall C: Wenn beide Kriterien rechnerisch nicht erfüllt sind, d. h. eine Lösung mit hohem hydrostatischen Druck an einem dilatanten, aufgelockerten Salzbereich ansteht, könnte dies zu einem langsam fortschreitenden Aufweiten der Mikrorisse, damit auch zur Verbindung der Risse innerhalb des Rissgefüges und schließlich zu einem tieferen Eindringen der Lösungen in die Salzbarriere führen.

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 Anhydrits 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 konservativ.

## 7.2 Bewertung der Ergebnisse der Modellberechnungen

Generell zeigen alle Berechnungsergebnisse, dass sich seit Beendigung des Bergbaubetriebes in allen betrachteten Feldesteilen ein nahezu konstanter Spannungszustand im Gebirge mit i. a. geringen Konvergenzen der Abbaue eingestellt hat. Dieser Zustand ändert sich mit der Zeit nur wenig, so dass insbesondere die derzeitigen Spannungszustände und die daraus resultierenden Verformungsraten sowie die berechneten dilatanten oder hypothetisch

laugendruckgefährdeten Gebirgsbereiche über den Berechnungszeitraum hinaus auf größere Zeiträume extrapoliert werden können.

### 7.2.1 Bewertung des Ostfeldes

Aus den Ergebnissen der geomechanischen Modellberechnungen zum Ostfeld Bartensleben lassen sich folgende Aussagen zur Integrität und Funktionstauglichkeit der Salzsichten im Ostfeld ableiten:

- In den Firsten, Stößen und Sohlen der Abbaue des Ostfeldes werden aufgrund höherer mechanischer Beanspruchung dilatante Bereiche berechnet. Sie erstrecken sich maximal bis ca. 15 m in das Salzgebirge. Vereinzelt reichen sie bis an die westlich und östlich der Abbaue angrenzenden Anhydritklippen heran. Außerdem werden nahezu für die gesamte Mulde zwischen den Anhydritklippen kleinste Hauptdruckspannungen berechnet, die geringer als der in der jeweiligen Teufe theoretisch mögliche Laugendruck sind. Aus diesen beiden rechnerischen Befunden ergibt sich für den Nahbereich der Abbaue auf der 4. Sohle des Ostfeldes, dass beide Kriterien für den Nachweis der Integrität dort nicht erfüllt sind. Da die Anhydritklippen im Ostfeld jedoch keine Verbindung zum Salzspiegel haben, ist die Gefahr von Lösungszuflüssen aus dem Deckgebirge über den Anhydrit und über die aufgelockerten Salzsichten in die Abbaue auszuschließen.
- Für die Salzbarriere zwischen dem Salzspiegel und den Abbauen des Ostfeldes Bartensleben weisen die Berechnungen einen Bereich aus, für den sowohl das Dilatanzkriterium wie auch das Laugendruckkriterium erfüllt sind. Dieser Bereich hat eine Mächtigkeit von ca. 120 m. Ferner beträgt die Mächtigkeit des intakten Salzgebirges über dem höchsten Punkt der Anhydritklippen im betrachteten geologischen Schnitt mindestens ca. 110 m. Der Salzspiegel weist nach den Berechnungsergebnissen grundsätzlich keine ungünstige Beanspruchung auf. Sowohl das Dilatanzkriterium wie auch das Laugendruckkriterium sind über die gesamte, in den Berechnungsmodellen abgebildete Breite des Salzspiegels erfüllt.

Die Ergebnisse der geomechanischen Modellberechnungen zeigen, dass die Mächtigkeit der intakten Salzbarriere oberhalb der Grubenbaue des Ostfeldes Bartensleben ausreichend ist und geomechanisch bedingte Lösungszutritte aus dem Salzspiegelbereich über die Salzbarriere ausgeschlossen werden können.

### 7.2.2 Bewertung des Südfeldes

Aus den Ergebnissen der geomechanischen Modellberechnungen lassen sich folgende Aussagen zur Integrität und Funktionstauglichkeit der Salzsichten im Bereich des Südfeldes ableiten:

- In den Stößen bzw. Firsten der Abbaue werden aufgrund hoher geomechanischer Beanspruchung Auflockerungszonen berechnet. Sie reichen bis maximal 11 m in das Salzgebirge hinein. An diesen Stellen sind beide Kriterien für eine dichte geologische Barriere nicht mehr erfüllt. Nur auf der 3. Sohle erstreckt sich die Auflockerungszone bis zum östlich anstehenden Hauptanhydrit. Dieser Hauptanhydrit hat aber im Südfeld keine Verbindung zum Salzspiegel (BGR 1997).
- Das Gebirge zwischen dem Salzspiegel und den obersten Abbauen (Mächtigkeit ca. 140 m) ist geomechanisch gering belastet. Es werden hier keine Auflockerungen berechnet, da das Dilatanzkriterium erfüllt ist. Für die am Salzspiegel und bis 50 m darunter anstehenden Steinsalzsichten werden Spannungszustände berechnet, die neben dem Dilatanzkriterium auch das Laugendruckkriterium erfüllen. Die Integrität der Salzbarriere im Salzspiegelbereich über den Abbauen ist durch die Bergbautätigkeit nicht beeinträchtigt.
- Im Salzgebirge zwischen den Abbauen des Kalilagers B und dem Hauptanhydrit der Hauptmulde werden abgesehen von den hohlraumnahen Bereichen keine Auflockerungen berechnet. Es ist ein ca. 60 m breiter Gebirgsbereich vorhanden, in dem das Dilatanzkriterium, aber nicht das Laugendruckkriterium erfüllt ist. Nach den Bewertungskriterien in Kapitel 7.1 ist die Integrität rechnerisch nachgewiesen.

Die Ergebnisse der geomechanischen Modellberechnungen lassen die Schlussfolgerung zu, dass die Mächtigkeit der intakten Salzbarriere oberhalb der Grubenbaue des Südfeldes Bartensleben ausreichend ist und geomechanisch bedingte Lösungszutritte aus dem Salzspiegelbereich über die Salzbarriere ausgeschlossen werden können.

### 7.2.3 Bewertung des Westfeldes

Aus den Ergebnissen der geomechanischen Modellberechnungen lassen sich folgende Aussagen zur Integrität und Funktionstauglichkeit der Salzsichten im Bereich des Westfeldes ableiten:

- In den Stößen bzw. Firsten der Abbaue werden aufgrund hoher geomechanischer Beanspruchung Auflockerungszonen berechnet. Sie reichen größtenteils wenige Meter, nur stellenweise bis zu 15 m in das Salzgebirge hinein.

- Das Salzgebirge weist zwischen den konturnahen Auflockerungszonen der obersten Abbaue (Südmulde und Kalilager B) und dem Salzspiegel eine Mächtigkeit von ca. 86 m auf und ist geomechanisch gering belastet. Das Dilatanzkriterium ist für diesen Bereich erfüllt, so dass sich rechnerisch keine Auflockerungsbereiche ergeben. Für die am Salzspiegel und bis ca. 50 m darunter anstehenden Steinsalzschiefer werden Spannungszustände berechnet, die neben dem Dilatanzkriterium auch das Laugendruckkriterium erfüllen. Die Integrität der Salzbarriere im Salzspiegelbereich über den Abbauen der Südmulde und des Kalilagers B ist durch die Bergbautätigkeit nicht beeinträchtigt.
- Im Westfeld zeigt die Berechnung lediglich konturnaher Auflockerungszonen. Um die Abbaue, insbesondere im Salzgebirge zum oberhalb liegenden Hauptanhydrit, wird das Dilatanzkriterium erfüllt und somit eine intakte Salzbarriere ausgewiesen. Lediglich zu der westlich unterhalb der großen Abbaue 1n und 1s der 4. Sohle liegenden Anhydritscholle reicht der als dilatant ausgewiesene Bereich nah heran. Nach dem geologischen Lagerstättenmodell (BGR 1997) weist diese Anhydritscholle keine Verbindung zum Deck- oder Nebengebirge auf. Der an das Nebengebirge angrenzende Gebirgsbereich ist geomechanisch gering beansprucht. Beide Integritätskriterien sind hier erfüllt.
- Im östlichen Stoß der Abbaue der Südmulde wird eine bis zu 10 m breite Auflockerungszone berechnet, die jedoch nicht bis zum Hauptanhydrit reicht. Es verbleibt ein mindestens 14 m breiter Gebirgsbereich, für den das Dilatanzkriterium erfüllt ist. Die Abbaue des Kalilagers B liegen in unmittelbarer Nähe dieses Hauptanhydrits. Er hat aber in dem hier betrachteten Bereich keine Verbindung zum Deckgebirge. Erst im Nordfeld, 350 bis 400 m nördlich, ist mit einzelnen isolierten Anhydritschollen bis in den Salzspiegelbereich zu rechnen.

Die Ergebnisse der Modellberechnungen lassen die Schlussfolgerung zu, dass die Mächtigkeit der intakten Salzbarriere oberhalb der Abbaue des Westfeldes Bartensleben ausreichend ist und aus geomechanischer Sicht Lösungszutritte aus dem Salzspiegelbereich über die Salzbarriere in die Abbaue des Westfeldes, in die Steinsalzabbaue der Südmulde und die Abbaue des Kalilagers B ausgeschlossen werden können. Auch der Abstand der Abbaue zur Westflanke der Salzstruktur ist aufgrund der Berechnungsergebnisse als ausreichend zu beurteilen. Geomechanisch bedingte Lösungszutritte über das Nebengebirge und über die Westflanke in die Abbaue des Westfeldes können ausgeschlossen werden.

#### 7.2.4 Bewertung des Zentralbereichs

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

- Für die unmittelbar unterhalb des Salzspiegels anstehenden Steinsalzsichten werden Spannungszustände berechnet, die unterhalb der Dilatanzgrenze liegen, so dass hier eine Schädigung und damit die Voraussetzung für eine Permeation nicht zu erwarten ist. Die Integrität dieser Schichten ist durch die Abbautätigkeit geomechanisch nicht beeinträchtigt.
- In den Stößen und Firsten bzw. Schweben der Abbaue auf den oberen Sohlen werden aufgrund einer hohen geomechanischen Beanspruchung Auflockerungszonen berechnet, die bis zum angrenzenden Anhydrit reichen und für die die beiden o. g. Integritätskriterien nicht erfüllt sind. Diese Auflockerungszonen sind deshalb als potentielle Schwachstellen der Salzbarriere anzusehen.

Die Modellberechnungen lassen die Schlussfolgerung zu, dass aus geomechanischer Sicht Lösungszutritte in die Abbaue nur über die oberen, bis zum Salzspiegel reichenden Anhydritschollen möglich sind. Diese Schollen werden als bereichsweise durchlässig angesehen. Dann sind theoretisch die folgenden Pfade für einen Lösungszutritt aus dem Salzspiegelbereich in die Grubenbaue des Zentralteils Bartensleben denkbar:

- Bei Pfad 1 (nördlicher Modellschnitt ZB-A2 durch das Abbausystem 1a) könnte die Lösung über die erste und zweite Scholle des Hauptanhydrits und anschließend über die unterhalb der zweiten Scholle berechneten Auflockerungsbereiche im Salzgestein in das Grubengebäude (Abbau 1a auf der 1. Sohle) eindringen. Dieser Pfad setzt eine hydraulische Verbindung zwischen der ersten und der zweiten Anhydritscholle voraus (Anlage 7.1).
- Bei Pfad 2a (südlicher Modellschnitt ZB-O3 entlang des Ostquerschlages) könnte die Lösung über die oberste Scholle des Hauptanhydrits und anschließend über die unterhalb dieser Scholle berechneten Auflockerungsbereiche im Salzgestein in die 3. Abbaureihe eindringen (Anlage 7.2).
- Der Pfad 2b (südlicher Modellschnitt ZB-O3 entlang des Ostquerschlages) ist nur denkbar, wenn eine hydraulische Verbindung zwischen der obersten und der darunterliegenden Anhydritscholle vorhanden ist. Dann wäre sowohl eine hydraulische Verbindung zur Abbaureihe 2 wie auch zu den westlich des Anhydrits angrenzenden Abbauen des Kalilagers C denkbar (Anlage 7.2).

Die nachhaltige Ertüchtigung der durch die Modellberechnungen ausgewiesenen potentiellen Schwachstellen der Salzbarriere im Bereich von Abbauen der Hauptmulde ist durch eine wirksame Verfüllung der Abbaue möglich. Die Ergebnisse der Modellberechnungen unter Annahme einer vollständigen Verfüllung belegen, dass die Dauer bis zur Wirksamkeit dieser Verfüllmaßnahmen wesentlich von der Steifigkeit des Verfüllmaterials abhängt. Werden die Abbaue mit einem Material höherer Steifigkeit (z. B.  $E = 3500 \text{ MPa}$ ) versetzt, so tritt rechnerisch bereits nach wenigen Jahren eine deutliche Stützwirkung auf, die zu einer raschen Reduzierung der dilatanten Gebirgsbereiche führt.

### 7.3 In-situ-Messungen und örtliche Beobachtungen

#### 7.3.1 Messungen und Beobachtungen im Ostfeld

##### Verformungsmessungen

Im Bereich der Abbaue 1 und 4 wurden 1997 mehrere Extensometer und Konvergenzmess-einrichtungen installiert, um im Hinblick auf die Beurteilung der Standsicherheit der Abbaue, insbesondere auch des Pfeilers zwischen den Abbauen 1 und 4, eine langfristige messtechnische Überwachung zu ermöglichen. Im bisherigen Beobachtungszeitraum wurden nur geringfügige Gebirgs- und Konturverformungen gemessen (DBE 2000).

##### Spannungsmessungen

Auf der 4. Sohle des Ostfeldes wurden vom Ostquerschlag aus mehrere Bohrungen abgeteuft, in denen Gebirgsspannungsmessungen nach der Überbohr- und nach der Hydrofrac-Methode durchgeführt wurden (BGR 2000). Die in verschiedenen Klippen des Hauptanhydrits gemessenen Gebirgsspannungen weisen eine deutliche Anisotropie auf. Die dort ermittelten Spannungsbeträge liegen z. T. erheblich über dem lithostatischen Gebirgsdruck von ca. 11 MPa. Im Steinsalz der Ostmulde werden dagegen nur geringe Spannungsanisotropien mit Beträgen deutlich unterhalb des lithostatischen Gebirgsdrucks ermittelt. Diese messtechnischen Befunde, die nicht direkt im Modellschnitt OF-O3, sondern ca. 50 m weiter nördlich im Bereich des Ostquerschlages erzielt wurden, weisen größenordnungsmäßig eine gute Übereinstimmung mit den Ergebnissen der Modellberechnungen auf.

##### Örtliche Beobachtungen

Zur Beurteilung der allgemeinen gebirgsmechanischen Situation des Ostfeldes wurden die Abbaue auf der 4. Sohle mehrmals befahren. Dabei ergaben sich keine Hinweise auf aktive Tropfstellen oder andere Zutrittsstellen von Gebirgslösungen. Dies wird durch das Lösungskataster (BfS 1999) bestätigt.

### 7.3.2 Messungen und Beobachtungen im Südfeld

#### Verformungsmessungen

Im Südfeld wurden im Bereich der Abbaureihen 8 und 9 auf der 2. Sohle bis zur 4a-Sohle und in der 1. südlichen Richtstrecke auf der 4. Sohle seit 1970 insgesamt 19 Konvergenzstrecken, 4 Extensometer und 7 Fissurometer installiert, um die auftretenden Gebirgs- und Konturverformungen zu beobachten (DBE 2000). Davon wurden 6 Konvergenzstrecken und 3 Fissurometer in 1999 eingerichtet. Bisher wurden Verformungen gemessen, die überwiegend eine gleichbleibende Tendenz aufweisen und in ihrem Trend den Ergebnissen von Modellberechnungen entsprechen.

#### Mikroakustische Messungen

Die im Südfeld in der 1. südlichen Richtstrecke auf der 4. Sohle über den Einlagerungskammern 2 und 3 der 5a-Sohle durchgeführten mikroakustischen Messungen zeigen, dass sich die Aktivität akustischer Emissionen auf den Bereich um diese Strecke konzentriert. Die registrierten Ereignis- und Ortungsraten sind im Vergleich mit den Messungen im Zentralbereich deutlich höher und belegen die vergleichsweise hohe örtliche Beanspruchung der Schweben zwischen der 4a-Sohle und der 5a-Sohle, bedingt durch die spezielle lokationsbezogene Hohlraumsituation.

#### Örtliche Beobachtungen

Zur Beurteilung der allgemeinen gebirgsmechanischen Situation des Südfeldes wurden die Abbaue auf verschiedenen Sohlen mehrmals befahren. Dabei ergaben sich keine Hinweise auf aktive Tropfstellen oder andere Zutrittsstellen von Gebirgslösungen. Dies wird durch das Lösungskataster (BfS 1999) bestätigt.

### 7.3.3 Messungen und Beobachtungen im Westfeld

#### Verformungsmessungen

Im Zuge der seit 1993 durchgeführten Erweiterung des Konvergenzmesstellennetzes wurden im Westfeld 16 Messstationen eingerichtet. Die dort registrierten Messwerte zeigen geringe bis vernachlässigbare Konvergenzen und Konvergenzraten, deren Größenordnung den Messwerten in anderen Bereichen der Schachanlage Bartensleben entspricht.

Ferner wurden in den Jahren 1995 und 1996 zur betrieblichen Überwachung der Firsten in den für die Einlagerung genutzten Abbauen 1n, 2n und 3n der 4. Sohle drei Firstextensometer installiert. Nach Befüllung der Abbaue und nach Abklingen der durch die Bewetterung

verursachten Temperaturschwankungen sind keine signifikanten Gebirgsverformungen mehr erkennbar (DBE 2000).

### Spannungsmessungen

Im Zuge eines betrieblichen Überwachungsprogramms wurden 1995 in der Firste des Abbaus 1s auf der 4. Sohle Hydrofrac-Messungen zur Ermittlung von Gebirgsspannungen durchgeführt. Es ergaben sich deutlich reduzierte Gebirgsdrücke, die durch Spannungsumlagerungen im Nahbereich des Abbaus bedingt sind.

### Örtliche Beobachtungen

Zur Beurteilung der allgemeinen gebirgsmechanischen Situation des Westfeldes wurden die Abbaue auf der 4. Sohle mehrmals befahren. Dabei ergaben sich keine Hinweise auf aktive Tropfstellen oder andere Zutrittsstellen von Gebirgslösungen. Dies wird durch das Lösungskataster (BfS 1999) bestätigt.

#### 7.3.4 Messungen und Beobachtungen im Zentralbereich

### Verformungsmessungen

Im Zentralbereich der Schachtanlage Bartensleben wurden über viele Jahre Konvergenzmessungen u. a. in folgenden Abbauen durchgeführt (Anlage 7.3):

- 1. Sohle, Abbaukammer 2 nördlich, Station CG083K, vertikal und horizontal (alte Bezeichnung der Messstationen: 1.1(v) und 1.2(h)),
- 2. Sohle, Abbaukammer 2 nördlich, Station CG135K, vertikal und horizontal (alte Bezeichnung der Messstationen: 2.2(v) und 2.3(h)),
- 2. Sohle, Abbaukammer 3 nördlich, Station CG132K, horizontal (alte Bezeichnung der Messstation: 2.7(h)),
- 2. Sohle, Abbaukammer 4 nördlich, Station CG133K, vertikal und horizontal (alte Bezeichnung der Messstationen: 2.8(v) und 2.9(h)).

Wegen der großen Querschnitte der Abbaue und der erforderlichen Zugänglichkeit der Messlokationen liegen die Konvergenzmesspunkte nicht in den Querschnittsachsen. So wurden die horizontalen Messstrecken ca. 2,5 m oberhalb des Sohlenniveaus und die vertikalen Messstrecken meist unterhalb eines Überhangs am Stoß der Abbaue angeordnet. Die in den o. g. Abbaukammern größtenteils seit 1971 durchgeführten Konvergenzmessungen zeigen abklingende bis stationäre Verformungsraten auf geringem Niveau. So liegen die jährlichen Konvergenzraten derzeit in horizontaler Richtung zwischen 0,1 und 0,8 mm/a und in vertikaler Richtung zwischen 0,3 und 1 mm/a (BGR 1999a).

Die in den o. g. Messstationen gemessenen Konvergenzraten sind in Tab. 7.1 zusammengestellt. Zum Vergleich sind die entsprechenden mit Modell ZB-O3 berechneten Werte und ein Faktor  $f$  als Quotient aus berechneter und gemessener Konvergenzrate angegeben. Es werden i. a. um den Faktor 1,5 bis 3,5 höhere Raten berechnet, so dass die Modellberechnungen bezüglich der Gebirgsverformungen als konservativ angesehen werden können.

Konvergenzmessstation	gemessen (mm/a)	berechnet (mm/a)	$f = \text{ber./gem.}$
CG083K, 1.1 (vertikal)	0,07 - 0,11	0,24	2,2 - 3,4
CG083K, 1.2 (horizontal)	0,10 - 0,12	0,74	6,2 - 7,4
CG135K, 2.2 (vertikal)	0,50 - 0,65	0,56	0,9 - 1,1
CG135K, 2.3 (horizontal)	0,16 - 0,24	0,35	1,5 - 2,2
CG132K, 2.7 (horizontal)	0,20 - 0,32	0,49	1,5 - 2,5
CG133K, 2.8 (vertikal)	0,60 - 0,70	2,00	2,9 - 3,3
CG133K, 2.9 (horizontal)	0,80 - 0,90	1,32	1,5 - 1,7

Tabelle 7.1: Gemessene und berechnete Konvergenzen von Abbauen im Zentralbereich

### Spannungsmessungen

Im Zentralbereich wurden Spannungsmessungen im Steinsalzgebirge auf der 4. Sohle im Ostsattel nördlich des UMF-Feldes (Messlokation 1 bzw. Bohrbereich 3.05) sowie im Hauptanhydrit auf der 2. und 3. Sohle (Messlokation 6) durchgeführt (BGR 2000). Diese Lokationen liegen in Nähe des in den Berechnungen gewählten Schnitts ZB-O3, so dass die experimentellen Befunde mit den Ergebnissen der Modellberechnungen verglichen werden können. Für diesen Vergleich werden die mit Modell ZB-O3-P erzielten Berechnungsergebnisse herangezogen.

Die im Steinsalz in Messlokation 1 (Bohrbereich 3.05) durchgeführten Spannungsmessungen weisen auf eine geringe Anisotropie der Gebirgsspannungen hin. Die Vertikalspannung liegt i. a. zwischen ca. 11,5 und 12,5 MPa, die größte Horizontalspannung beträgt ca. 12,0 MPa bei einer Orientierung zwischen N und NO. Die kleinste Horizontalspannung ist ca. 10,0 MPa. Diese Werte entsprechen annähernd dem teufenbezogenen lithostatischen Gebirgsdruck von ca. 11,6 MPa.

Aus den Modellberechnungen lassen sich für die o. g. Messlokation folgende Spannungswerte ableiten:

- maximale Hauptdruckspannung: 14,6 - 15,2 MPa,
- mittlere Hauptdruckspannung: 11,7 - 12,5 MPa,
- minimale Hauptdruckspannung: 8,7 - 9,8 MPa,
- Orientierung der max. Hauptdruckspannung:  $8^\circ$  -  $16^\circ$  aus der Vertikalen geneigt.

Damit ergibt sich aus den Modellberechnungen für die Messlokation 1 bezüglich der Orientierung der Spannungen eine etwa gleiche Konstellation wie aus den Messungen; die maximale Gebirgsspannung ist annähernd vertikal orientiert. Die berechneten maximalen Gebirgsdruckspannungen sind höher als die gemessenen, die berechneten minimalen Spannungen geringer als die gemessenen, so dass aus den Berechnungen höhere Spannungsdifferenzen (ca. 5 MPa) als aus den Messungen (ca. 2 MPa) resultieren.

Die Ergebnisse der Spannungsmessungen in Messlokation 6 zeigen, dass im Hauptanhydrit Spannungszustände mit ausgeprägter Anisotropie vorliegen. Dabei betragen die maximalen Gebirgsspannungen ca. 15 bis 26 MPa, im Einzelfall auch bis zu ca. 60 MPa, bei annähernd vertikaler bis subvertikaler Orientierung und liegen damit deutlich, z. T. erheblich über dem lithostatischen Gebirgsdruck. Die minimalen Gebirgsspannungen liegen i. a. zwischen ca. 4 und 13 MPa, im Einzelfall auch bei ca. 35 MPa.

Die Modellberechnungen zeigen für die Messlokation 6 ebenfalls, dass sich im Hauptanhydrit mit der Zeit beträchtliche Spannungsbeträge bei ausgeprägter Spannungsanisotropie einstellen. Dabei sind auch hier die maximalen Spannungen subvertikal ausgerichtet. Diese Effekte sind durch die zeitabhängige Konvergenz der Abbaue im Zentralbereich bedingt.

Die Übereinstimmung der an den Messlokalationen 1 und 6 gemessenen und für diesen Bereich berechneten Gebirgsspannungen ist zufriedenstellend. Die messtechnischen Befunde belegen, dass der in den Berechnungsmodellen gewählte Ausgangsspannungszustand weitgehend zutreffend ist.

### Permeabilitätsmessungen

Zur Charakterisierung der hydraulischen Eigenschaften der Salzsichten wurden In-situ-Permeabilitätsmessungen an verschiedenen Lokationen durchgeführt, um Auflockerungszonen, z. B. in Grenzbereichen von Schichten mit unterschiedlichem Verformungsverhalten, in Schweben und Pfeilern des Grubengebäudes sowie im Nahbereich von Abbauen, zu identifizieren und von unverritzten, d. h. ungestörten Gebirgsbereichen abzugrenzen (BGR 1998b).

Eine dieser Messlokationen liegt im Zentralbereich auf der 2. Sohle. Die dort abgeteuften Messbohrungen verlaufen annähernd horizontal vom westlichen Abbaustoß durch das anstehende Salzgestein und reichen bis in den Hauptanhydrit.

In den im Steinsalz durchgeführten Permeabilitätsuntersuchungen wurde für die stoßnahen Messintervalle eine etwas höhere Permeabilität als für das Bohrloch tiefste ermittelt. Jedoch weisen die in unterschiedlichen Bohrloch-tiefen ermittelten Permeabilitäten Werte um  $10^{-20} \text{ m}^2$  auf und liegen damit in einem Wertebereich, in dem Salzgestein als dicht angesehen werden kann. Eine Erhöhung der Permeabilität der Steinsalzbarriere zum westlich des Zentralbereichs angrenzenden Anhydrits konnte experimentell nicht bestätigt werden.

In Anhydrit wurden stark wechselnde Permeabilitäten von  $<10^{-20} \text{ m}^2$  bis in den Bereich  $10^{-17} \text{ m}^2$  gemessen. Die Unterschiede in der Permeabilität treten kleinräumig (im Meterbereich) auf. Der am Kernmaterial erkennbare Porenraum, der in teilverheilten Klüften vorkommt, ist nicht als abbaubedingt bzw. als entspannungsbedingt einzustufen.

#### Mikroakustische Messungen

Seit Mitte 1995 werden im Bereich des Abbaus 1a auf der 1a-Sohle und des Abbaus 2n auf der 1. Sohle sowie im Bereich der Abbaue 2a und 3 auf der 2. Sohle mikroakustische Emissionen registriert (BGR 1999c), so dass dort Bereiche mit aktueller höherer Beanspruchung identifiziert werden können.

Die Umgebung des Abbaus 1a der 1a-Sohle ist nach den Messergebnissen unauffällig. Eine Signalerfassung direkt oberhalb dieses Abbaus ist wegen der Beschränkung der Positionierung der Sensoren jedoch nicht möglich. Konzentrationen mikroakustischer Emissionen lassen sich an der Kontur von Abbauen, in Pfeilern und in Schweben detektieren. Dies lässt auf eine konturnahe Auflockerung des Gebirges schließen, die mit Abschalungen verbunden sein kann. Die höchste Signaldichte wird im Nordstoß des Abbaus 2n der 1. Sohle ermittelt, vermutlich bedingt durch die diffuse Fortsetzung eines Risses im Nordteil des Abbaus 2n. Mikroakustisch auffällig ist ferner die westlich der Abbaureihen 1 und 2 verlaufende Grenzfläche zwischen Steinsalz und Hauptanhydrit. Dort deuten räumlich eng begrenzte Ereignisse auf ein lokales Aufreißen in der Grenzfläche hin, vermutlich verursacht durch bergbaulich bedingte Spannungsumlagerungen. Aus dem Hauptanhydrit werden in geringerem Umfang Signale empfangen, die jedoch stärker ausgeprägt sind. Diese Signale sind vermutlich auf aktuelle Mikrorissbildungen auf bereits existierenden Klüften zurückzuführen.

Die Verteilung der Ortungen im bisherigen Messzeitraum ist annähernd gleichbleibend. Daraus lässt sich schließen, dass sich die geomechanische Situation im untersuchten Bereich nicht oder nur geringfügig verändert hat.

### Örtliche Befunde

Im Zentralbereich der Schachanlage Bartensleben erfolgten mehrere Befahrungen mit dem Ziel, Hinweise auf eine großräumige Beeinträchtigung des Tragverhaltens der Abbaue (z. B. infolge von Rissbildungen, Abschalungen, Firstlösern oder Sohlhebungen) und der Integrität der Salzbarriere zu erhalten.

Die visuelle Überprüfung der zugänglichen Stoß- und Sohlbereiche in den Abbauen ergab folgende Hinweise:

- Ausgeprägte Rissbildungen (mit Ausnahme des im westlichen Stoß des Abbaus 2 Nord, 1. Sohle, auftretenden Horizontalrisses) oder großflächige Abschalungen sind nicht zu verzeichnen.
- An den rechnerisch als potentielle Schwachstellen ausgewiesenen Gebirgsbereichen treten mit Ausnahme des Abbaus 1a der 1. Sohle keine Lösungen aus.
- In den Gebirgsbereichen der Hauptmulde, in denen der Anhydrit angefahren wurde, treten keine Lösungen aus.

## 7.4 Zusammenfassende Bewertung der Barrierenintegrität

### Einlagerungsbereiche

Für die Einlagerungsbereiche Westfeld, Südfeld und Ostfeld wurden Modellberechnungen zur Ermittlung der geomechanischen Beanspruchung der Salzbarriere über den Einlagerungsbereichen durchgeführt. Die Ergebnisse belegen, dass nur im Nahbereich der Abbaue und Abbaufelder dilatante Auflockerungsbereiche auftreten. Es werden hypothetisch laugendruckgefährdete Bereiche ausgewiesen. Diese reichen aber nicht bis an den Salzspiegel bzw. an das Nebengebirge. In der Salzbarriere oberhalb der o. g. ergeben sich vorwiegend geringe Beanspruchungszustände, so dass sie aus geomechanischer Sicht als unversehrt und damit als hydraulisch dicht bewertet wird. Vereinzelt ergeben sich zwischen den Abbauen der o. g. Einlagerungsbereiche und angrenzenden Anhydritschollen Gebirgsbereiche, für die die beiden Integritätskriterien (Dilatanzkriterium und Laugendruckkriterium) lokal nicht erfüllt sind. Da die betroffenen Anhydritschollen aber isoliert sind und in den betrachteten Bereichen des ERA Morsleben keine Verbindung zum Deckgebirge aufweisen, ist die Möglichkeit eines Lösungszuflusses aus dem Deckgebirge über den Anhydrit in die Einlagerungsbereiche nicht gegeben.

Die Ergebnisse der Modellberechnungen werden durch örtliche Befunde und ggf. auch durch geotechnische Messdaten gestützt. So gibt es keine Hinweise für eine drastische Veränderung des jetzigen Zustands.

### Zentralbereich

Die Ergebnisse der Modellberechnungen lassen den Schluss zu, dass aus geomechanischer Sicht zum gegenwärtigen Zeitpunkt und auch im Verlauf der nächsten Jahrzehnte Lösungszutritte aus dem Salzspiegelbereich – wenn dort tatsächlich Lösungen anstehen würden – nur durch den bereichsweise durchlässigen Anhydrit möglich sind. Dies wird durch örtliche Befunde und geotechnische Untersuchungen belegt:

- Die an charakteristischen Stellen im Steinsalz durchgeführten Permeabilitätsmessungen zeigen, dass die Bereiche höherer Durchlässigkeit annähernd mit den berechneten Auflockerungsbereichen übereinstimmen.
- Über die berechneten Auflockerungszonen treten mit Ausnahme des Abbaus 1a der 1. Sohle keine Lösungen aus. Die Lösungen des Abbaus 1a stammen nachweislich nicht aus dem Deckgebirge. Es handelt sich um salzstrukturinterne Rest- bzw. Metamorphoselösungen. Es sind auch keine Ereignisse zu verzeichnen, die auf eine Änderung des derzeitigen Zustands hinweisen.

In der Bewertung der Berechnungsergebnisse wird der Anhydrit als potentieller Lösungsbringer für Lösungen aus dem Salzspiegelbereich angesehen. Es gibt allerdings keine Hinweise auf eine solche Lösungsführung im Anhydrit. Hierzu liegen folgende Befunde vor:

- Der Anhydrit liegt in Schollen vor, so dass eine durchgängige Wegigkeit über mehrere Anhydritschollen nicht unmittelbar gegeben ist. Die Schollen sind durch dazwischenliegendes Carnallitit voneinander getrennt.
- Die Permeabilitätsmessungen belegen, dass der Anhydrit in weiten Bereichen dicht und nur stellenweise erhöht permeabel ist.
- In den Gebirgsbereichen der Hauptmulde, in denen der Anhydrit angefahren wurde, treten keine Lösungen aus. Stellenweise angetroffene Lösungen sind versiegt.
- Die im Abbau 1a der 1. Sohle zutretenden Lösungen sind nach Untersuchungen von HERRMANN (1999) konservierte Lösungsreste. Die chemische Zusammensetzung ist weitgehend unverändert. Die Zuflüsse haben eine geringe und nahezu konstante Rate. Eine Verbindung mit den Wässern des Deckgebirges ist nicht nachgewiesen. Hierzu müsste zur obersten, direkt an das Hutgestein anschließenden Anhydritscholle eine hydraulische Verbindung vorhanden sein, deren Existenz jedoch nicht belegt ist, und diese Scholle müsste permeabel sein.

Aufgrund der Messergebnisse, der örtlichen Beobachtungen und der berechneten, annähernd stationären Spannungen ist davon auszugehen, dass aus geomechanischer Sicht der gegenwärtige Zustand mindestens einige Jahrzehnte erhalten bleibt und eine drastische Veränderung der jetzigen Barrierewirkung des Salzgesteins nicht zu besorgen ist. Außerdem belegen hydraulische Untersuchungen, dass der Anhydrit nur in Bereichen von Klüften durchlässig ist. Es konnte an keiner Stelle des Zentralbereichs beobachtet werden, dass der Anhydrit Lösungen aus dem Salzspiegelbereich führt. Selbst wenn im Anhydrit Lösungen vorhanden sein sollten, kann davon ausgegangen werden, dass Lösungserscheinungen im Anhydrit von untergeordneter Bedeutung sind. Eine erhebliche Zunahme der Zuflussraten und eine Gefährdung des Betriebes des ERA Morsleben durch unbeherrschbare Lösungszuflüsse ist nicht zu erwarten.

#### Nordfeld, Südostfeld

Für das Nordfeld und das Südostfeld sind keine speziellen Modellberechnungen durchgeführt worden. Die für den Zentralbereich erzielten Berechnungsergebnisse können jedoch aus folgenden Gründen auch auf diese Felder übertragen werden:

- Die geologische Situation im Nord- und Südostfeld ist der im Zentralbereich sehr ähnlich und ist ebenfalls dadurch gekennzeichnet, dass der Hauptanhydrit auf der Westflanke der Hauptmulde in mehrere Schollen zerlegt ist, die bis zum Salzspiegel reichen. Dies wird für das Südostfeld durch die geologischen Schnitte 1.2, 1.3 und 1.4 (Anlagen 7.4 bis 7.6) sowie für das Nordfeld durch die geologischen Schnitte 5 und 5.1 (Anlagen 7.7 und 7.8) belegt (BGR 1997).
- Die Abbausituation ist dadurch gekennzeichnet, dass auf mehreren Sohlen Abbaubetrieb durchgeführt wurde, in dessen Verlauf zahlreiche Abbaue entstanden, die teilweise sehr dicht an die o. g. Anhydritschollen heranreichen. Generell ist der Durchbaugrad im Nord- und Südostfeld geringer als im Zentralbereich, so dass die in den Modellschnitten ZB-O3 und ZB-A2 erzielten Ergebnisse konservativ auch für das Nord- und Südostfeld gelten.

Auf der Grundlage der für den Zentralbereich ermittelten Berechnungsergebnisse ist die Barrierewirkung des Salzgebirges im Salzspiegelbereich oberhalb der Abbaue des Nord- und Südostfeldes als intakt einzuschätzen. Für den Nahbereich der Abbaue, also auch für den Gebirgsbereich zwischen den Abbauen und den westlich angrenzenden Anhydritschollen, ist davon auszugehen, dass sich dort sowohl dilatante wie auch hypothetisch laugendruckgefährdete Zonen ausgebildet haben, die bis an die Anhydritschollen heranreichen. Damit wären dort die Integritätskriterien nicht erfüllt, so dass die Möglichkeit eines Lösungszuflusses vom Deckgebirge über den Hauptanhydrit in die Abbaue aus geomechanischer Sicht nicht ausgeschlossen werden kann. Bisher konnte an keiner Stelle des Südostfeldes ein Lösungs-

zufluss beobachtet werden. Dies wird durch das Lösungskataster (BfS 1999) bestätigt. Im Nordfeld gibt es nur das Salzlösungsvorkommen Abbaustrecke 5. Dort treten aus einem durch ein Ventil abgesperrten Bohrloch bei Öffnung geringe Mengen stark konzentrierter  $\text{MgCl}_2$ -Lösungen aus. Die jährlich zutretende Lösungsmenge liegt unter 10 l. Es handelt sich um wahrscheinlich bereits im Zechsteinbecken gebildete und in klüftigem Gestein gespeicherte Lösungen (HERRMANN 1999, BGR 1998a).

ERA  
Morsleben

## 8 Zusammenfassung und Schlussbetrachtung

Ziel der von der BGR durchgeführten geowissenschaftlichen 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 die Dichtheit der Salzbarriere. 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 7.1 beschriebenen Kriterien

- Dilatanzkriterium
- 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.

Für die Einlagerungsbereiche Westfeld, Südfeld und Ostfeld zeigen die Modellberechnungen, dass nur im Nahbereich der Abbaue und Abbaufelder dilatante Auflockerungsbereiche und, mit größerer räumlicher Erstreckung, hypothetisch laugendruckgefährdete Bereiche auftreten. Die Salzbarriere oberhalb der o. g. Abbaufelder weist aus geomechanischer Sicht ausreichend große Gebirgsbereiche am Salzspiegel auf, die als unversehrt und damit als hydraulisch dicht zu bewerten sind. Die an die Einlagerungsbereiche angrenzenden Anhydritschollen sind isoliert und weisen in den betrachteten Bereichen keine Verbindung zum Deckgebirge auf. Daher ist die Möglichkeit eines Lösungszuflusses aus dem Deckgebirge

über den Anhydrit in die Einlagerungsbereiche hier nicht gegeben. Der rechnerische Nachweis der Integrität der Salzbarriere über den Einlagerungsfeldern erstreckt sich über einen Zeitraum von ca. 100 Jahren, beginnend mit der Bergbautätigkeit. Für größere Zeiträume sind nur geringe Änderungen der geomechanischen Beanspruchung der Salzbarriere zu erwarten, so dass ein entsprechender Erhalt des Isolationsvermögens erwartet werden kann. Die Ergebnisse der Modellberechnungen werden durch örtliche Befunde und ggf. auch durch geotechnische Messdaten gestützt. So gibt es keine Hinweise auf eine drastische Veränderung des jetzigen Zustands.

Für den Zentralbereich zeigen die Modellberechnungen, dass aus geomechanischer Sicht die Salzbarriere im Salzspiegelbereich über den Abbauen des Zentralbereichs in ausreichendem Umfang intakt ist. So wird für die unmittelbar unterhalb des Salzspiegels anstehenden Steinsalzsichten keine Dilatanz ermittelt, so dass dort eine Schädigung und damit die Voraussetzung für eine Permeation nicht zu erwarten ist. Zum gegenwärtigen Zeitpunkt und auch während der nächsten Jahrzehnte sind geomechanisch bedingte Lösungszutritte in die Abbaue nur über die oberen, bis zum Salzspiegel reichenden Anhydritschollen und über die dilatanten und hypothetisch laugendruckgefährdeten Gebirgsbereiche zwischen den Anhydritschollen und den angrenzenden Abbauen möglich.

Die nachhaltige Ertüchtigung dieser durch die Modellberechnungen ausgewiesenen potentiellen Schwachstellen der Salzbarriere im Bereich der Abbaue des Zentralbereiches ist durch eine wirksame Verfüllung möglich, durch die eine Erhöhung der Druckspannungen im Gebirge bzw. eine Reduzierung dilatanter Bereiche in der Salzbarriere bewirkt wird. Modellberechnungen unter Annahme einer Verfüllung aller Abbaue belegen, dass dieser Vorgang Zeit in Anspruch nimmt und insbesondere von der Steifigkeit des Versatzes abhängt. Daher sollte mit der Verfüllung von Abbauen rechtzeitig - abgestimmt auf die angewendete Versatzmaßnahme - begonnen werden.

Auf der Grundlage der für den Zentralbereich ermittelten Berechnungsergebnisse ist die Salzbarriere im Salzspiegelbereich oberhalb der Abbaue des Nord- und Südostfeldes ebenfalls in ausreichendem Umfang als intakt einzuschätzen. Für den Gebirgsbereich zwischen den Abbauen und den westlich angrenzenden Hauptanhydritschollen ist von dilatanten und hypothetisch laugendruckgefährdeten Zonen auszugehen, die bis an diese Schollen heranreichen. Damit wären in diesem Bereich die Integritätskriterien nicht erfüllt, so dass auch dort die Möglichkeit eines Lösungszuflusses vom Deckgebirge über den Hauptanhydrit in die Abbaue aus geomechanischer Sicht nicht ausgeschlossen werden kann. Auch dort ist langfristig eine Verbesserung des Zustandes nur durch eine Verfüllung von Abbauen möglich.

Die Analyse möglicher Zuflusszenarien zeigt, dass die o. g. Lösungszuflüsse während der

Betriebs- und der Stilllegungszeit des ERA Morsleben beherrschbar bleiben. Nach den derzeitigen Erkenntnissen sollte eine Verfüllung von Abbauen des Zentralbereichs, des Nordfeldes und des Südostfeldes Bartensleben so rechtzeitig begonnen werden, dass diese Abbaue bis zum Jahr 2030 verfüllt sind.

## BUNDESANSTALT FÜR GEOWISSENSCHAFTEN UND ROHSTOFFE

Hannover, 14.12.2000

Im Auftrage:

Autoren:

(Dr. H. Raschka)

- Dir. u. Prof. -  
- Abteilungsleiter B2 -

(Dr.-Ing. St. Heusermann)

- Wiss. Direktor -  
- Arbeitspaketleiter -

(Dr.-Ing. M. Wallner)

- Dir. u. Prof. -  
- Projektleiter Endlagerung -

(Dr.-Ing. H.-K. Nipp)

- Wiss. Oberrat -

## Literatur- und Unterlagenverzeichnis

- BfS (1999): Vorkommen salinärer Lösungen in den Grubenfeldern Marie und Bartensleben - ERA Morsleben. Lösungskataster. Dokumentation, 1. Fortschreibung, Datenbestand: Ende 1997, Salzgitter.
- BfS/DBE (1997): Sohlenrisse ERA Morsleben, Schachtanlage Bartensleben (Stand Dez. 1997).
- BGR (1991): Testbericht und Freigabemitteilung für das Programmsystem ANSALT I (Release 1991-1) (Autor: H.-K. NIPP). Bericht, Archiv-Nr. 108586, Hannover.
- BGR (1994): Interaktives Dialogsystem INCA (Autoren: H.-K. NIPP, D. MÜLLER & TH. STECHER). Abschlussbericht zum Arbeitspaket 9G 21323000, Archiv-Nr. 112696, Hannover.
- BGR (1997): ERA Morsleben - Erarbeitung eines geologischen Lagerstättenmodells Morsleben. Abschlussbericht zum Arbeitspaket 9M 21246011 (Autoren: J. BEHLAU, G. MINGERZAHN & O. BORNEMANN), Archiv-Nr. 116872, Hannover.
- BGR (1998a): Geologische Gesamtbewertung der Lösungszutritte in den Gruben Bartensleben und Marie (Autor: H. KÄBEL). Bericht zum Arbeitspaket 9M 21245011, Archiv-Nr. 116678, Hannover.
- BGR (1998b): Hydraulische Untersuchungen im Grubengebäude Morsleben (Autoren: J.R. WEBER & M. WALLNER). Abschlussbericht zum Arbeitspaket 9M 21310031, Archiv-Nr. 117065, Hannover.
- BGR (1998c): ERA Morsleben – Gebirgsmechanische und geotechnische Untersuchungen im Labor und in situ: Ingenieurgeologische Erkundung von Homogenbereichen (Autoren: U. HUNSCHKE, I. PLISCHKE & O. SCHULZE). Abschlussbericht zum Arbeitspaket 9M 21310015, Archiv-Nr. 117213, Hannover.
- BGR (1998d): Projekt Morsleben - Festigkeitsmechanische Untersuchungen an Bohrkernen (Darstellung der Einzelergebnisse) (Autoren: W. BLEICH & H. SCHNIER). Bericht zum Arbeitspaket 9M 21310016, Archiv-Nr. 117221, Hannover.

- BGR (1999a): ERA Morsleben - Bewertung geomechanischer und markscheiderischer Messungen (Autoren: D. BACKHAUS, H. SCHNIER & TH. SPIES). Zwischenbericht 7/1997 – 3/1998 zum Arbeitspaket 9M 21330011, Archiv-Nr. 117549, Hannover.
- BGR (1999b): ERA Morsleben - Erarbeitung eines geologischen Lagerstättenmodells. 3. Anhang: Detailänderungen des strukturellen Baues im Bereich des Ostfeldes. Bericht zum Arbeitspaket 9M 21246011 (Autoren: J. BEHLAU & G. MINGERZAHN), Archiv-Nr. 118776, Hannover.
- BGR (1999c): ERA Morsleben - Bewertung geomechanischer und markscheiderischer Messungen (Autoren: TH. SPIES & D. BACKHAUS). Zwischenbericht Zeitraum 01.04.1998 bis 31.03.1999 zum Arbeitspaket 9M 21330011, Archiv-Nr. 0119556, Hannover.
- BGR (2000): ERA Morsleben - Gebirgsspannungsuntersuchungen in der Schachtanlage Bartensleben (Autoren: St. HEUSERMANN, J. HANISCH, K.-H. SPRADO, H. KUNZ, F.-J. HOPPE & W. KÜCHEMANN). Abschlussbericht zum Arbeitspaket 9M 21310012, Archiv-Nr. 0120223, Hannover.
- CRISTESCU, N. & HUNSCH, U. (1998): Time Effects in Rock Mechanics. John Wiley & Sons, Chichester.
- DBE (2000): Morsleben - Geomechanische Betriebsüberwachung 1999. Bericht, DBE-Dok.-Kennz. 9M/99Y/GC/BY/0010/00, Peine.
- HERRMANN, A.G. (1999): ERA Morsleben - Lösungsvorkommen in den Grubenfeldern Marie und Bartensleben: Stoffbestand, Herkunft, Entstehung. Zusammenfassung wichtiger Befunde; 01.01.1991 – 31.12.1997, 91 Seiten.

## Abkürzungsverzeichnis

BfS:	Bundesamt für Strahlenschutz
BGR:	Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe
DBE:	Deutsche Gesellschaft für den Bau und Betrieb von Endlagern für Abfallstoffe mbH
ERA:	Endlager für radioaktive Abfälle
FE-Modell:	Finite-Elemente-Modell
GOK:	Geländeoberkante
OF:	Ostfeld
SF:	Südfeld
WF:	Westfeld
ZB:	Zentralbereich
N:	Nord
E:	Ost
S:	Süd
W:	West
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]
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 [-]
$\gamma$	Dichte [kg/dm <sup>3</sup> ]
$\sigma_{eff}$	Effektivspannung [MPa]
$\sigma^*$	Normierungsspannung [MPa]

Weitere Abkürzungen und Formelzeichen sind im Text erläutert.

**Tabellenverzeichnis**

- Tabelle 4.1: Elastische Kennwerte der geologischen Schichten
- Tabelle 4.2: Relative Kriechfähigkeit  $A^*$  der modellierten Homogenbereiche im Ostfeld
- Tabelle 4.3: Relative Kriechfähigkeit  $A^*$  der modellierten Homogenbereiche im Südfeld
- Tabelle 4.4: Relative Kriechfähigkeit  $A^*$  der modellierten Homogenbereiche im Westfeld
- Tabelle 4.5: Relative Kriechfähigkeit  $A^*$  der modellierten Homogenbereiche  
im Zentralbereich
- Tabelle 7.1: Gemessene und berechnete Konvergenzen von Abbauen im Zentralbereich

ERA  
Morsleben

## Anlagenverzeichnis

(Die Anlagen sind kapitelweise numeriert. Die erste Ziffer bezieht sich auf das betreffende Hauptkapitel. Ggf. folgt, durch einen Punkt getrennt, die Nummer des betreffenden Unterkapitels. Danach folgt, ebenfalls durch einen Punkt getrennt, die fortlaufende Nummer der Anlagen in dem jeweiligen Haupt- bzw. Unterkapitel.)

- Anlage 3.1: Geologisches Profil 3.1 durch die Schachtanlage Bartensleben (BGR 1997)
- Anlage 3.2: Sohlenriss des Ostfeldes, 4. Sohle (BGR 1997)
- Anlage 3.3: Geologisches Profil 3.1, Ostfeld (BGR 1997)
- Anlage 3.4: Sohlenriss des Südfeldes, 3. Sohle (BGR 1997)
- Anlage 3.5: Geologisches Profil 1.3, Südfeld (BGR 1997)
- Anlage 3.6: Sohlenriss des Westfeldes, 4. Sohle (BGR 1997)
- Anlage 3.7: Geologisches Profil 3.1, Westfeld (BGR 1997)
- Anlage 3.8: Sohlenriss des Zentralbereichs, 2. Sohle (BGR 1997)
- Anlage 3.9: Geologisches Profil 3.1, Zentralbereich (BGR 1997)
- Anlage 3.10: Geologisches Profil 3.3, Zentralbereich (BGR 1997)
- 
- Anlage 4.1: Modellierte Abbaue und Strecken im Ostfeld
- Anlage 4.2: Modellierte Abbaue und Strecken im Südfeld
- Anlage 4.3a: Modellierte Abbaue und Strecken im Westfeld (Ausschnitt 1)
- Anlage 4.3b: Modellierte Abbaue und Strecken im Westfeld (Ausschnitt 2)
- Anlage 4.4: Modellierte Abbaue und Strecken im Zentralbereich,  
Modellschnitt ZB-A2 (Abbaureihe 1)
- Anlage 4.5: Modellierte Abbaue und Strecken im Zentralbereich,  
Modellschnitt ZB-O3 (Abbaureihen 2, 3 und 4)
- Anlage 4.6a: Modellierte Homogenbereiche im Ostfeld (alter Kenntnisstand)
- Anlage 4.6b: Modellierte Homogenbereiche im Ostfeld (neuer Kenntnisstand)
- Anlage 4.7: Modellierte Homogenbereiche im Südfeld
- Anlage 4.8: Modellierte Homogenbereiche im Westfeld
- Anlage 4.9: Modellierte Homogenbereiche im Zentralbereich, Modellschnitt ZB-A2
- Anlage 4.10a: Modellierte Homogenbereiche im Zentralbereich, Modellschnitt ZB-O3  
(alter Kenntnisstand)
- Anlage 4.10b: Modellierte Homogenbereiche im Zentralbereich, Modellschnitt ZB-O3  
(neuer Kenntnisstand)
- 
- Anlage 5.1: FE-Modell OF-O3: Gesamtdarstellung
- Anlage 5.2: FE-Modell OF-O3: Ausschnitt im Bereich der Abbaue
- Anlage 5.3: FE-Modell OF-O4: Gesamtdarstellung
- Anlage 5.4: FE-Modell OF-O4: Ausschnitt im Bereich der Abbaue

- Anlage 5.5: FE-Modell SF-N1: Gesamtdarstellung
- Anlage 5.6: FE-Modell SF-N1: Ausschnitt im Bereich der Abbaue
- Anlage 5.7: FE-Modell WF-H2: Gesamtdarstellung
- Anlage 5.8: FE-Modell WF-H2: Ausschnitt im Bereich der Abbaue 1n und 1s
- Anlage 5.9: FE-Modell WF-H2: Ausschnitt im Bereich des Kalilagers B
- Anlage 5.10: FE-Modell ZB-A2: Gesamtdarstellung
- Anlage 5.11: FE-Modell ZB-A2: Ausschnitt im Bereich der Abbaue
- Anlage 5.12: FE-Modell ZB-O3: Gesamtdarstellung
- Anlage 5.13: FE-Modell ZB-O3: Ausschnitt im Bereich der Abbaue
- 
- Anlage 6.1.1: OF-O3-A: Basismodell - Verformte Struktur nach 45 Jahren (Ausschnitt)
- Anlage 6.1.2: OF-O3-A: Basismodell - Verschiebungsvektoren nach 45 Jahren (Ausschnitt)
- Anlage 6.1.3: OF-O3-A: Basismodell - Kleinste Hauptdruckspannungen  $S_1$  nach 100 Jahren (Ausschnitt)
- Anlage 6.1.4: OF-O3-A: Basismodell - Größte Hauptdruckspannungen  $S_2$  nach 100 Jahren (Ausschnitt)
- Anlage 6.1.5: OF-O3-A: Basismodell - Effektivspannungen nach 100 Jahren (Ausschnitt)
- Anlage 6.1.6: OF-O3-A: Basismodell - Effektivverzerrungen nach 100 Jahren (Ausschnitt)
- Anlage 6.1.7: OF-O3-A: Basismodell - Dilatante Gebirgsbereiche nach 45 Jahren
- Anlage 6.1.8: OF-O3-A: Basismodell - Dilatante Gebirgsbereiche nach 100 Jahren
- Anlage 6.1.9: OF-O3-A: Basismodell - Differenz zwischen Laugendruck und kleinster Hauptdruckspannung nach 45 Jahren
- Anlage 6.1.10: OF-O3-A: Basismodell - Differenz zwischen Laugendruck und kleinster Hauptdruckspannung nach 100 Jahren
- Anlage 6.1.11: OF-O3-B: Ohne Pfeiler zwischen den Abbauen 1 und 4 - Dilatante Gebirgsbereiche nach 45 Jahren
- Anlage 6.1.12: OF-O3-B: Ohne Pfeiler zwischen den Abbauen 1 und 4 - Dilatante Gebirgsbereiche nach 100 Jahren
- Anlage 6.1.13: OF-O3-B: Ohne Pfeiler zwischen den Abbauen 1 und 4 - Differenz zwischen Laugendruck und kleinster Hauptdruckspannung nach 45 Jahren

- Anlage 6.1.14: OF-O3-B: Ohne Pfeiler zwischen den Abbauen 1 und 4 - Differenz zwischen Laugendruck und kleinster Hauptdruckspannung nach 100 Jahren
- Anlage 6.1.15: OF-O4-A: Anhydrit in der Firste des Abbaus 1 - Dilatante Gebirgsbereiche nach 45 Jahren
- Anlage 6.1.16: OF-O4-A: Anhydrit in der Firste des Abbaus 1 - Dilatante Gebirgsbereiche nach 100 Jahren
- Anlage 6.1.17: OF-O4-A: Anhydrit in der Firste des Abbaus 1 - Differenz zwischen Laugendruck und kleinster Hauptdruckspannung nach 45 Jahren
- Anlage 6.1.18: OF-O4-A: Anhydrit in der Firste des Abbaus 1 - Differenz zwischen Laugendruck und kleinster Hauptdruckspannung nach 100 Jahren
- Anlage 6.2.1: SF-N1-A: Basismodell - Verformte Struktur nach 59 Jahren (Ausschnitt)
- Anlage 6.2.2: SF-N1-A: Basismodell - Verschiebungsvektoren nach 59 Jahren (Ausschnitt)
- Anlage 6.2.3: SF-N1-A: Basismodell - Kleinste Hauptdruckspannungen  $S_1$  nach 100 Jahren (Ausschnitt)
- Anlage 6.2.4: SF-N1-A: Basismodell - Größte Hauptdruckspannungen  $S_2$  nach 100 Jahren (Ausschnitt)
- Anlage 6.2.5: SF-N1-A: Basismodell - Effektivspannungen nach 100 Jahren (Ausschnitt)
- Anlage 6.2.6: SF-N1-A: Basismodell - Effektivverzerrungen nach 100 Jahren (Ausschnitt)
- Anlage 6.2.7: SF-N1-A: Basismodell - Dilatante Gebirgsbereiche nach 59 Jahren
- Anlage 6.2.8: SF-N1-A: Basismodell - Dilatante Gebirgsbereiche nach 100 Jahren
- Anlage 6.2.9: SF-N1-A: Basismodell - Differenz zwischen Laugendruck und kleinster Hauptdruckspannung nach 59 Jahren
- Anlage 6.2.10: SF-N1-A: Basismodell - Differenz zwischen Laugendruck und kleinster Hauptdruckspannung nach 100 Jahren
- Anlage 6.2.11: SF-N1-B: Höhere Duktilität der Homogenbereiche z2(West) und z2HS(Ost) - Dilatante Gebirgsbereiche nach 59 Jahren
- Anlage 6.2.12: SF-N1-B: Höhere Duktilität der Homogenbereiche z2(West) und z2HS(Ost) - Dilatante Gebirgsbereiche nach 100 Jahren
- Anlage 6.2.13: SF-N1-B: Höhere Duktilität der Homogenbereiche z2(West) und z2HS(Ost) - Differenz zwischen Laugendruck und kleinster Hauptdruckspannung nach 59 Jahren

- Anlage 6.2.14: SF-N1-B: Höhere Duktilität der Homogenbereiche  $z_2$ (West) und  $z_2$ HS(Ost)  
- Differenz zwischen Laugendruck und kleinster Hauptdruckspannung nach 100 Jahren
- Anlage 6.2.15: SF-N1-C: Steiferes Deckgebirge - Dilatante Gebirgsbereiche nach 59 Jahren
- Anlage 6.2.16: SF-N1-C: Steiferes Deckgebirge - Dilatante Gebirgsbereiche nach 100 Jahren
- Anlage 6.2.17: SF-N1-C: Steiferes Deckgebirge - Differenz zwischen Laugendruck und kleinster Hauptdruckspannung nach 59 Jahren
- Anlage 6.2.18: SF-N1-C: Steiferes Deckgebirge - Differenz zwischen Laugendruck und kleinster Hauptdruckspannung nach 100 Jahren
- Anlage 6.3.1a: WF-H2-A: Basismodell - Verformte Struktur nach 72 Jahren (Ausschnitt 1)
- Anlage 6.3.1b: WF-H2-A: Basismodell - Verformte Struktur nach 72 Jahren (Ausschnitt 2)
- Anlage 6.3.2a: WF-H2-A: Basismodell - Verschiebungsvektoren nach 72 Jahren (Ausschnitt 1)
- Anlage 6.3.2b: WF-H2-A: Basismodell - Verschiebungsvektoren nach 72 Jahren (Ausschnitt 2)
- Anlage 6.3.3a: WF-H2-A: Basismodell - Kleinste Hauptdruckspannungen  $S_1$  nach 100 Jahren (Ausschnitt 1)
- Anlage 6.3.3b: WF-H2-A: Basismodell - Kleinste Hauptdruckspannungen  $S_1$  nach 100 Jahren (Ausschnitt 2)
- Anlage 6.3.4a: WF-H2-A: Basismodell - Größte Hauptdruckspannungen  $S_2$  nach 100 Jahren (Ausschnitt 1)
- Anlage 6.3.4b: WF-H2-A: Basismodell - Größte Hauptdruckspannungen  $S_2$  nach 100 Jahren (Ausschnitt 2)
- Anlage 6.3.5a: WF-H2-A: Basismodell - Effektivspannungen nach 100 Jahren (Ausschnitt 1)
- Anlage 6.3.5b: WF-H2-A: Basismodell - Effektivspannungen nach 100 Jahren (Ausschnitt 2)
- Anlage 6.3.6a: WF-H2-A: Basismodell - Effektivverzerrungen nach 100 Jahren (Ausschnitt 1)
- Anlage 6.3.6b: WF-H2-A: Basismodell - Effektivverzerrungen nach 100 Jahren (Ausschnitt 2)
- Anlage 6.3.7: WF-H2-A: Basismodell - Dilatante Gebirgsbereiche nach 72 Jahren
- Anlage 6.3.8: WF-H2-A: Basismodell - Dilatante Gebirgsbereiche nach 100 Jahren

- Anlage 6.3.9: WF-H2-A: Basismodell - Differenz zwischen Laugendruck und kleinster Hauptdruckspannung nach 72 Jahren
- Anlage 6.3.10: WF-H2-A: Basismodell - Differenz zwischen Laugendruck und kleinster Hauptdruckspannung nach 100 Jahren
- Anlage 6.3.11: WF-H2-B: Steiferer Versatz im Kalilager B ( $E = 3500 \text{ MPa}$ ) - Dilatante Gebirgsbereiche nach 72 Jahren
- Anlage 6.3.12: WF-H2-B: Steiferer Versatz im Kalilager B ( $E = 3500 \text{ MPa}$ ) - Dilatante Gebirgsbereiche nach 100 Jahren
- Anlage 6.3.13: WF-H2-B: Steiferer Versatz im Kalilager B ( $E = 3500 \text{ MPa}$ ) - Differenz zwischen Laugendruck und kleinster Hauptdruckspannung nach 72 Jahren
- Anlage 6.3.14: WF-H2-B: Steiferer Versatz im Kalilager B ( $E = 3500 \text{ MPa}$ ) - Differenz zwischen Laugendruck und kleinster Hauptdruckspannung nach 100 Jahren
- Anlage 6.3.15: WF-H2-C: Ohne Pfeiler zwischen den Abbauen 1n und 1s - Dilatante Gebirgsbereiche nach 72 Jahren
- Anlage 6.3.16: WF-H2-C: Ohne Pfeiler zwischen den Abbauen 1n und 1s - Dilatante Gebirgsbereiche nach 100 Jahren
- Anlage 6.3.17: WF-H2-C: Ohne Pfeiler zwischen den Abbauen 1n und 1s - Differenz zwischen Laugendruck und kleinster Hauptdruckspannung nach 72 Jahren
- Anlage 6.3.18: WF-H2-C: Ohne Pfeiler zwischen den Abbauen 1n und 1s - Differenz zwischen Laugendruck und kleinster Hauptdruckspannung nach 100 Jahren
- Anlage 6.4.1: ZB-A2-B: Basismodell - Verformte Struktur nach 60 Jahren (Ausschnitt)
- Anlage 6.4.2: ZB-A2-B: Basismodell - Verschiebungsvektoren nach 60 Jahren (Ausschnitt)
- Anlage 6.4.3: ZB-A2-B: Basismodell - Kleinste Hauptdruckspannungen  $S_1$  nach 100 Jahren (Ausschnitt)
- Anlage 6.4.4: ZB-A2-B: Basismodell - Größte Hauptdruckspannungen  $S_2$  nach 100 Jahren (Ausschnitt)
- Anlage 6.4.5: ZB-A2-B: Basismodell - Effektivspannungen nach 100 Jahren (Ausschnitt)
- Anlage 6.4.6: ZB-A2-B: Basismodell - Effektivverzerrungen nach 100 Jahren (Ausschnitt)
- Anlage 6.4.7: ZB-A2-B: Basismodell - Dilatante Gebirgsbereiche nach 60 Jahren
- Anlage 6.4.8: ZB-A2-B: Basismodell - Dilatante Gebirgsbereiche nach 100 Jahren
- Anlage 6.4.9: ZB-A2-B: Basismodell - Differenz zwischen Laugendruck und kleinster Hauptdruckspannung nach 60 Jahren
- Anlage 6.4.10: ZB-A2-B: Basismodell - Differenz zwischen Laugendruck und kleinster Hauptdruckspannung nach 100 Jahren

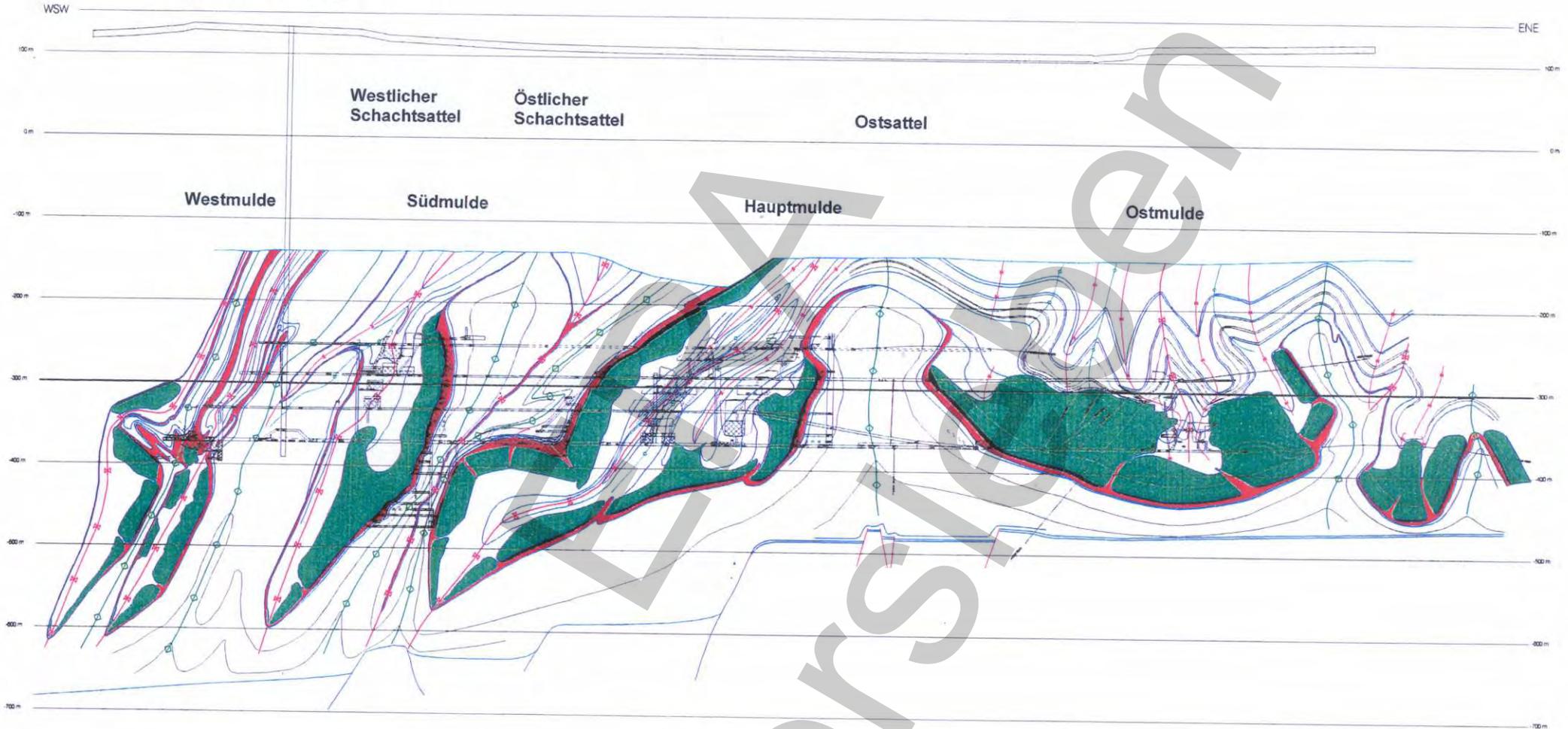
- Anlage 6.4.11: ZB-A2-C: Verfüllung aller Abbaue 60 Jahre nach Ausbruch (Versatz:  $E = 17,5 \text{ MPa}$ ) - Momentane Überschreitung der Dilatanzgrenze zum Zeitpunkt 60 Jahre
- Anlage 6.4.12: ZB-A2-C: Verfüllung aller Abbaue 60 Jahre nach Ausbruch (Versatz:  $E = 17,5 \text{ MPa}$ ) - Momentane Überschreitung der Dilatanzgrenze zum Zeitpunkt 100 Jahre
- Anlage 6.4.13: ZB-A2-C: Verfüllung aller Abbaue 60 Jahre nach Ausbruch (Versatz:  $E = 17,5 \text{ MPa}$ ) - Momentane Überschreitung der Dilatanzgrenze zum Zeitpunkt 160 Jahre
- Anlage 6.4.14: ZB-A2-C: Verfüllung aller Abbaue 60 Jahre nach Ausbruch (Versatz:  $E = 17,5 \text{ MPa}$ ) - Differenz zwischen Laugendruck und kleinster Hauptdruckspannung nach 100 Jahren
- Anlage 6.4.15: ZB-A2-C: Verfüllung aller Abbaue 60 Jahre nach Ausbruch (Versatz:  $E = 17,5 \text{ MPa}$ ) - Differenz zwischen Laugendruck und kleinster Hauptdruckspannung nach 160 Jahren
- Anlage 6.4.16: ZB-A2-E: Verfüllung aller Abbaue 60 Jahre nach Ausbruch (Versatz:  $E = 3,5 \text{ GPa}$ ) - Momentane Überschreitung der Dilatanzgrenze zum Zeitpunkt 60 Jahre
- Anlage 6.4.17: ZB-A2-E: Verfüllung aller Abbaue 60 Jahre nach Ausbruch (Versatz:  $E = 3,5 \text{ GPa}$ ) - Momentane Überschreitung der Dilatanzgrenze zum Zeitpunkt 64 Jahre
- Anlage 6.4.18: ZB-A2-E: Verfüllung aller Abbaue 60 Jahre nach Ausbruch (Versatz:  $E = 3,5 \text{ GPa}$ ) - Momentane Überschreitung der Dilatanzgrenze zum Zeitpunkt 80 Jahre
- Anlage 6.4.19: ZB-A2-E: Verfüllung aller Abbaue 60 Jahre nach Ausbruch (Versatz:  $E = 3,5 \text{ GPa}$ ) - Differenz zwischen Laugendruck und kleinster Hauptdruckspannung nach 100 Jahren
- Anlage 6.4.20: ZB-A2-E: Verfüllung aller Abbaue 60 Jahre nach Ausbruch (Versatz:  $E = 3,5 \text{ GPa}$ ) - Differenz zwischen Laugendruck und kleinster Hauptdruckspannung nach 160 Jahren
- Anlage 6.4.21: ZB-O3-P: Basismodell - Verformte Struktur nach 60 Jahren (Ausschnitt)
- Anlage 6.4.22: ZB-O3-P: Basismodell - Verschiebungsvektoren nach 60 Jahren (Ausschnitt)
- Anlage 6.4.23: ZB-O3-P: Basismodell - Kleinste Hauptdruckspannungen  $S_1$  nach 100 Jahren (Ausschnitt)
- Anlage 6.4.24: ZB-O3-P: Basismodell - Größte Hauptdruckspannungen  $S_2$  nach 100 Jahren (Ausschnitt)
- Anlage 6.4.25: ZB-O3-P: Basismodell - Effektivspannungen nach 100 Jahren

(Ausschnitt)

- Anlage 6.4.26: ZB-O3-P: Basismodell - Effektivverzerrungen nach 100 Jahren  
(Ausschnitt)
- Anlage 6.4.27: ZB-O3-P: Basismodell - Dilatante Gebirgsbereiche nach 60 Jahren
- Anlage 6.4.28: ZB-O3-P: Basismodell - Dilatante Gebirgsbereiche nach 100 Jahren
- Anlage 6.4.29: ZB-O3-P: Basismodell - Differenz zwischen Laugendruck und kleinster Hauptdruckspannung nach 60 Jahren
- Anlage 6.4.30: ZB-O3-P: Basismodell - Differenz zwischen Laugendruck und kleinster Hauptdruckspannung nach 100 Jahren
- Anlage 6.4.31: ZB-O3-Q: Verfüllung aller Abbaue 60 Jahre nach Ausbruch (Versatz:  $E = 17,5 \text{ MPa}$ ) - Momentane Überschreitung der Dilatanzgrenze zum Zeitpunkt 60 Jahre
- Anlage 6.4.32: ZB-O3-Q: Verfüllung aller Abbaue 60 Jahre nach Ausbruch (Versatz:  $E = 17,5 \text{ MPa}$ ) - Momentane Überschreitung der Dilatanzgrenze zum Zeitpunkt 100 Jahre
- Anlage 6.4.33: ZB-O3-Q: Verfüllung aller Abbaue 60 Jahre nach Ausbruch (Versatz:  $E = 17,5 \text{ MPa}$ ) - Momentane Überschreitung der Dilatanzgrenze zum Zeitpunkt 160 Jahre
- Anlage 6.4.34: ZB-O3-Q: Verfüllung aller Abbaue 60 Jahre nach Ausbruch (Versatz:  $E = 17,5 \text{ MPa}$ ) - Differenz zwischen Laugendruck und kleinster Hauptdruckspannung nach 100 Jahren
- Anlage 6.4.35: ZB-O3-Q: Verfüllung aller Abbaue 60 Jahre nach Ausbruch (Versatz:  $E = 17,5 \text{ MPa}$ ) - Differenz zwischen Laugendruck und kleinster Hauptdruckspannung nach 160 Jahren
- Anlage 6.4.36: ZB-O3-S: Verfüllung aller Abbaue 60 Jahre nach Ausbruch (Versatz:  $E = 3,5 \text{ GPa}$ ) - Momentane Überschreitung der Dilatanzgrenze zum Zeitpunkt 60 Jahre
- Anlage 6.4.37: ZB-O3-S: Verfüllung aller Abbaue 60 Jahre nach Ausbruch (Versatz:  $E = 3,5 \text{ GPa}$ ) - Momentane Überschreitung der Dilatanzgrenze zum Zeitpunkt 64 Jahre
- Anlage 6.4.38: ZB-O3-S: Verfüllung aller Abbaue 60 Jahre nach Ausbruch (Versatz:  $E = 3,5 \text{ GPa}$ ) - Momentane Überschreitung der Dilatanzgrenze zum Zeitpunkt 80 Jahre
- Anlage 6.4.39: ZB-O3-S: Verfüllung aller Abbaue 60 Jahre nach Ausbruch (Versatz:  $E = 3,5 \text{ GPa}$ ) - Differenz zwischen Laugendruck und kleinster Hauptdruckspannung nach 100 Jahren

- Anlage 6.4.40: ZB-O3-S: Verfüllung aller Abbaue 60 Jahre nach Ausbruch (Versatz:  $E = 3,5 \text{ GPa}$ ) - Differenz zwischen Laugendruck und kleinster Hauptdruckspannung nach 160 Jahren
- Anlage 6.4.41: ZB-O3-1: Aufteilung des Homogenbereichs z2HS - Dilatante Gebirgsbereiche nach 60 Jahren
- Anlage 6.4.42: ZB-O3-1: Aufteilung des Homogenbereichs z2HS - Dilatante Gebirgsbereiche nach 100 Jahren
- Anlage 6.4.43: ZB-O3-1: Aufteilung des Homogenbereichs z2HS - Differenz zwischen Laugendruck und kleinster Hauptdruckspannung nach 60 Jahren
- Anlage 6.4.44: ZB-O3-1: Aufteilung des Homogenbereichs z2HS - Differenz zwischen Laugendruck und kleinster Hauptdruckspannung nach 100 Jahren
- Anlage 7.1: ZB-A2-B: Basismodell - Pfad eines möglichen Lösungszutritts im Schnitt ZB-A2
- Anlage 7.2: ZB-O3-P: Basismodell - Pfade möglicher Lösungszutritte im Schnitt ZB-O3
- Anlage 7.3: Lage der Konvergenzmesstationen im Zentralbereich Bartensleben nördlich der Hauptquerschläge
- Anlage 7.4: Geologisches Profil 1.2, Südostfeld (BGR 1997)
- Anlage 7.5: Geologisches Profil 1.3, Südostfeld (BGR 1997)
- Anlage 7.6: Geologisches Profil 1.4, Südostfeld (BGR 1997)
- Anlage 7.7: Geologisches Profil 5, Nordfeld (BGR 1997)
- Anlage 7.8: Geologisches Profil 5.1, Nordfeld (BGR 1997)

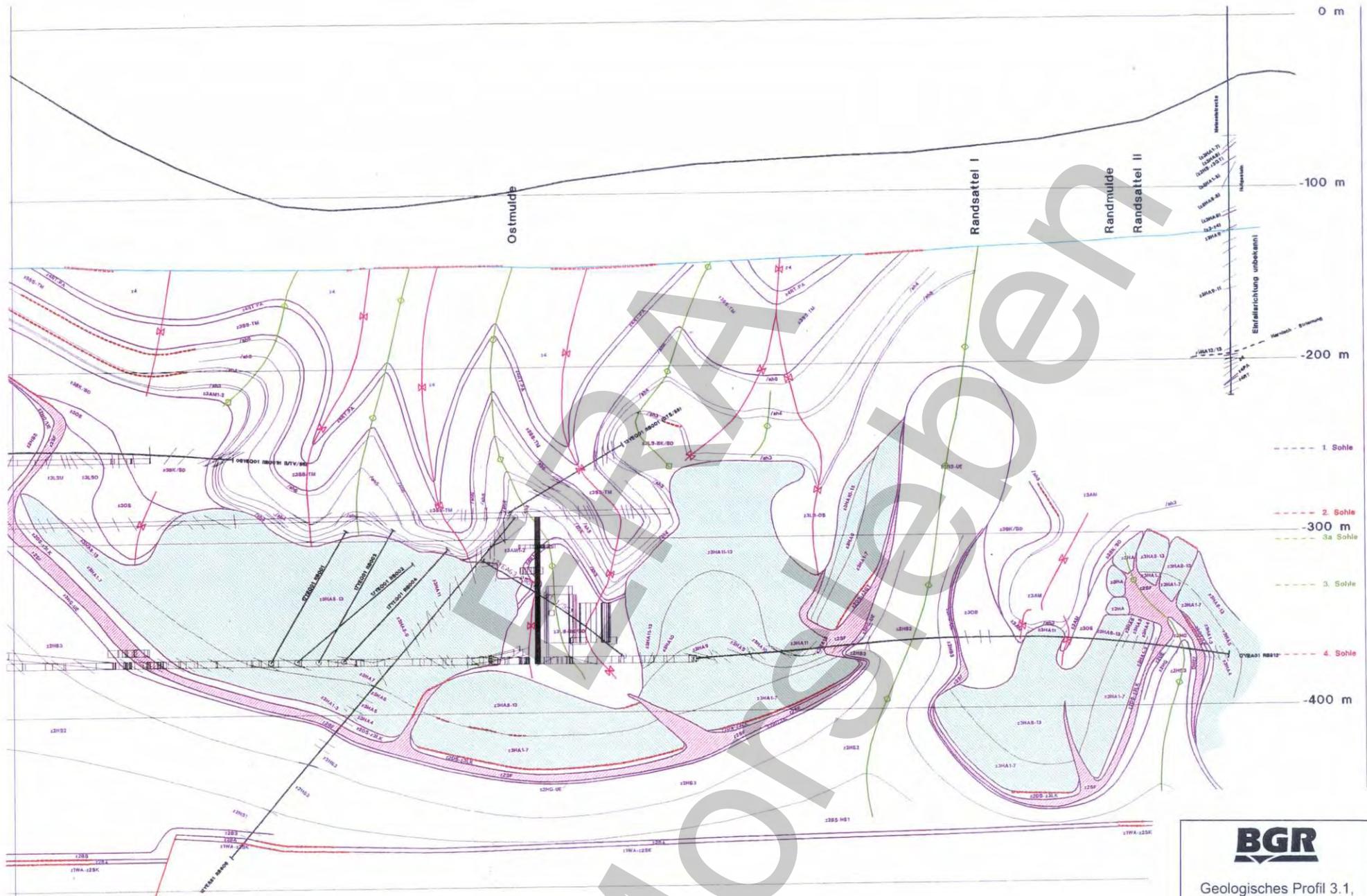
Schacht Bartensleben



**BGR**

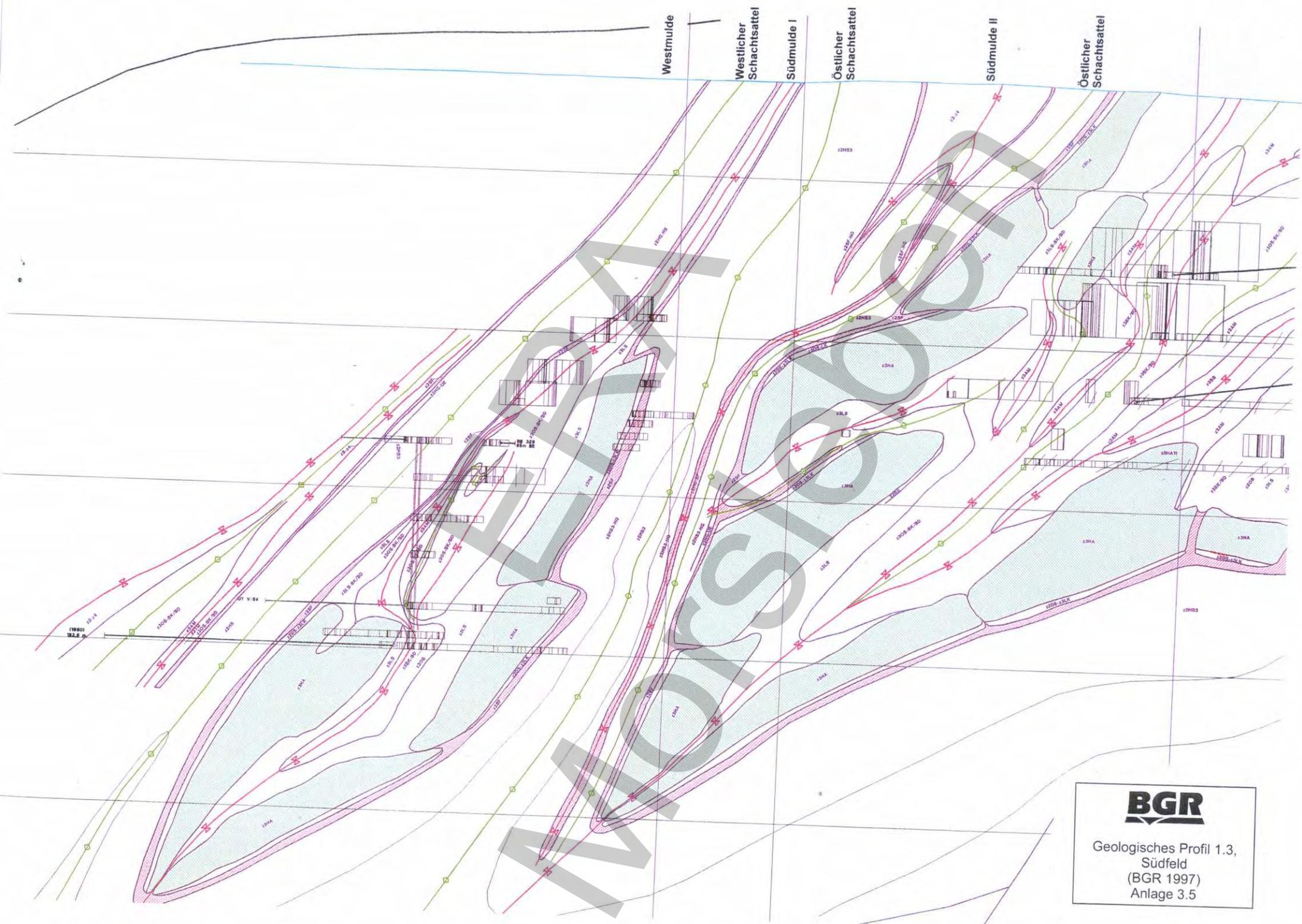
Geologisches Profil 3.1,  
durch die Schachtanlage  
Bartensleben  
(BGR 1997)  
Anlage 3.1





**BGR**  
 Geologisches Profil 3.1,  
 Ostfeld  
 (BGR 1997)  
 Anlage 3.3





**BGR**  
 Geologisches Profil 1.3,  
 Südfeld  
 (BGR 1997)  
 Anlage 3.5



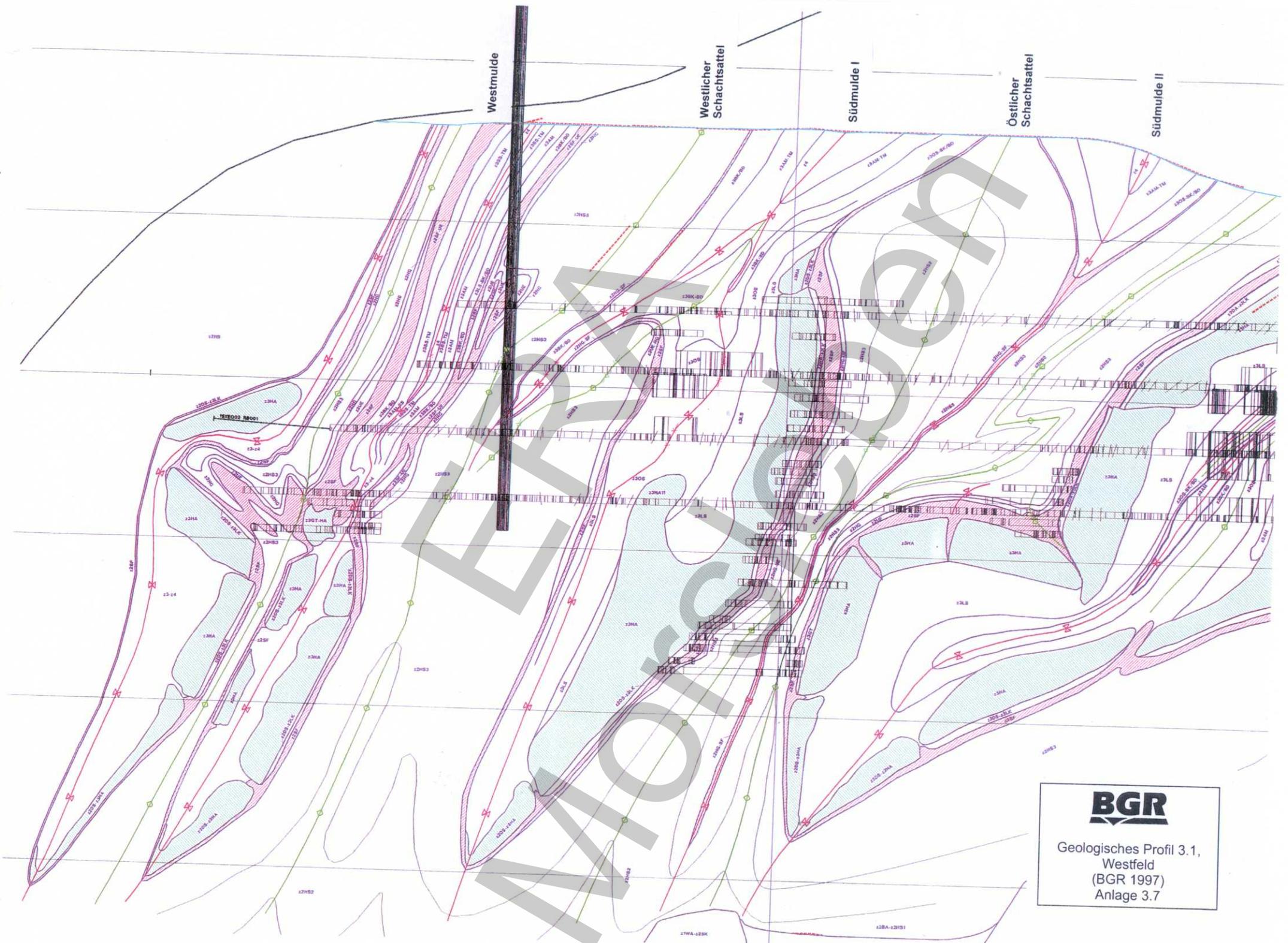
Westmulde

Westlicher  
Schachtsattel

Südmulde I

Östlicher  
Schachtsattel

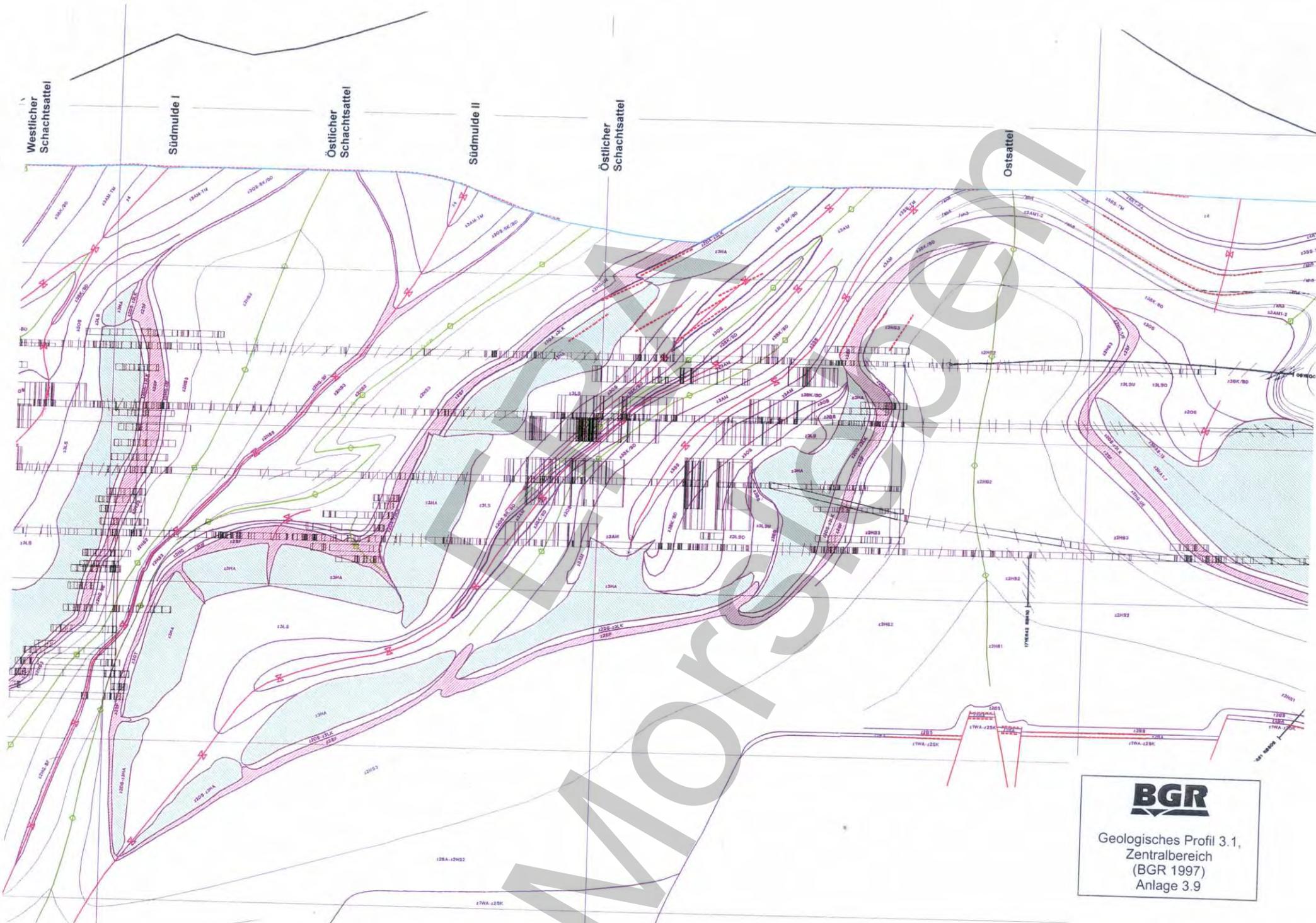
Südmulde II



**BGR**

Geologisches Profil 3.1,  
Westfeld  
(BGR 1997)  
Anlage 3.7





**BGR**  
 Geologisches Profil 3.1,  
 Zentralbereich  
 (BGR 1997)  
 Anlage 3.9

Südmulde I

Östlicher  
Schachtsattel

Südmulde II

Östlicher  
Schachtsattel

Hauptmulde

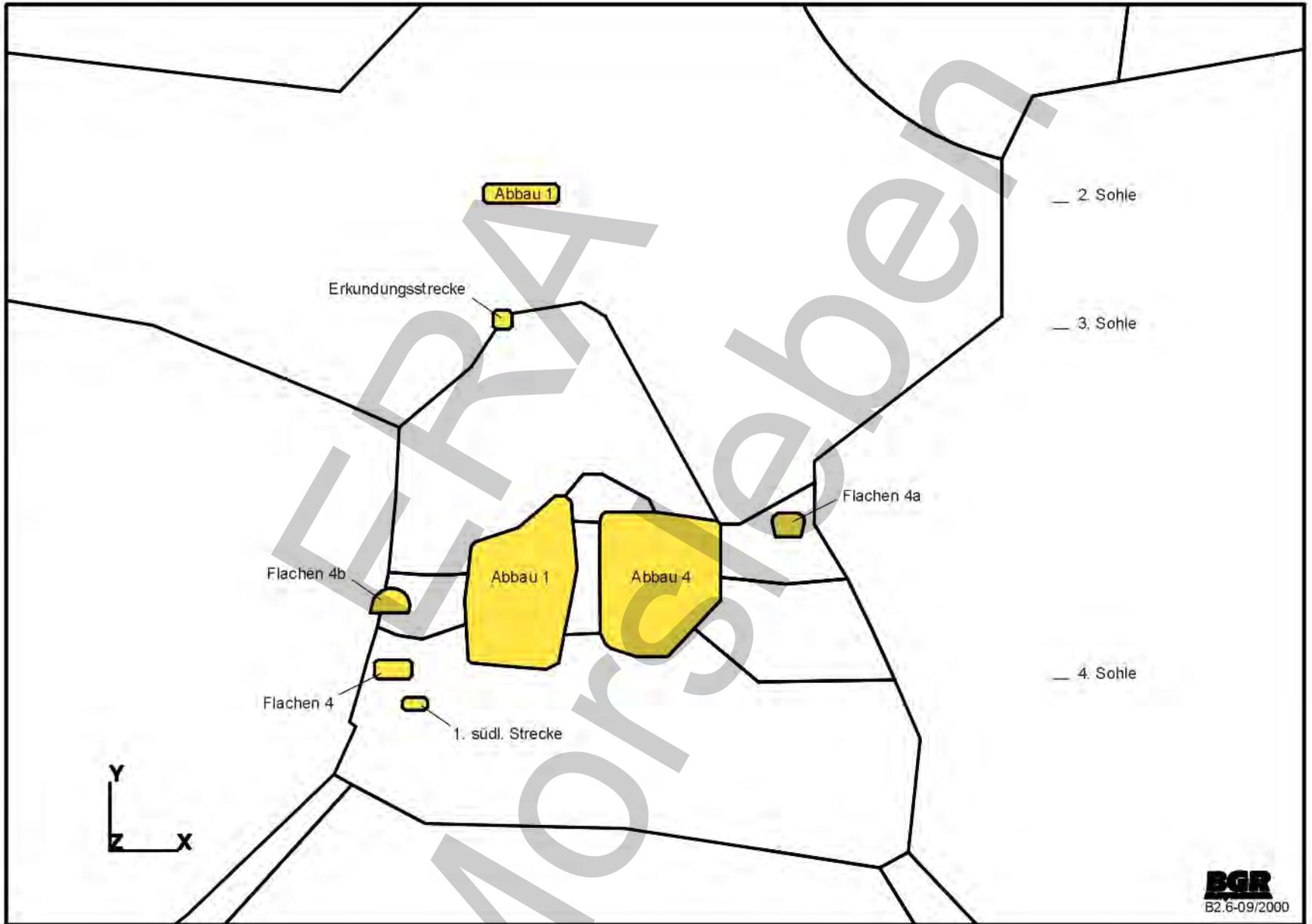
Ostfussattel



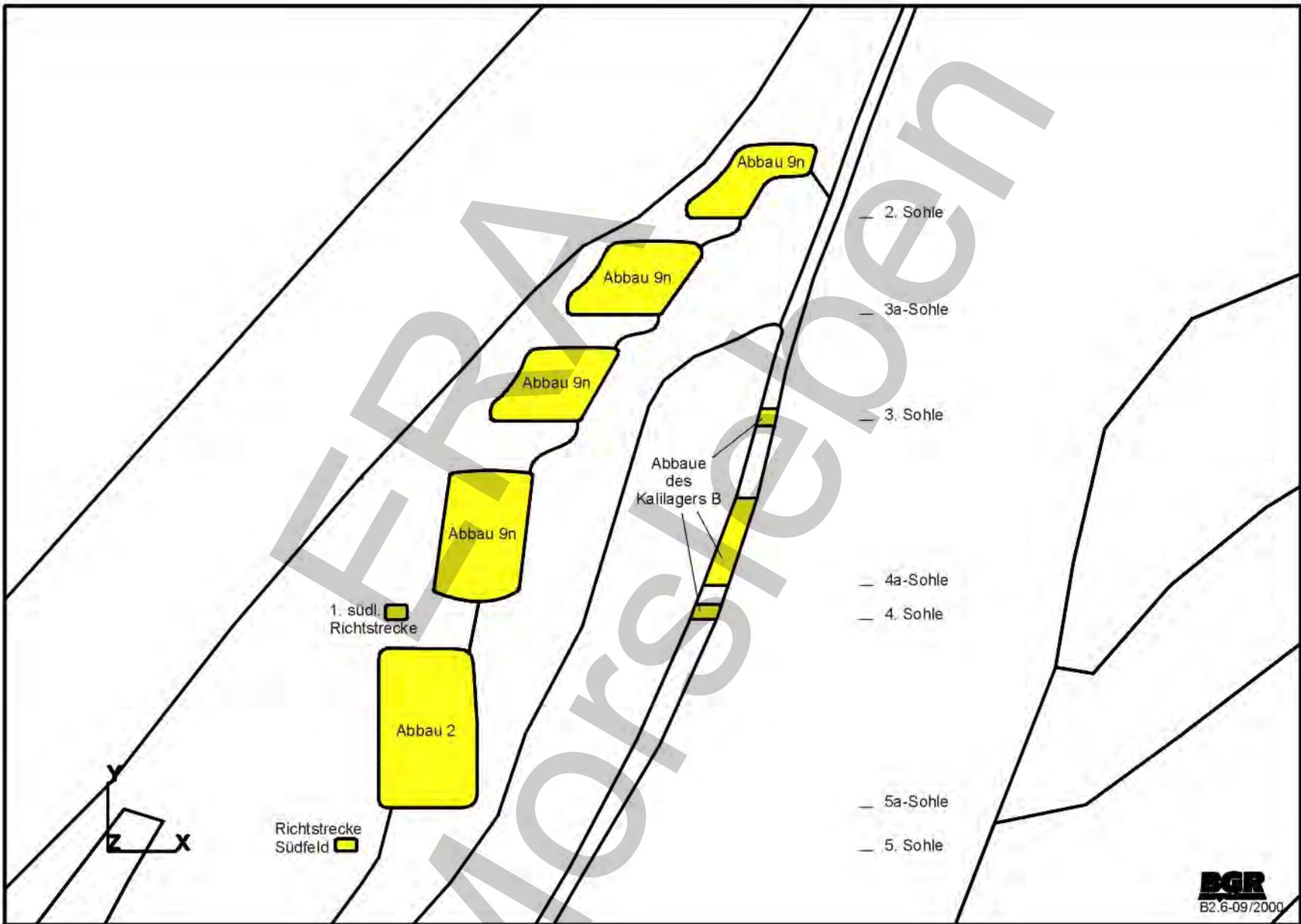
**BGR**

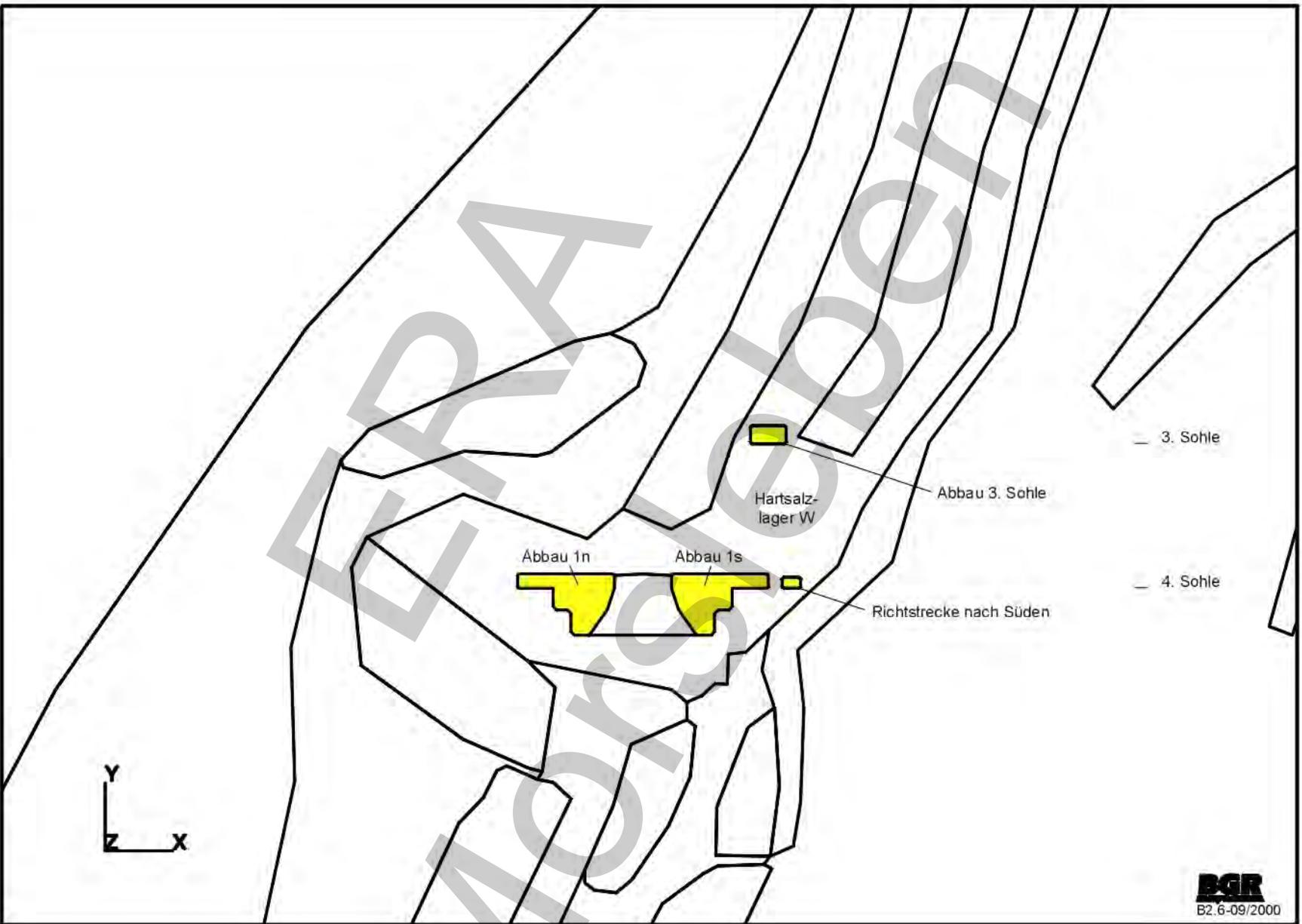
Geologisches Profil 3.3,  
Zentralbereich  
(BGR 1997)  
Anlage 3.10

Modellierte Abbaue und Strecken im Ostfeld

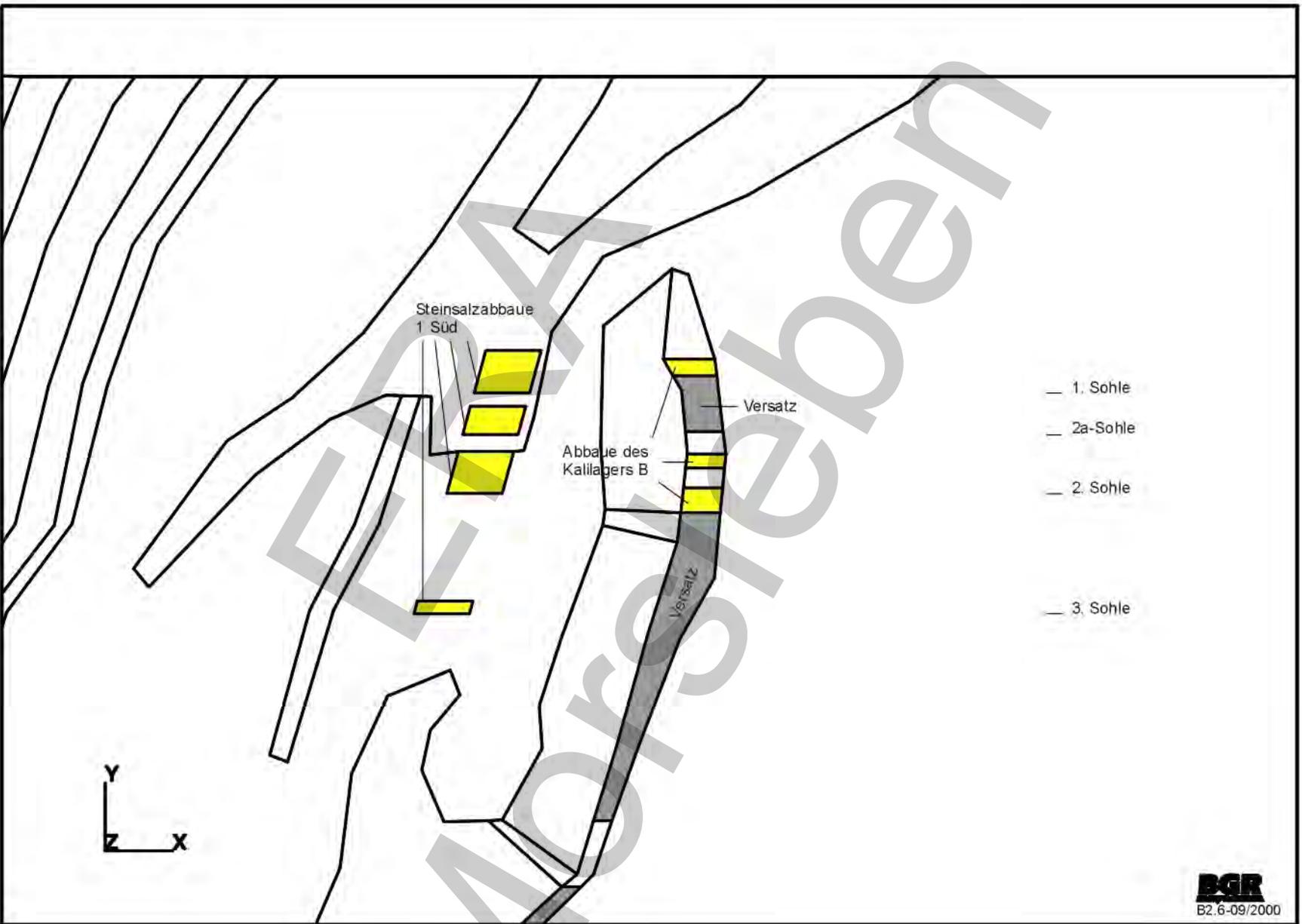


Modellierte Abbaue und Strecken im Südfeld

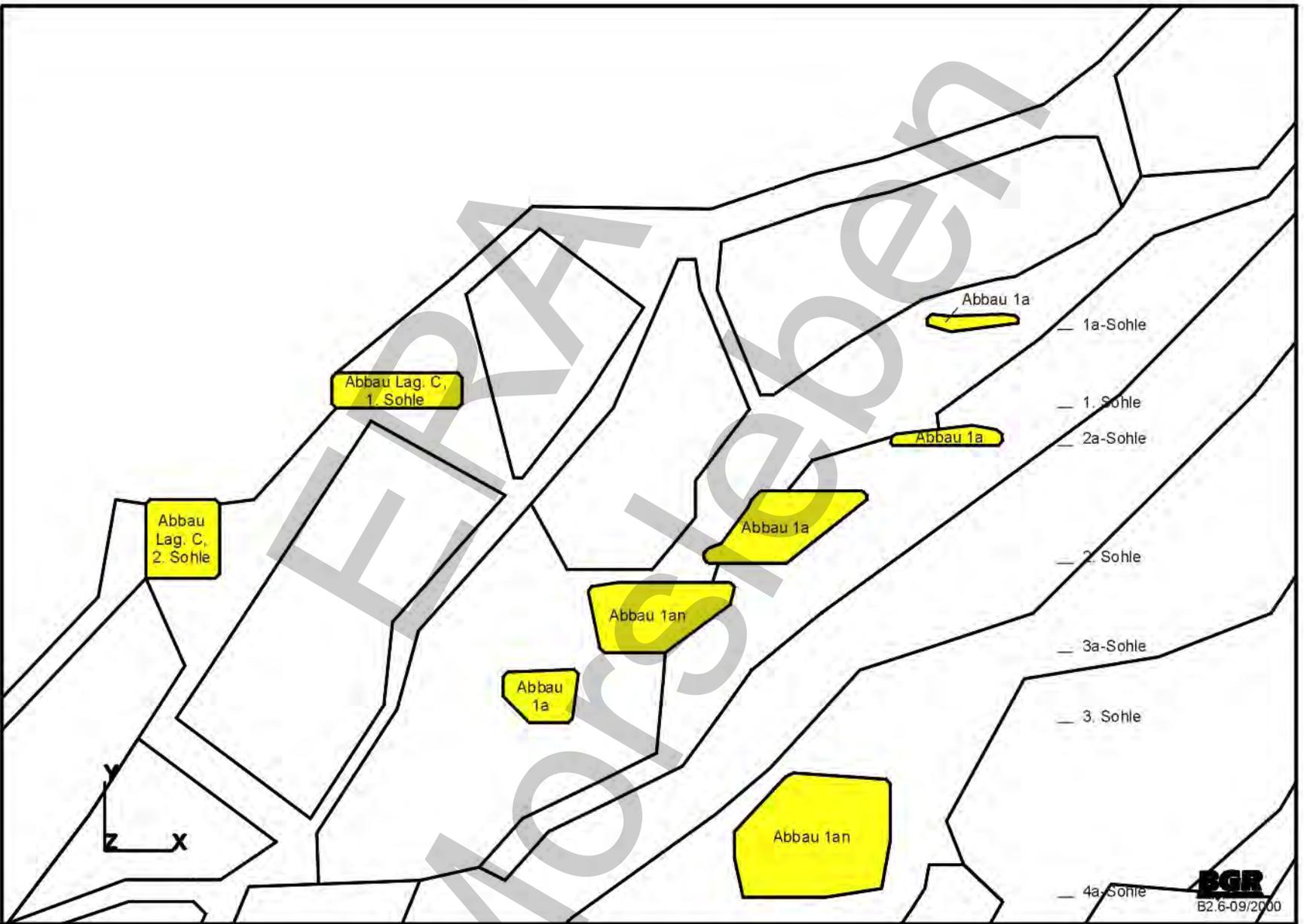




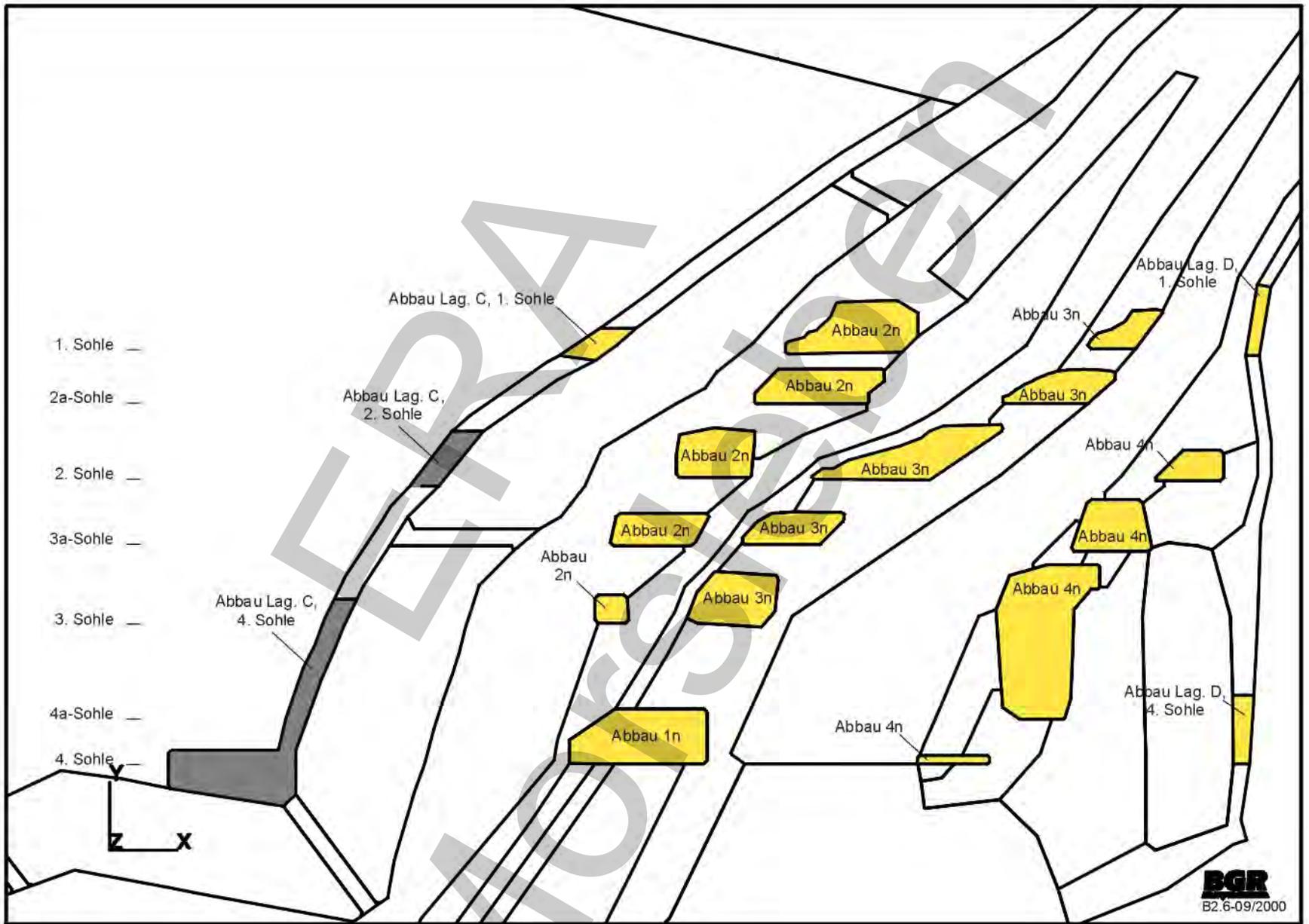
Modellierte Abbaue und Strecken im Westfeld (Ausschnitt 1)



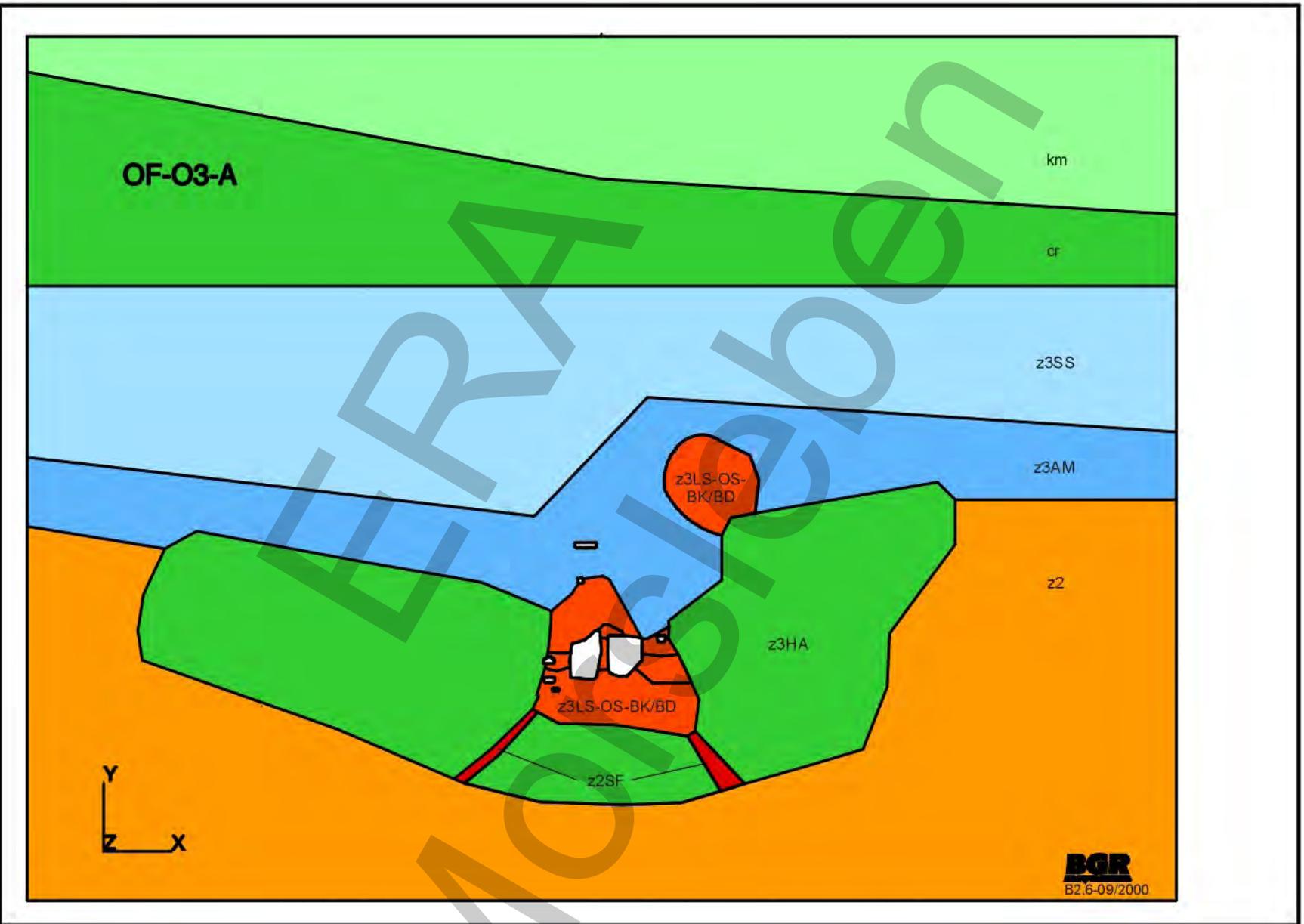
Modellierte Abbaue und Strecken im Westfeld (Ausschnitt 2)



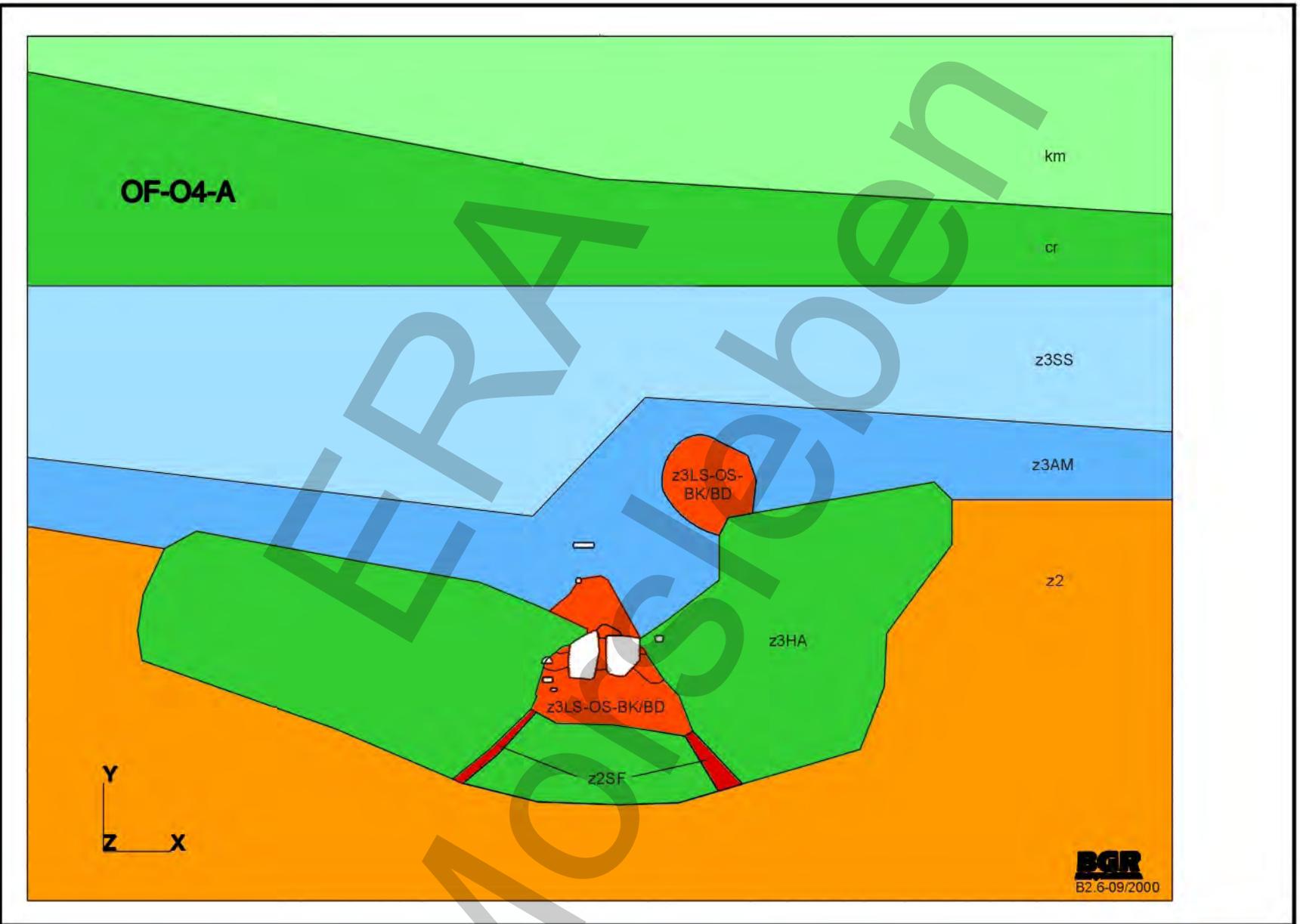
Modellierte Abbaue und Strecken im Zentralbereich,  
 Modellschnitt ZB-A2 (Abbaureihe 1)



Modellierte Abbaue und Strecken im Zentralbereich,  
 Modellschnitt ZB-O3 (Abbaureihen 2, 3 und 4)

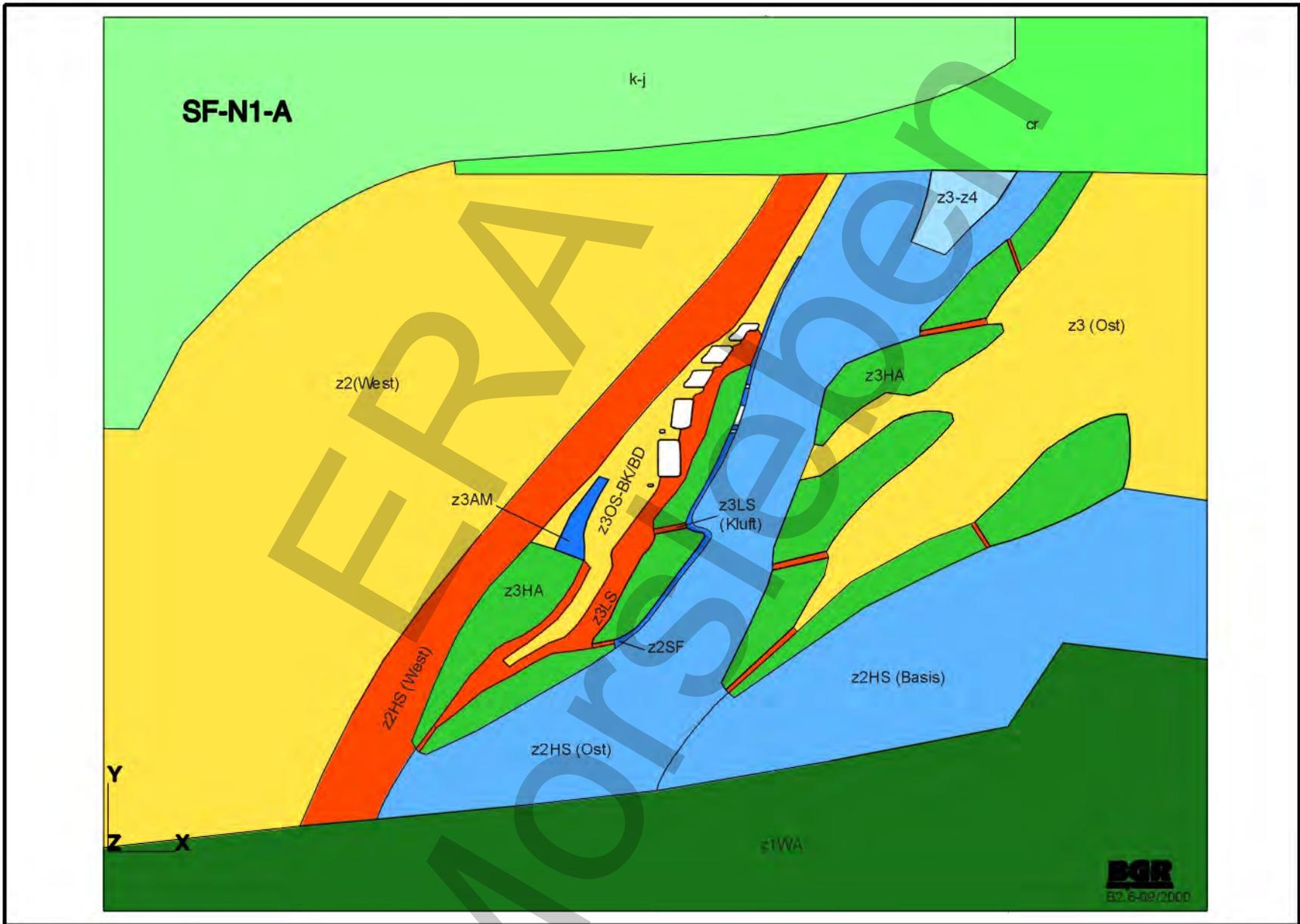


Modellierte Homogenbereiche im Ostfeld (alter Kenntnisstand)

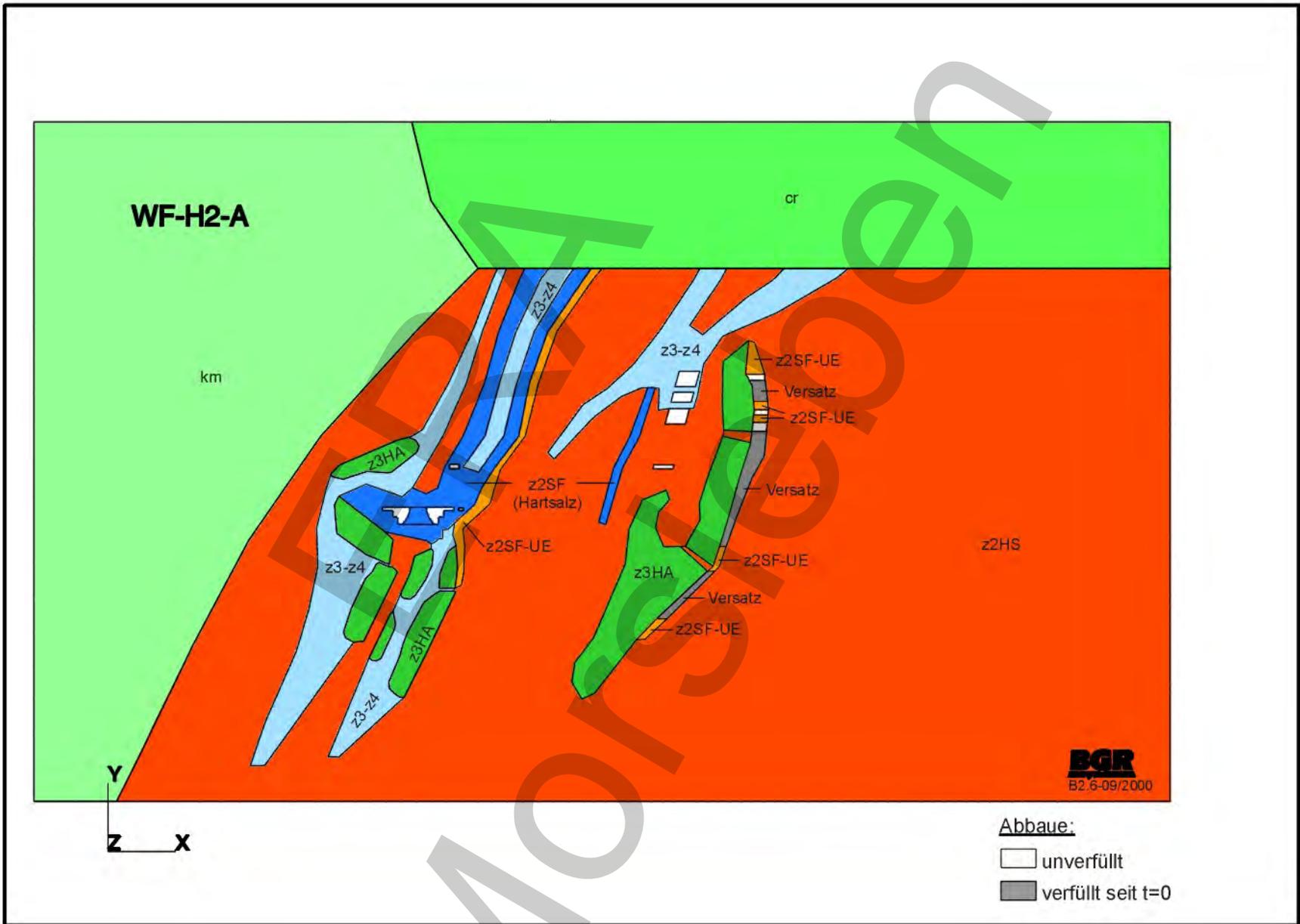


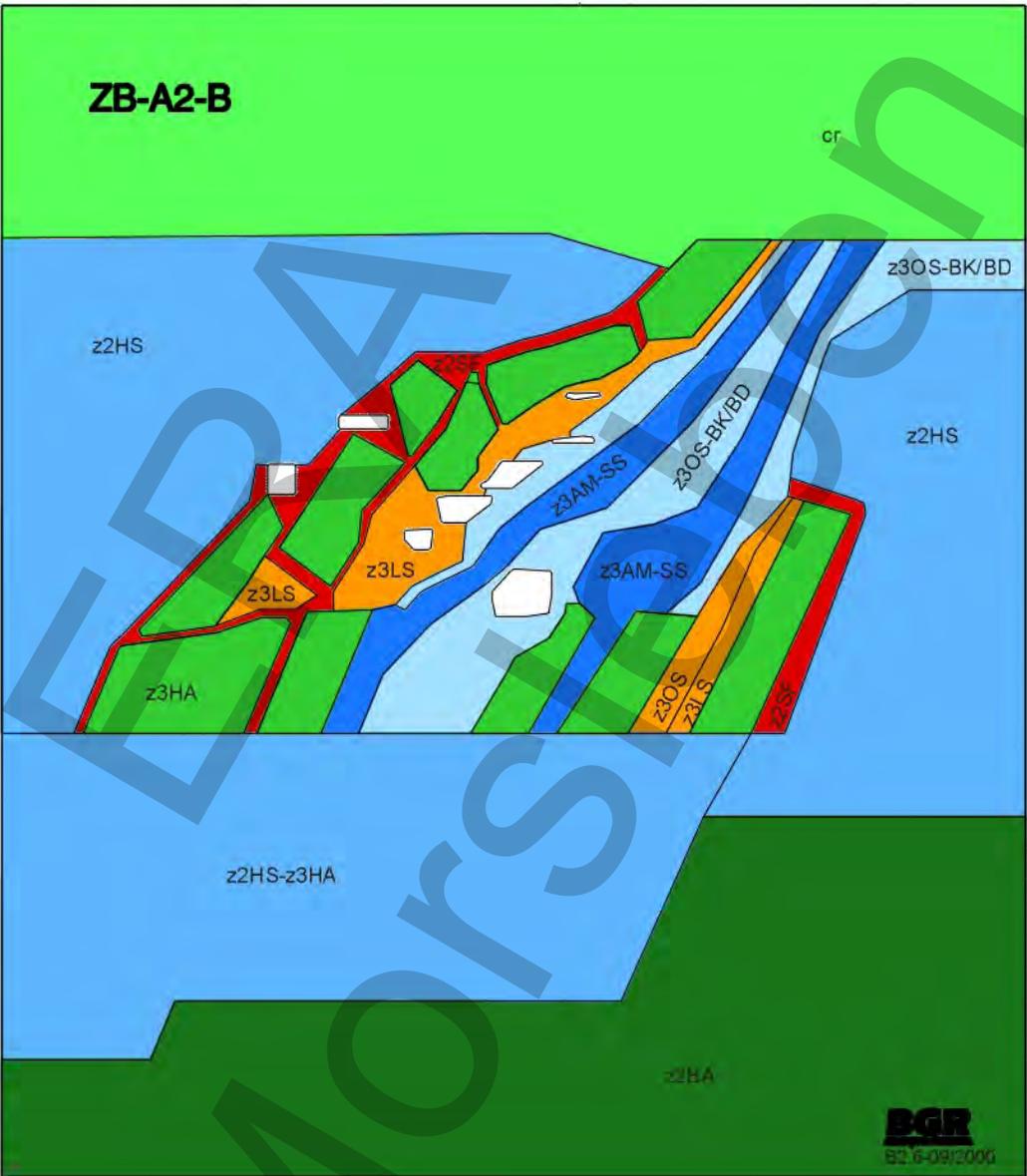
Modellierte Homogenbereiche im Ostfeld (neuer Kenntnisstand)

Modellierte Homogenbereiche im Südfeld



Modellierte Homogenbereiche im Westfeld





Modellierte Homogenbereiche im Zentralbereich, Modellschnitt ZB-A2

**Abbaue:**  
 □ unverfüllt  
 □ verfüllt seit t=0

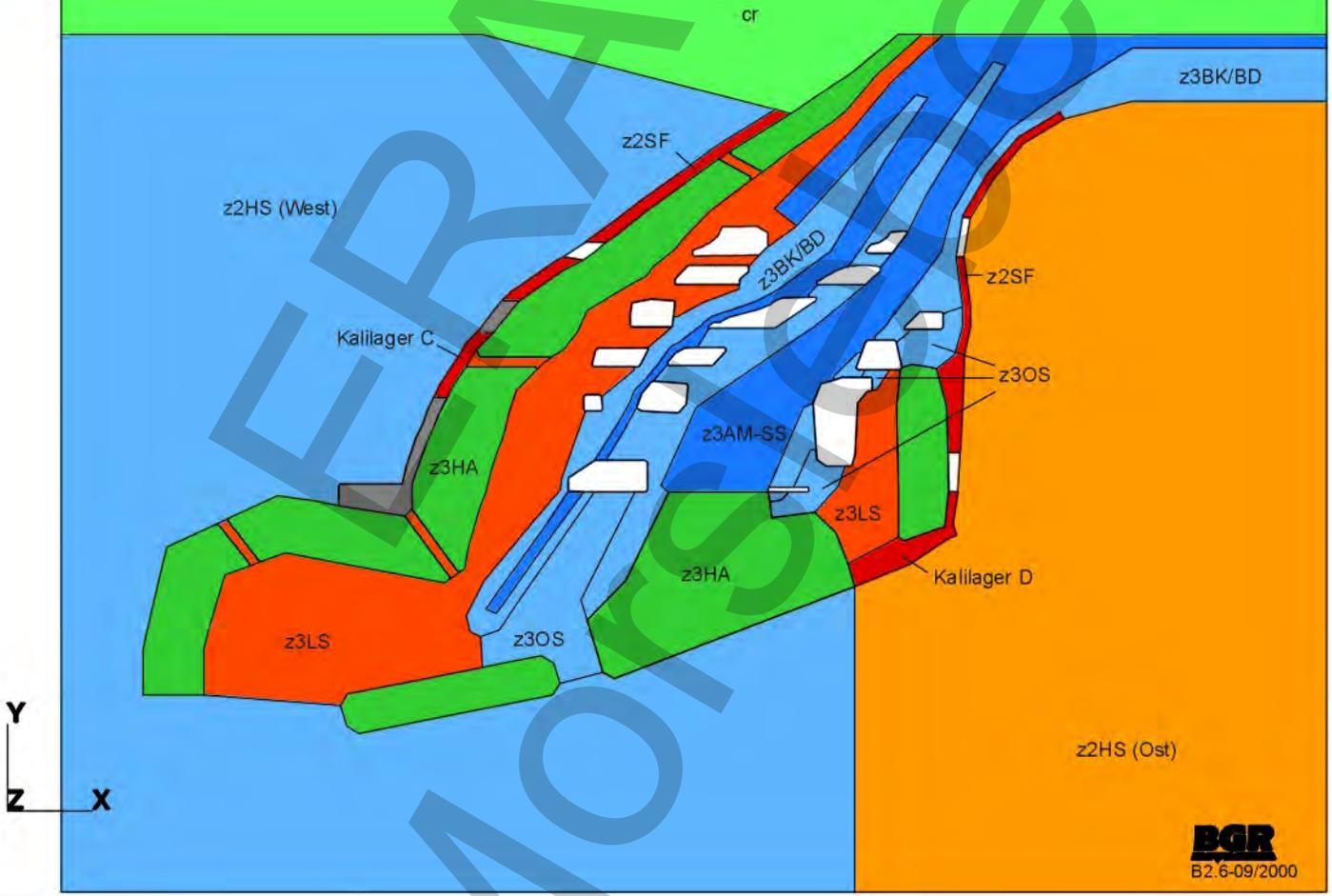
**ZB-O3-P3**



Modellierte Homogenbereiche im Zentralbereich, Modellschnitt ZB-O3  
 (alter Kenntnisstand)

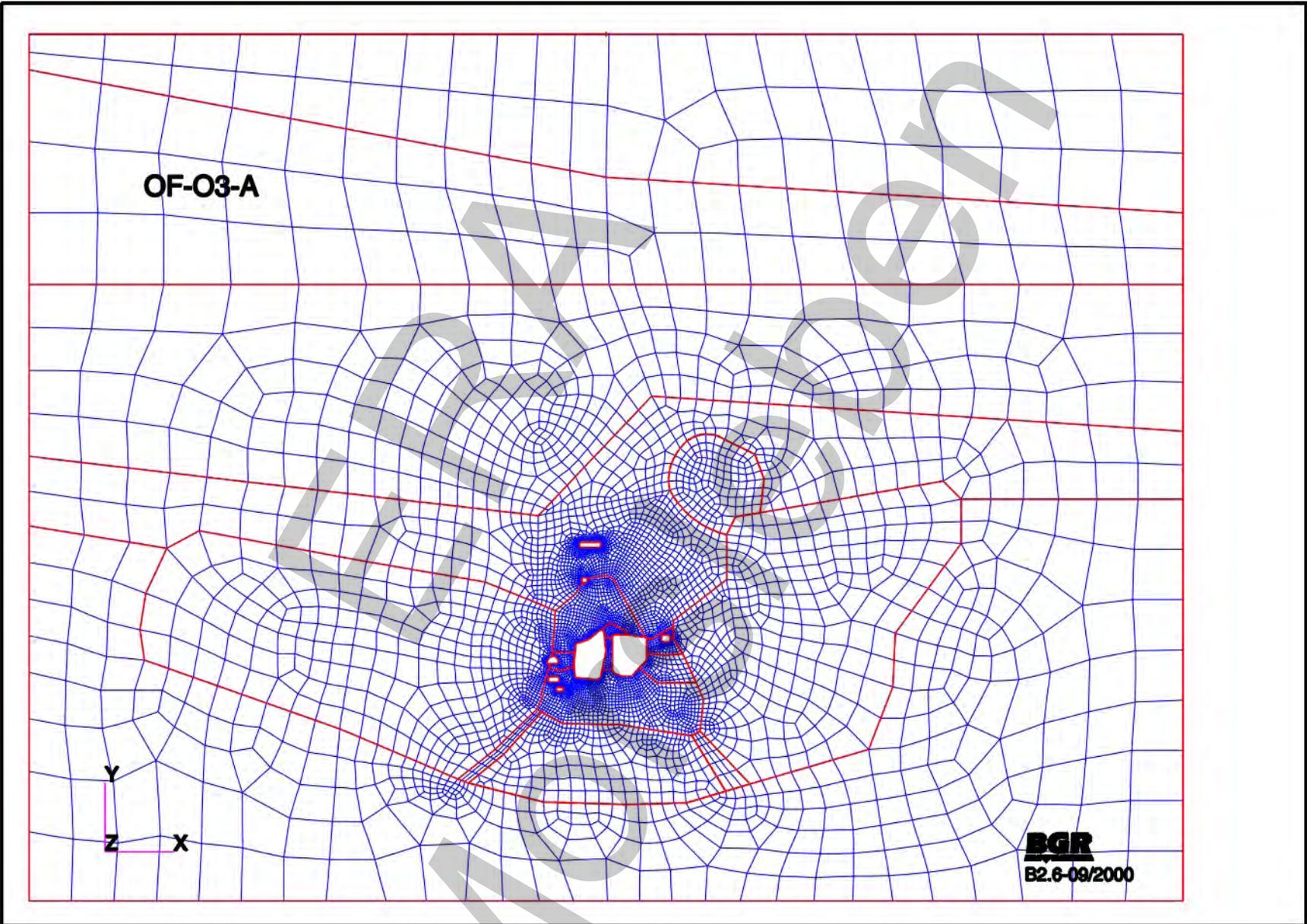
**Abbaue:**  
 □ unverfüllt  
 □ verfüllt seit t=0

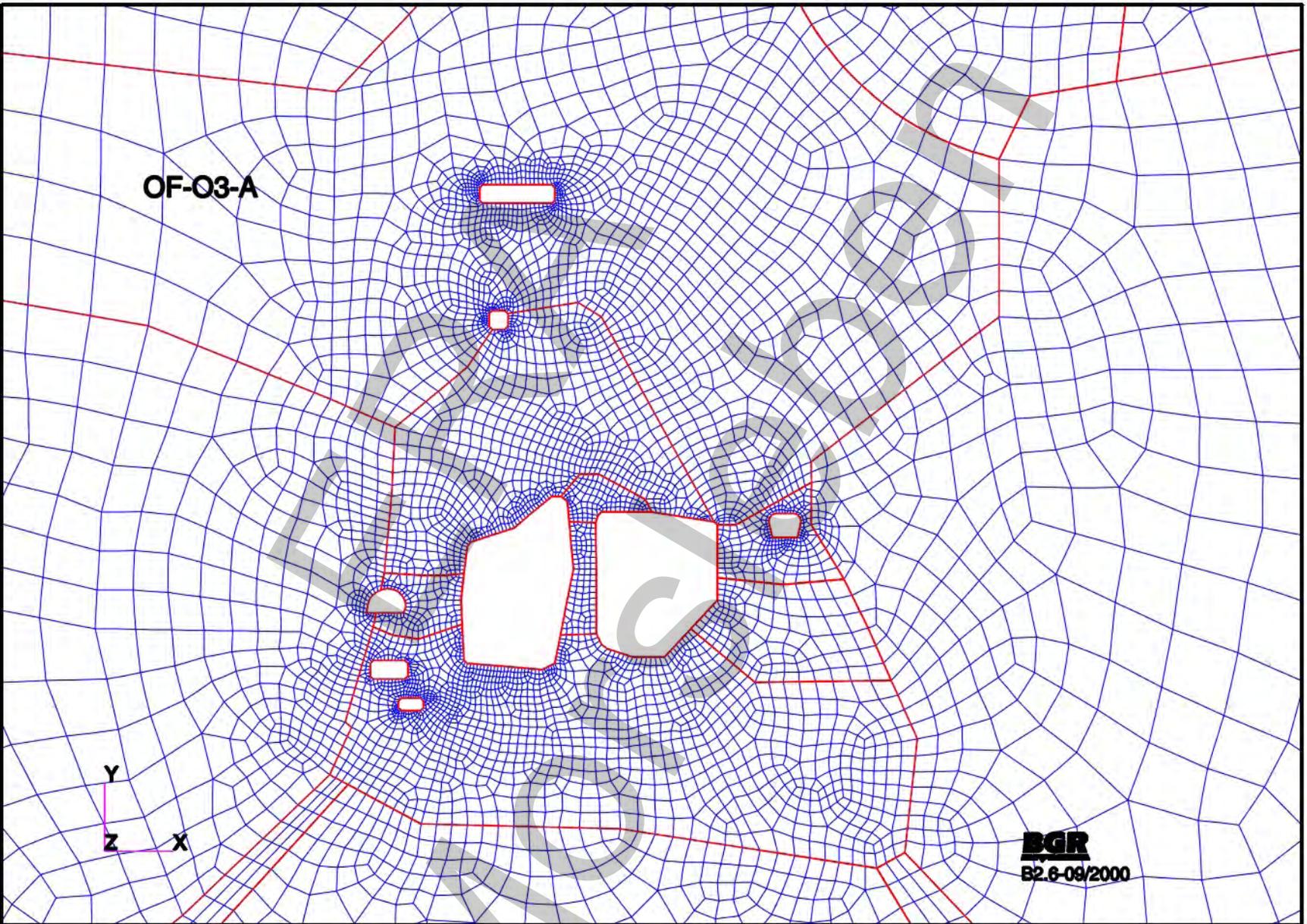
**ZB-O3-1**



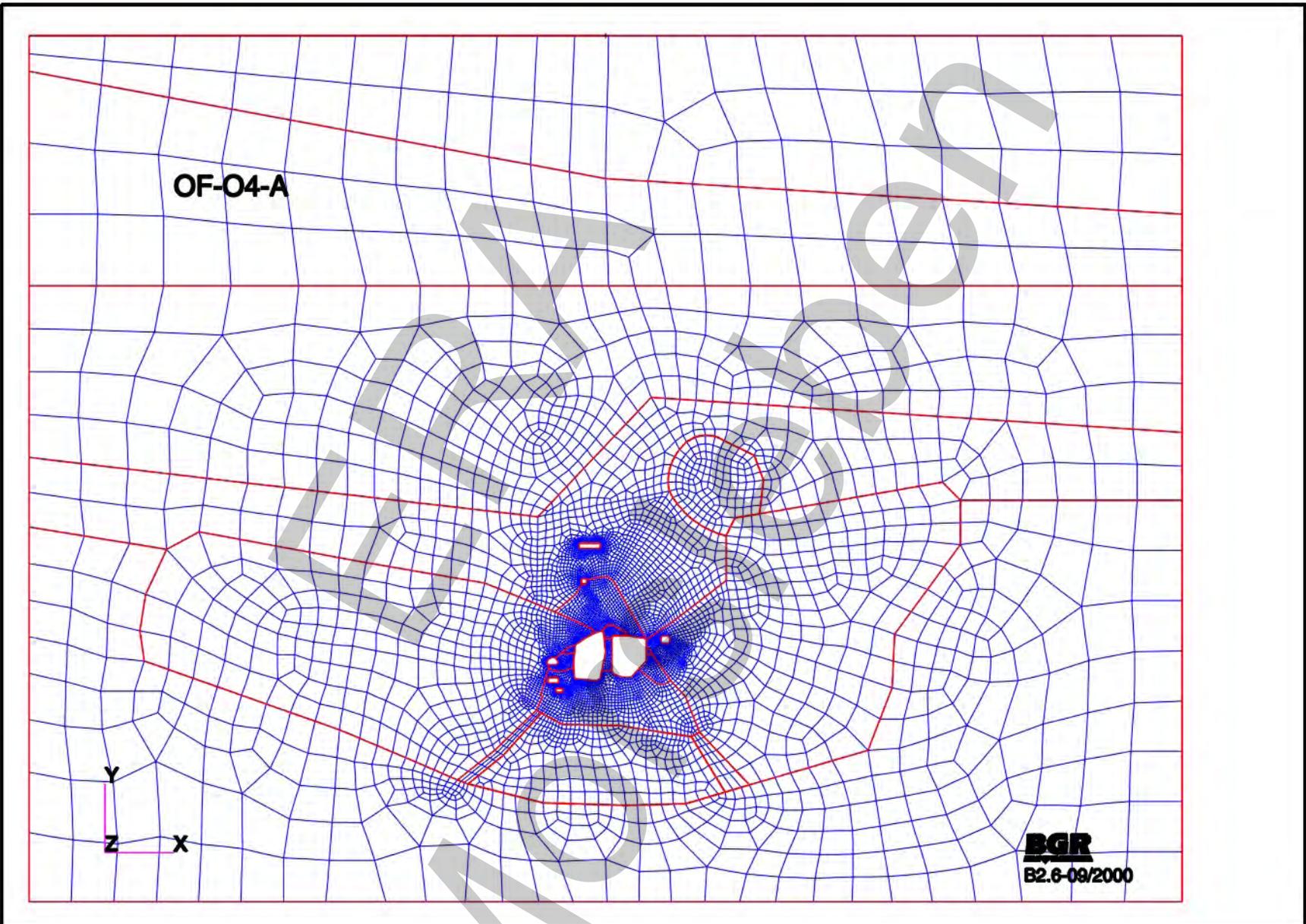
Modellierte Homogenbereiche im Zentralbereich, Modellschnitt ZB-O3  
 (neuer Kenntnisstand)

FE-Modell OF-03: Gesamtdarstellung

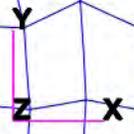




FE-Modell OF-03: Ausschnitt im Bereich der Abbaue

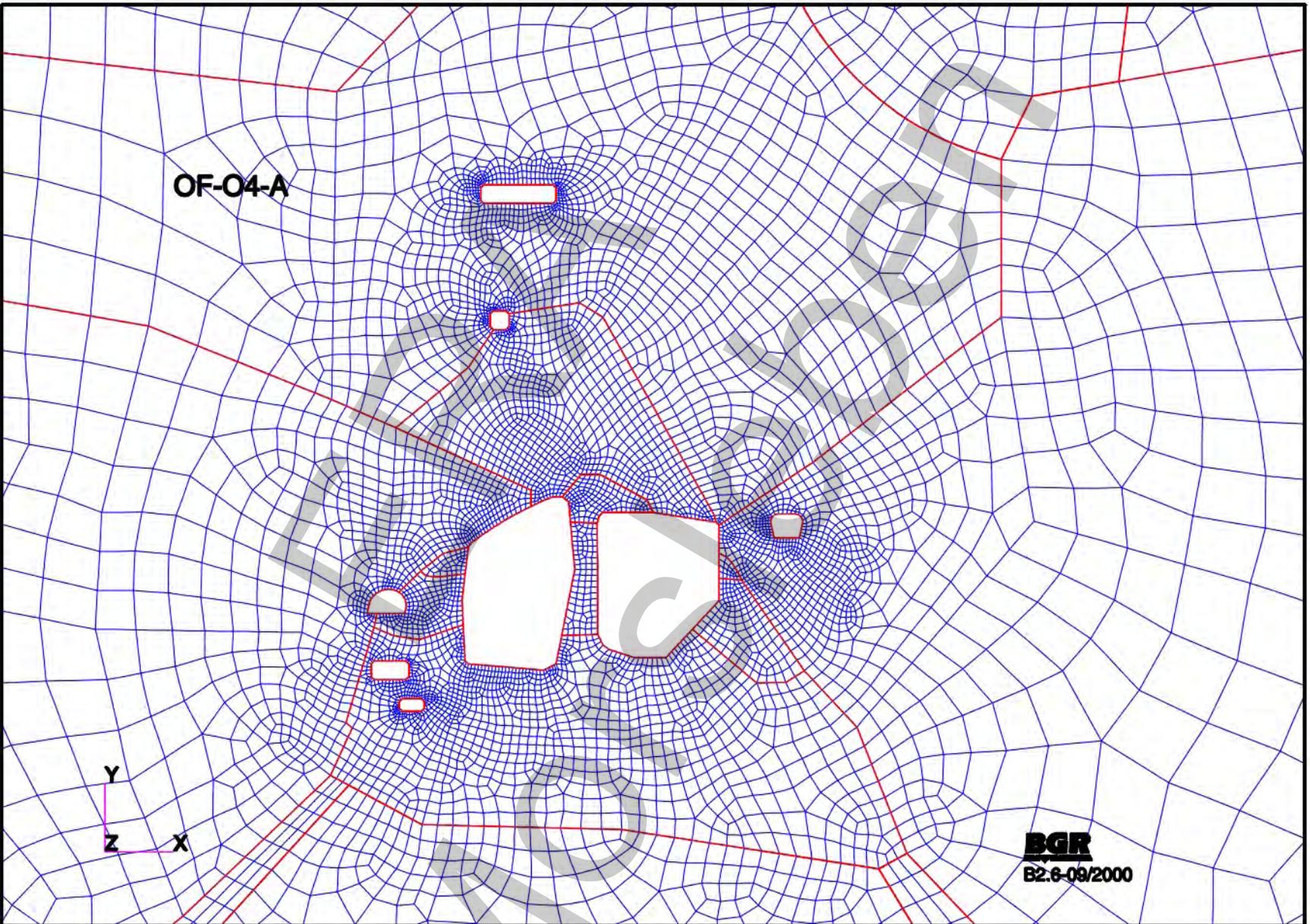


OF-04-A

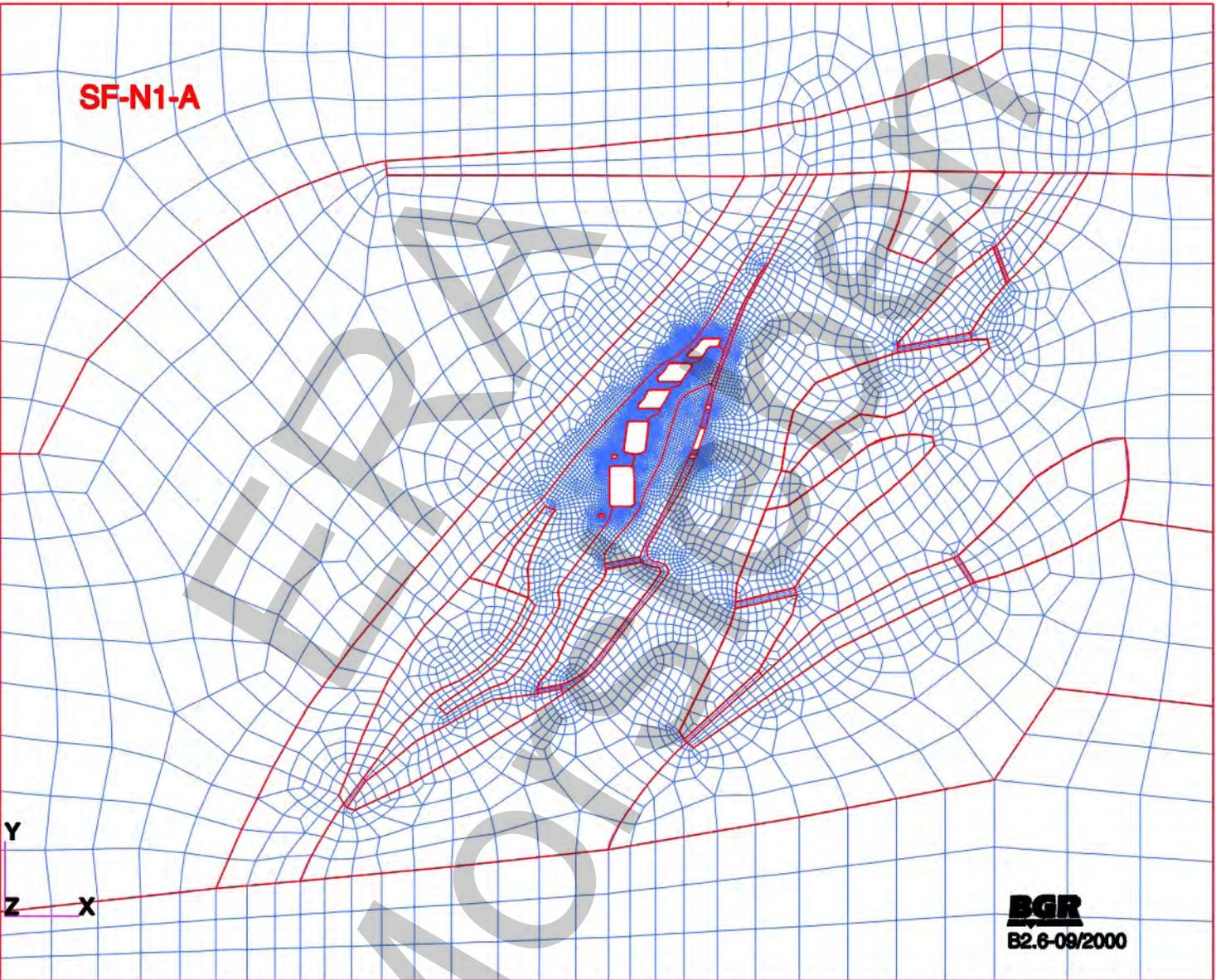


**BGR**  
B2.6-09/2000

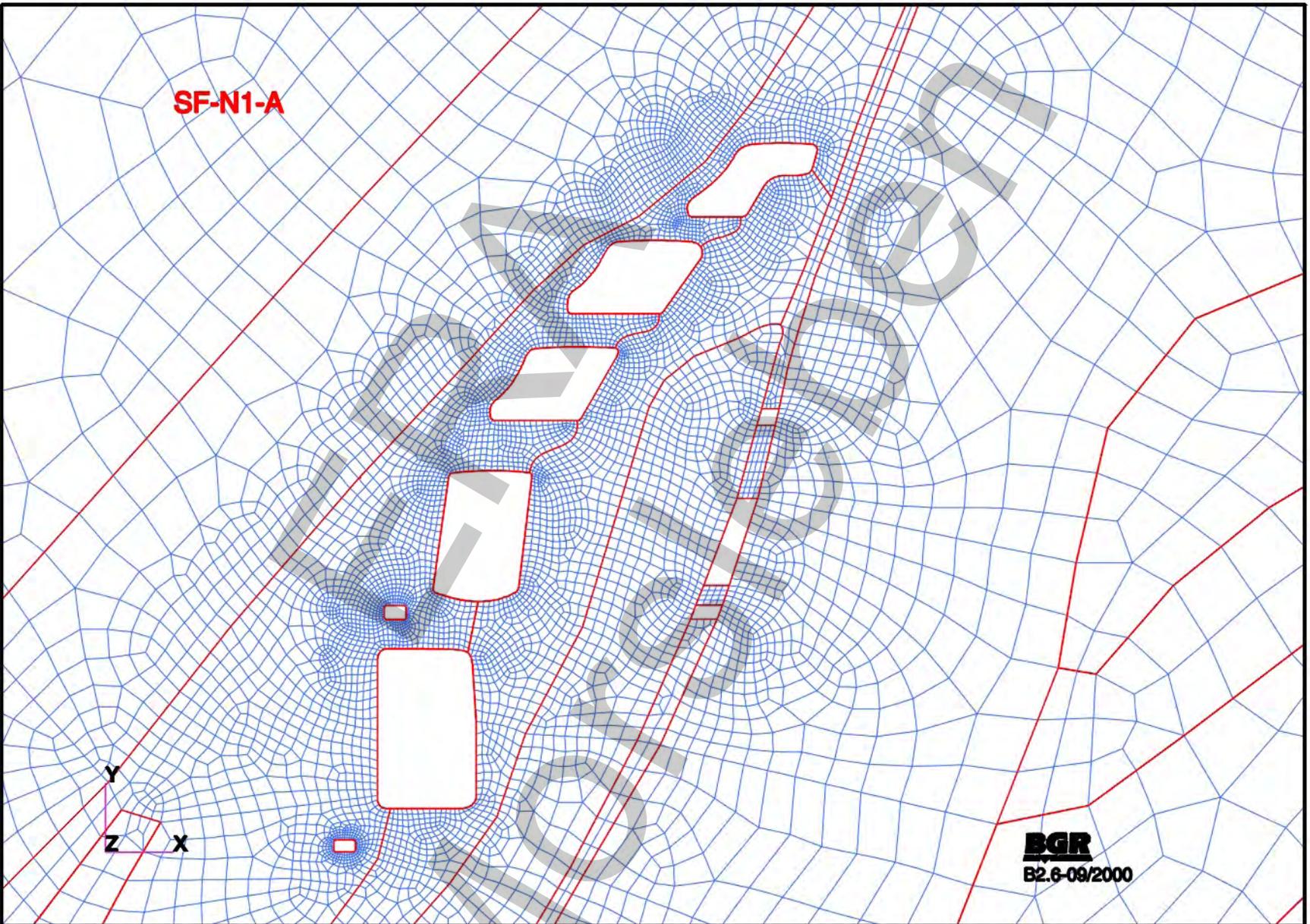
FE-Modell OF-04: Gesamtdarstellung



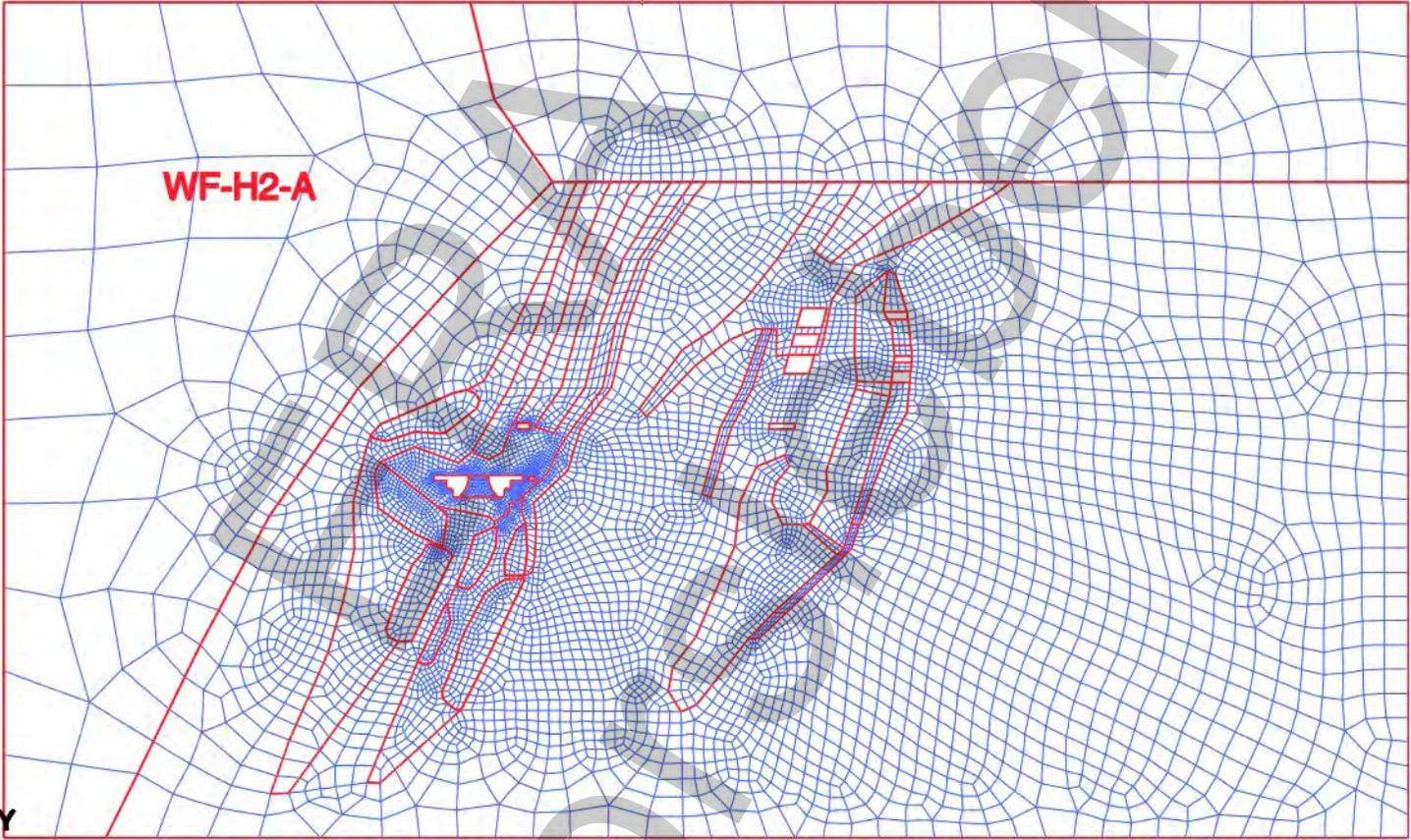
**FE-Modell OF-04: Ausschnitt im Bereich der Abbaue**



FE-Modell SF-N1: Gesamtdarstellung



FE-Modell SF-N1: Ausschnitt im Bereich der Abbaue

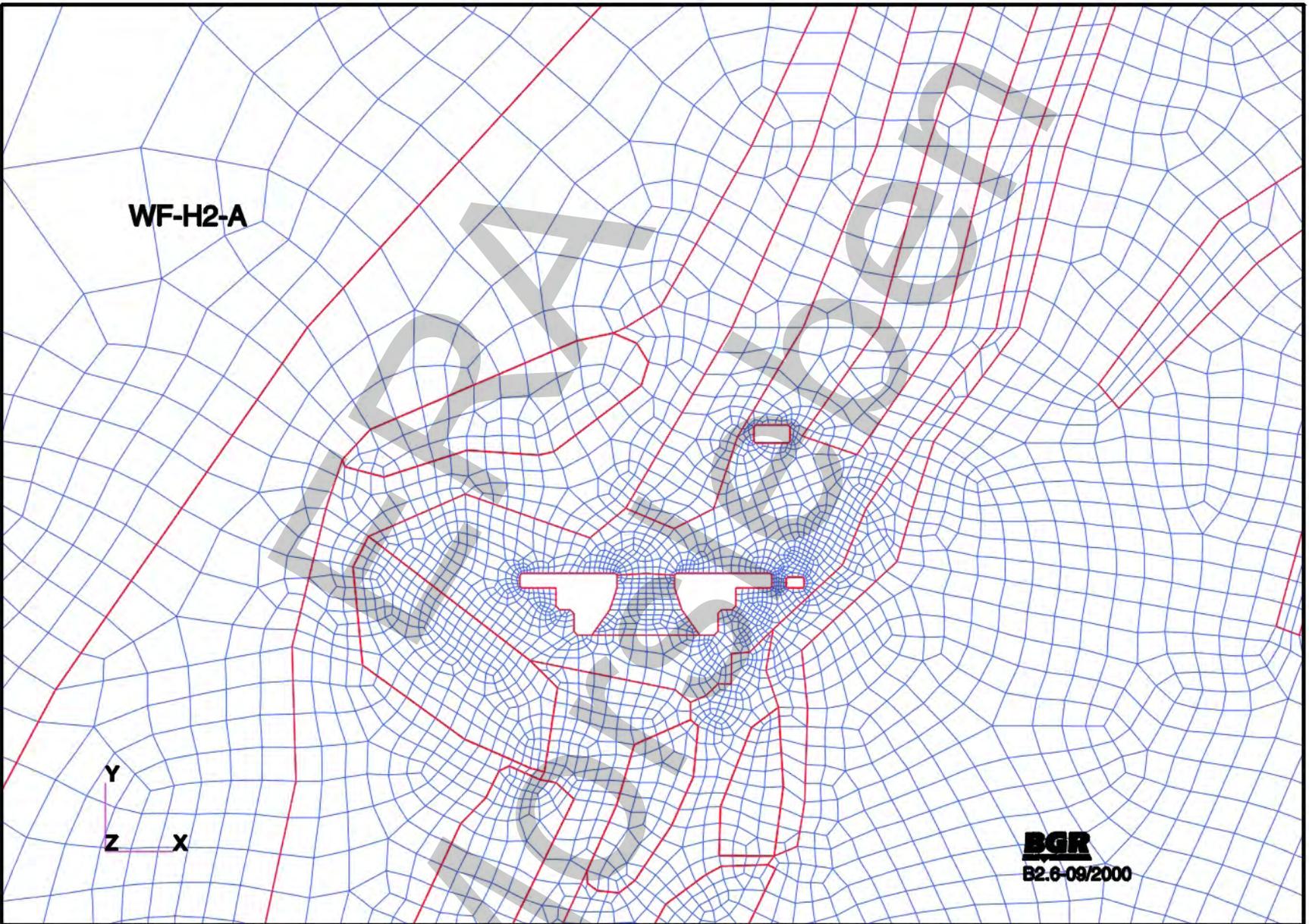


WF-H2-A

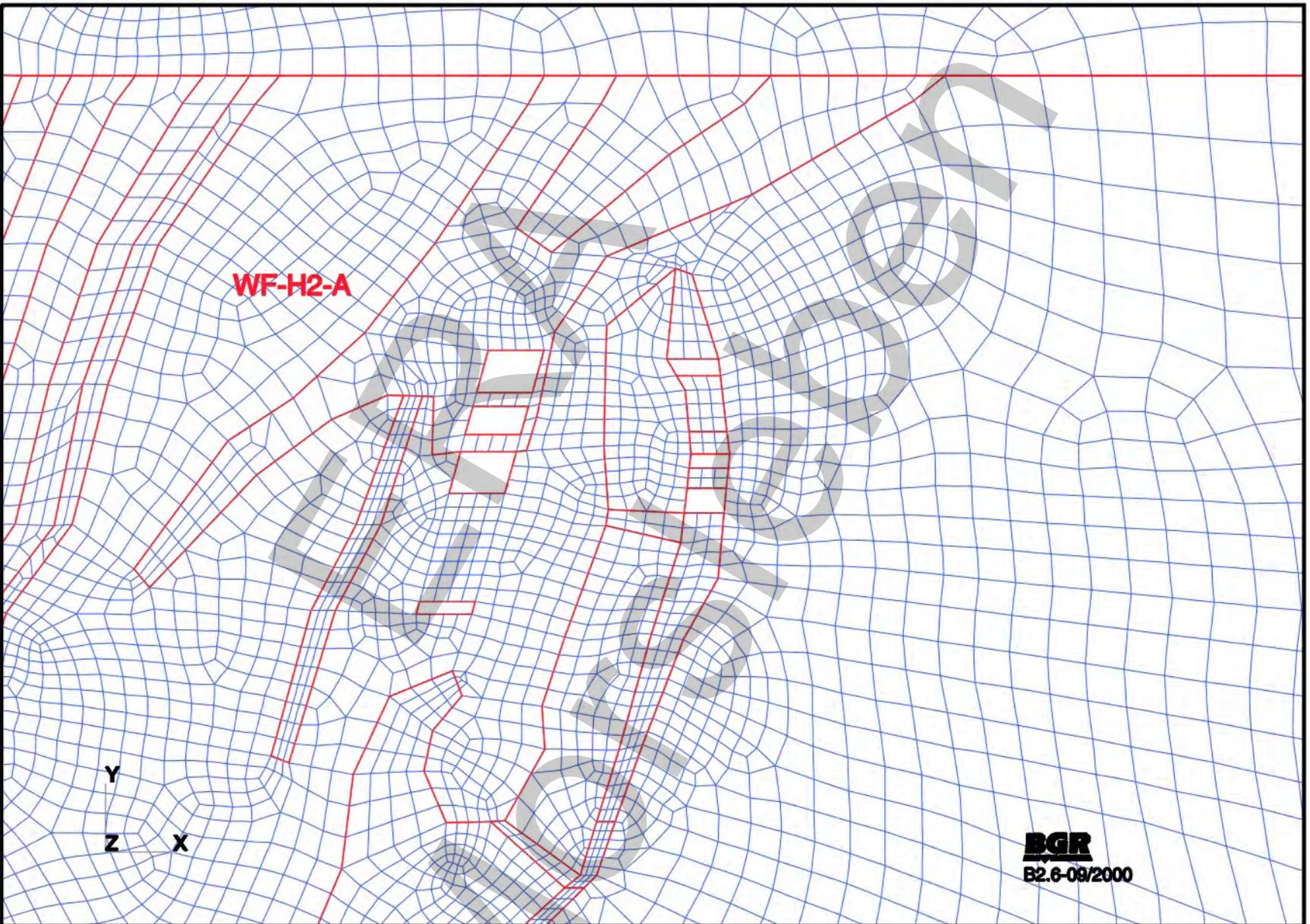
Y  
Z X

**BGR**  
B2.6-09/2000

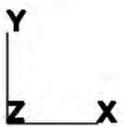
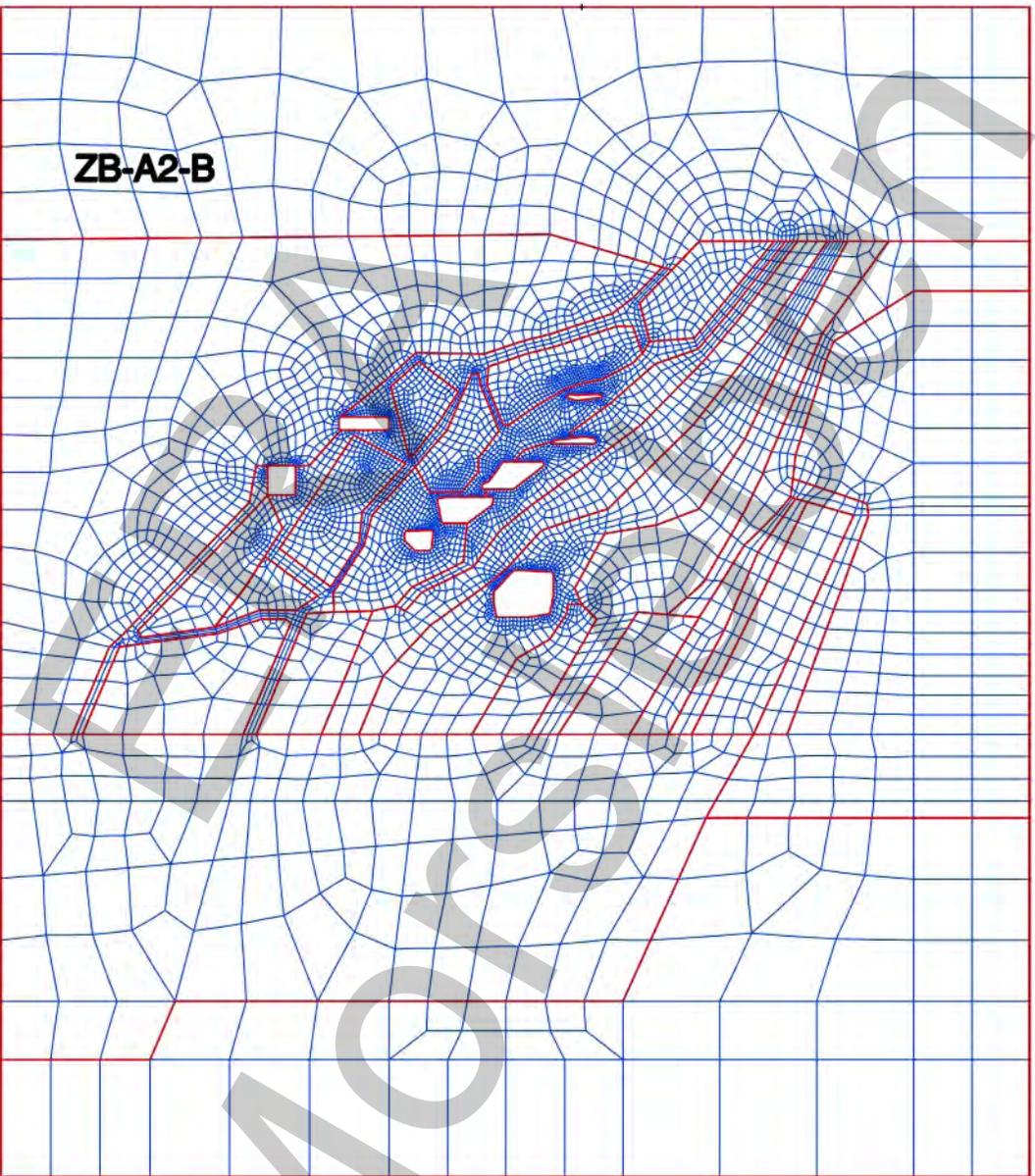
FE-Modell WF-H2: Gesamtdarstellung



FE-Modell WF-H2: Ausschnitt im Bereich der Abbaue 1n und 1s

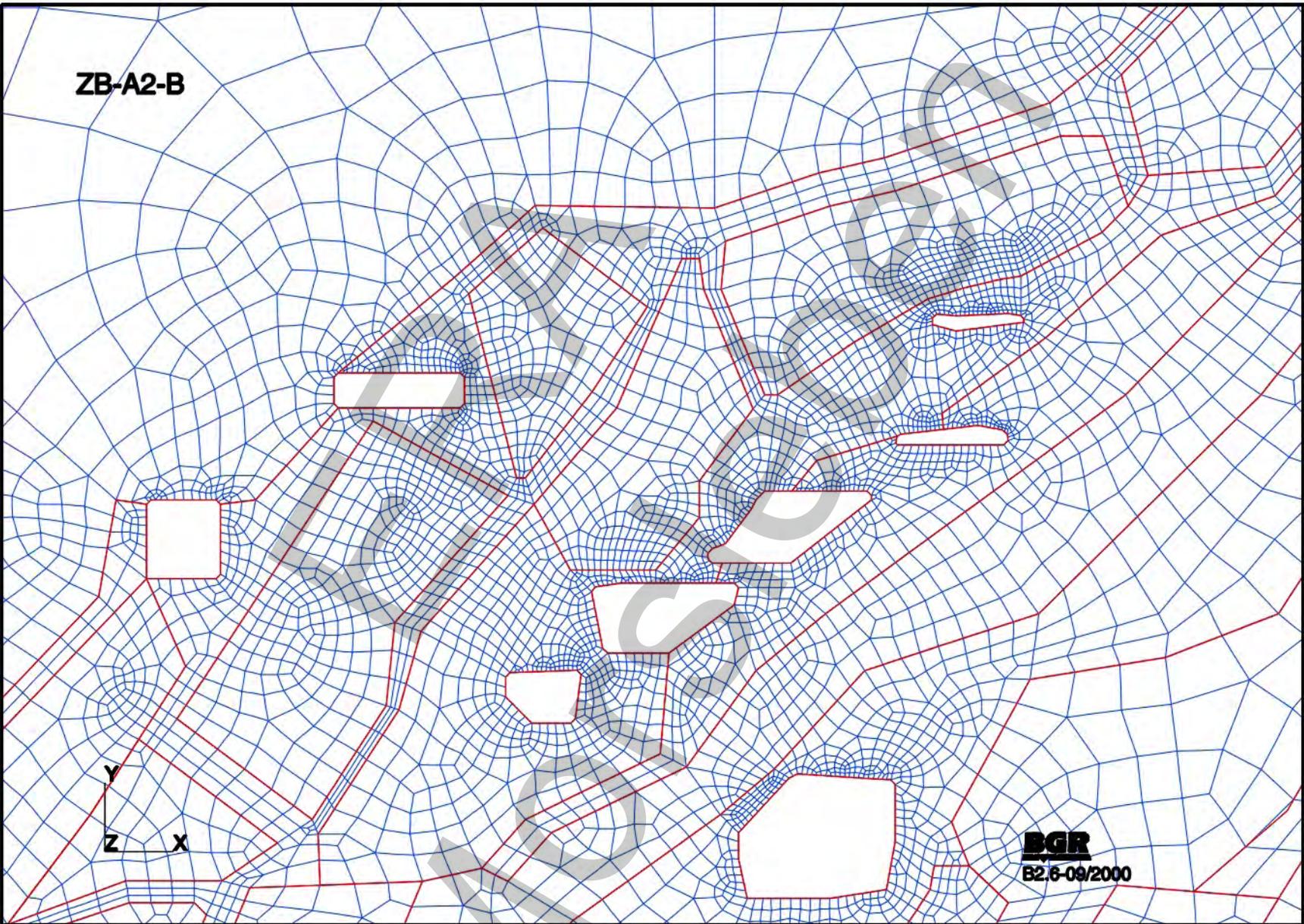


FE-Modell WF-H2: Ausschnitt im Bereich des Kalilagers B

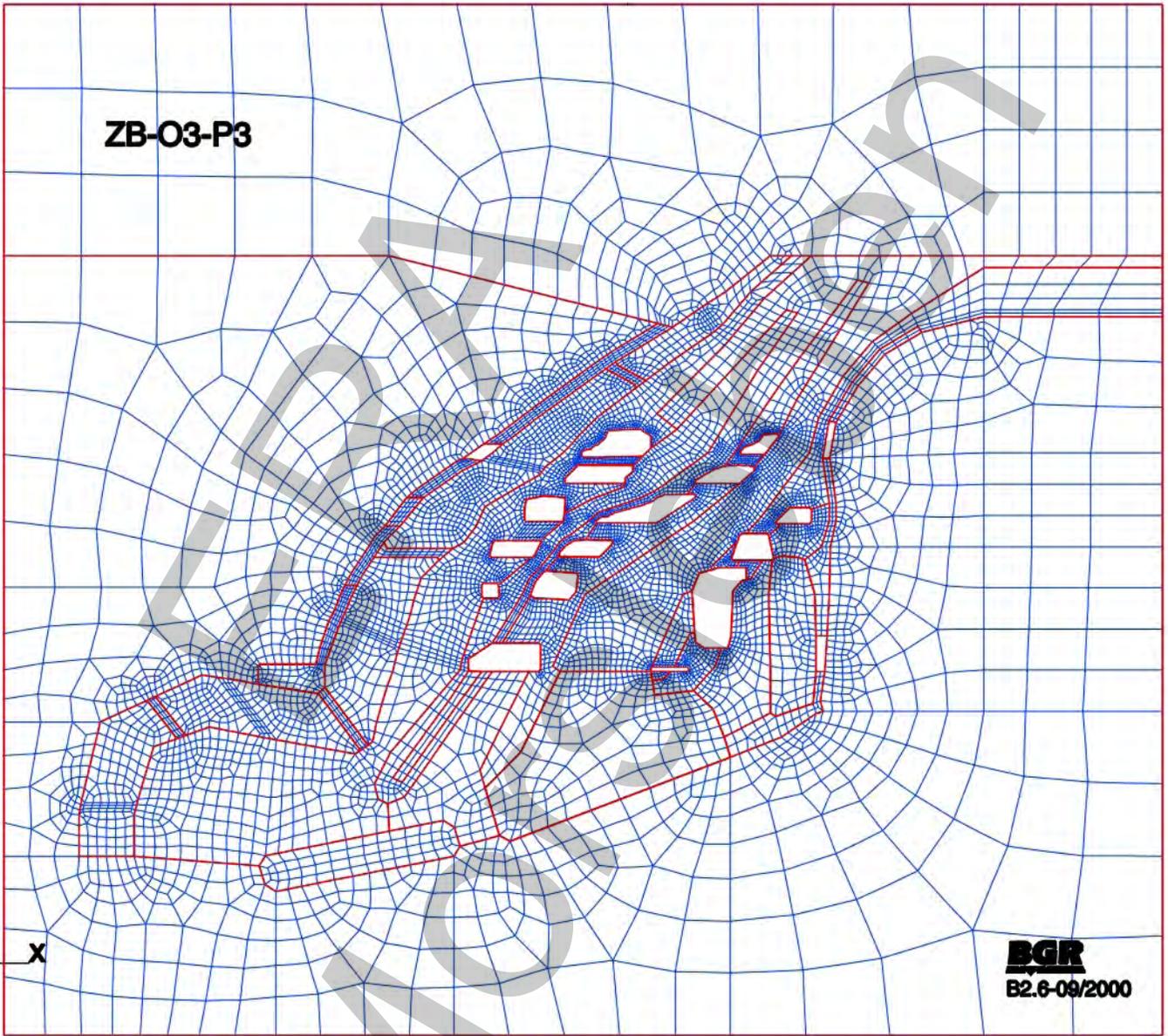


**BGR**  
B2.6-09/2000

**FE-Modell ZB-A2: Gesamtdarstellung**



FE-Modell ZB-A2: Ausschnitt im Bereich der Abbaue

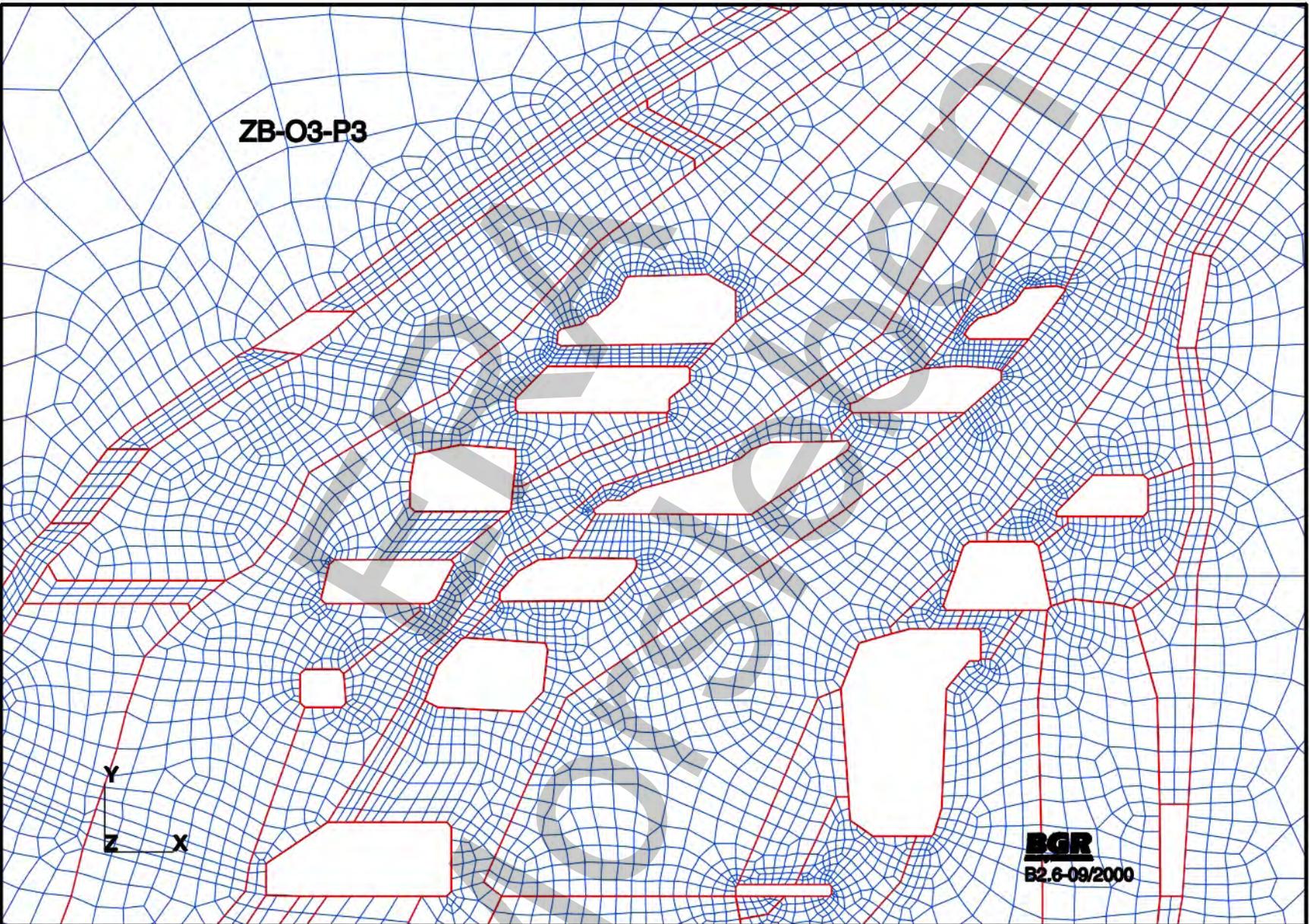


ZB-O3-P3

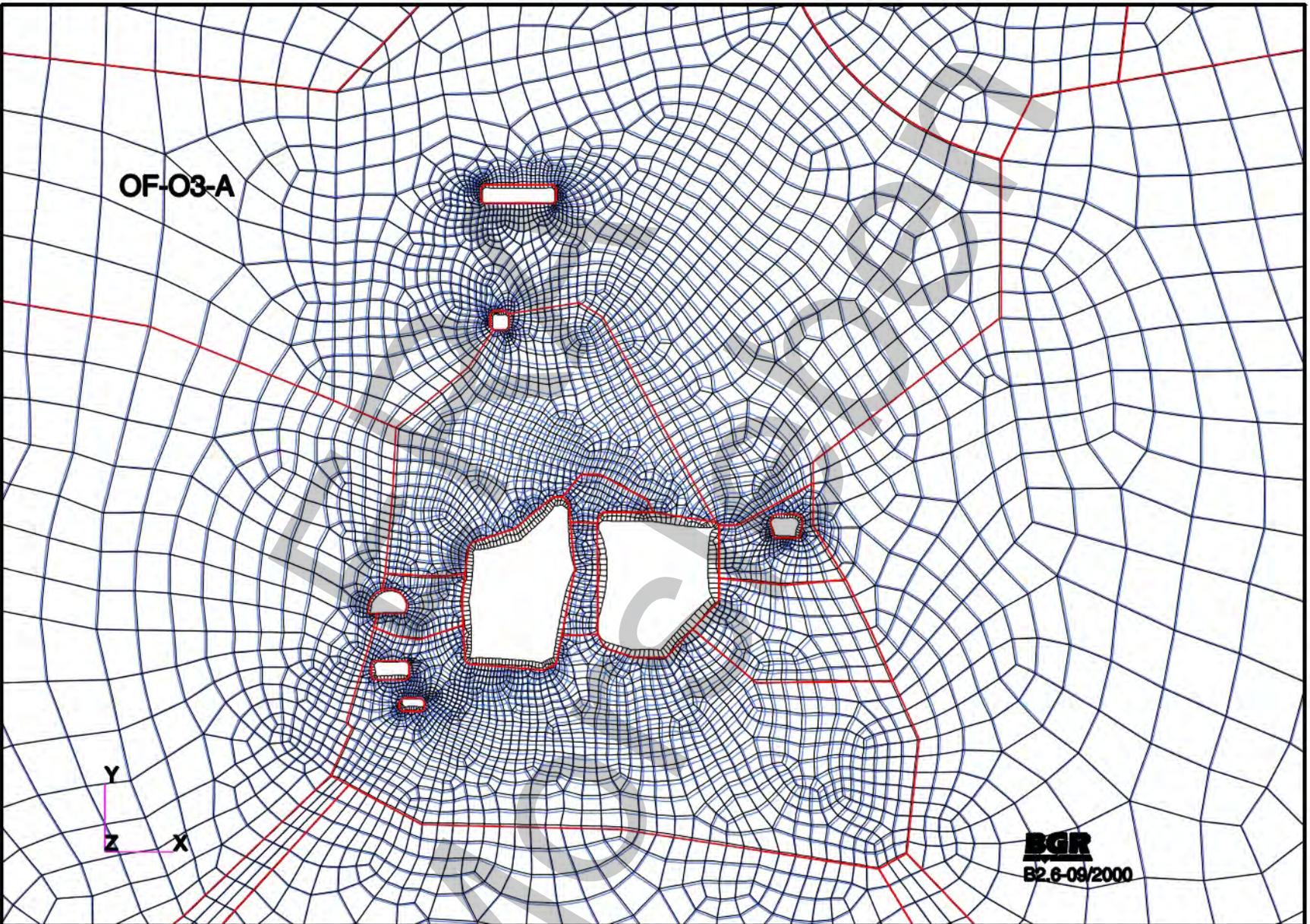
Y  
Z X

**BGR**  
B2.6-09/2000

FE-Modell ZB-O3: Gesamtdarstellung

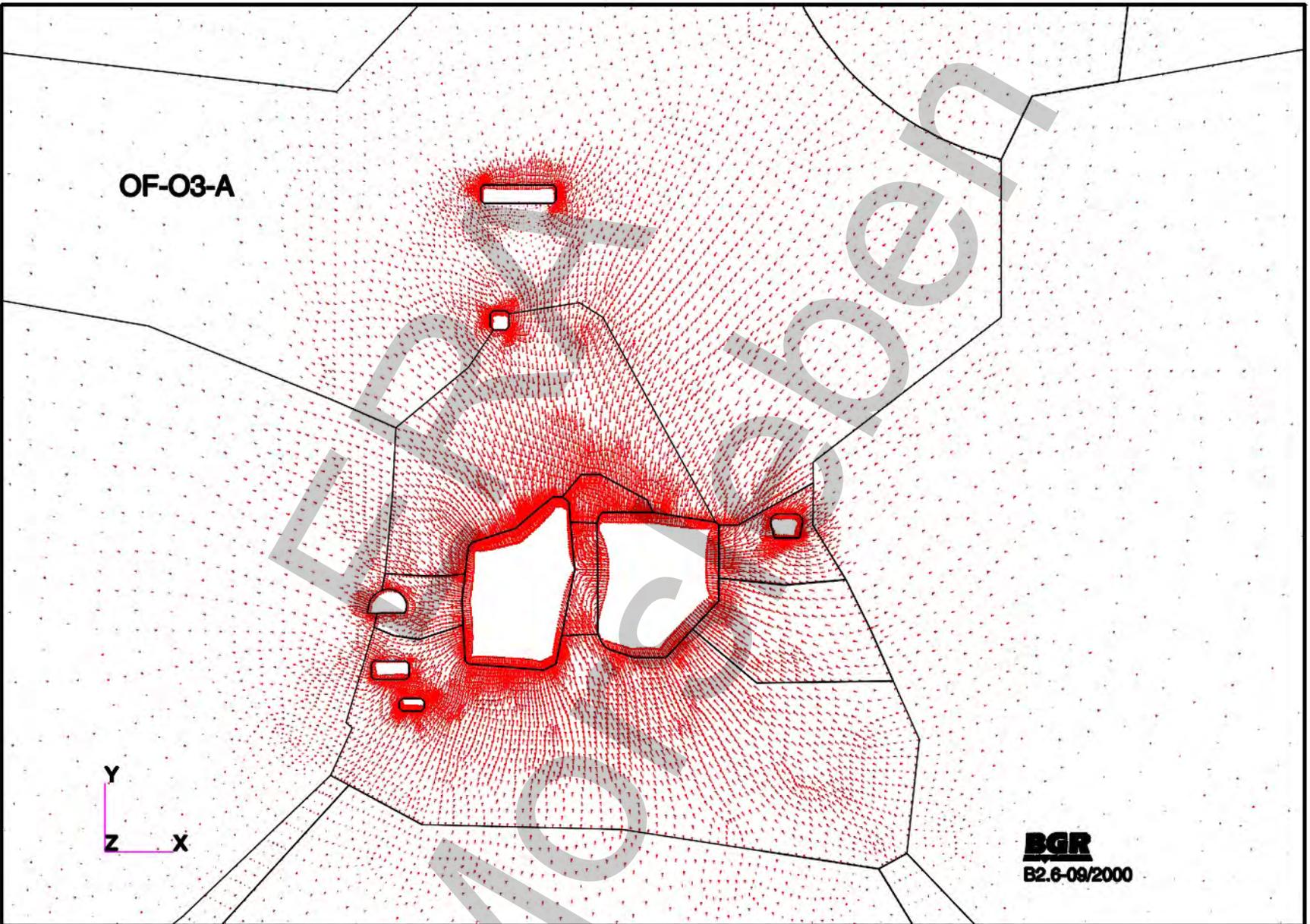


FE-Modell ZB-03: Ausschnitt im Bereich der Abbaue



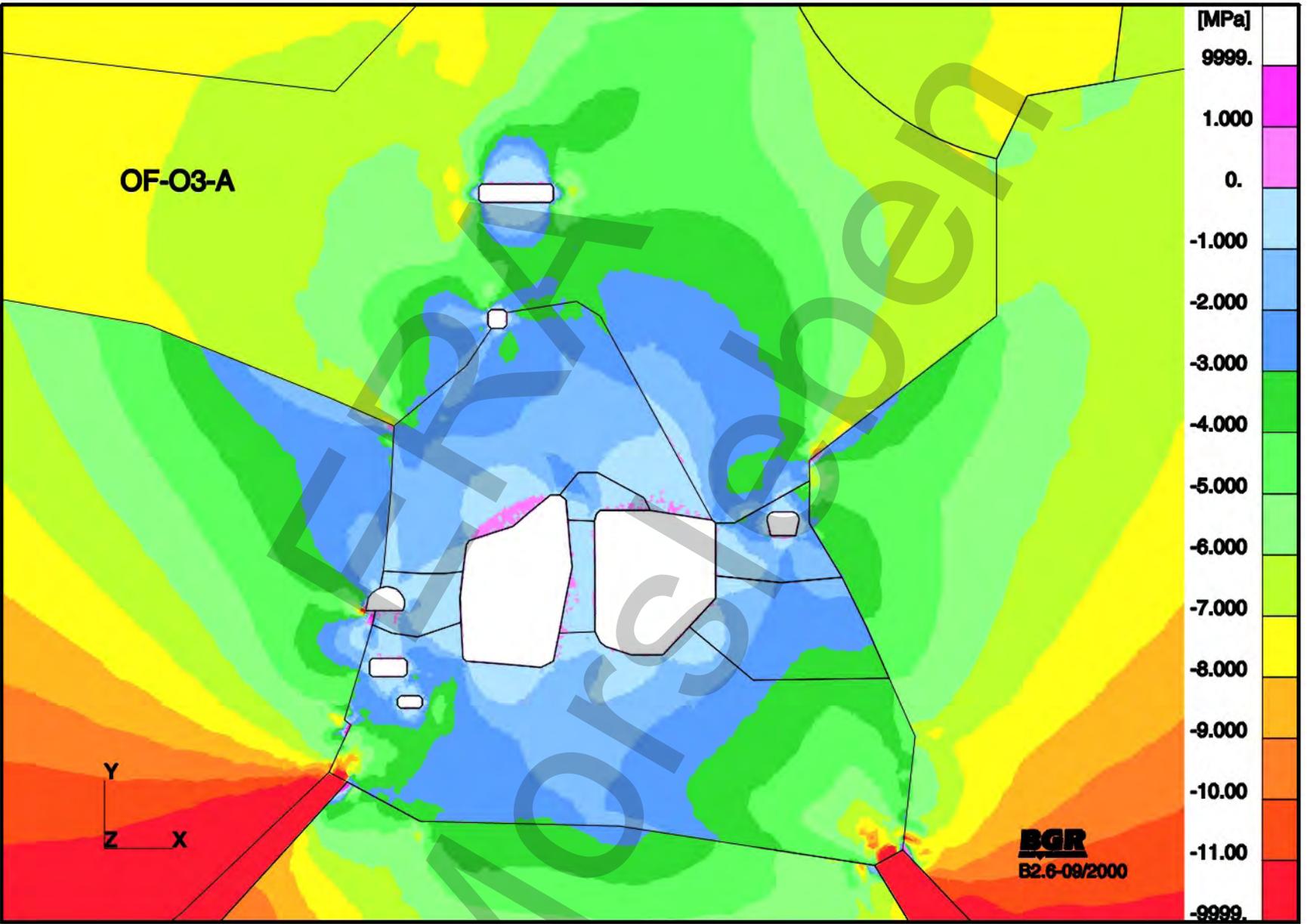
**BGR**  
B2.6-09/2000

**OF-03-A: Basismodell**  
**Verformte Struktur nach 45 Jahren (Ausschnitt)**  
**(Skalierungsfaktor=20, unverformtes Modell=rot/blau, verformtes Modell=schwarz)**



**BGR**  
B2.6-09/2000

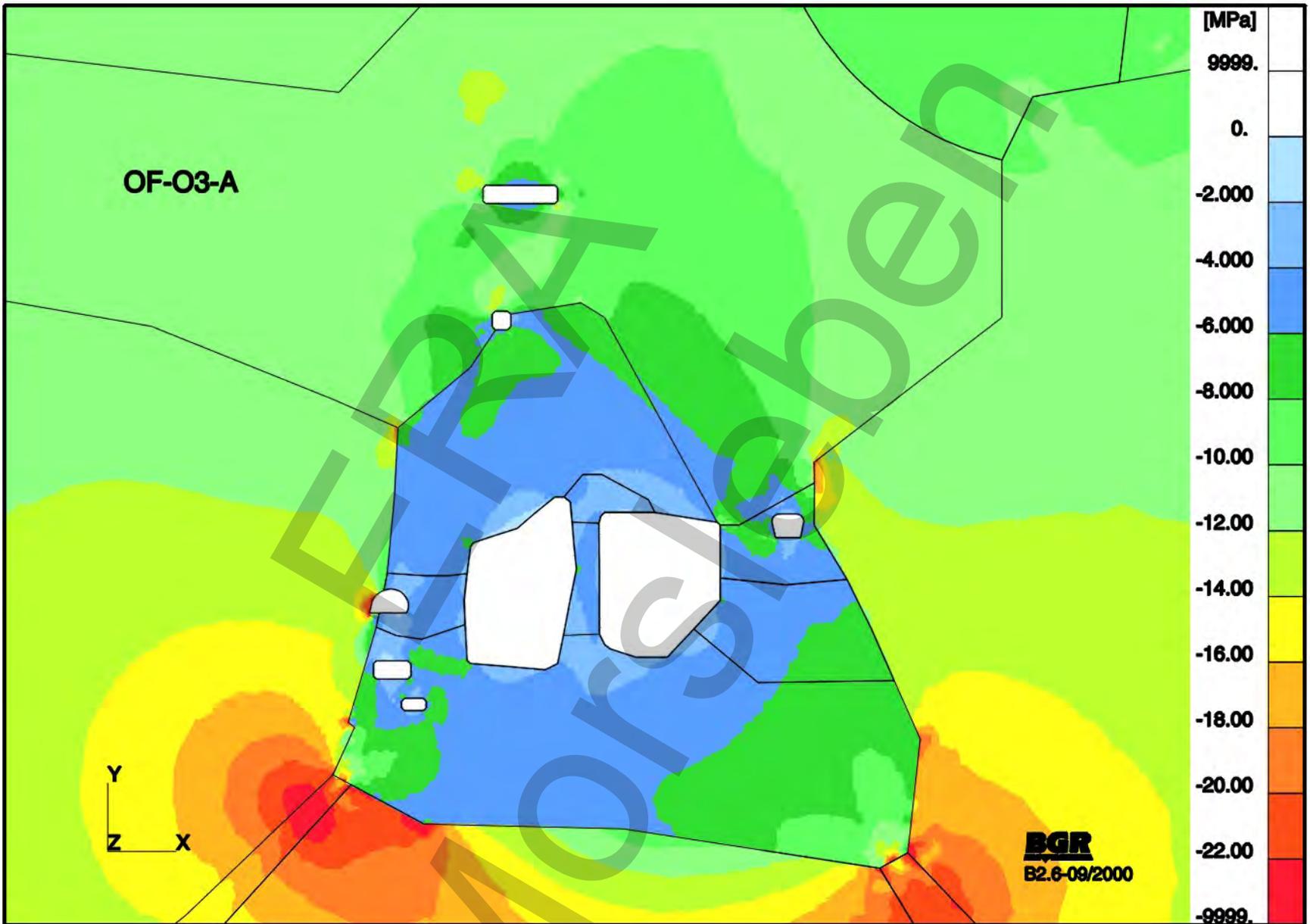
**OF-03-A: Basismodell  
Verschiebungsvektoren nach 45 Jahren (Ausschnitt)**



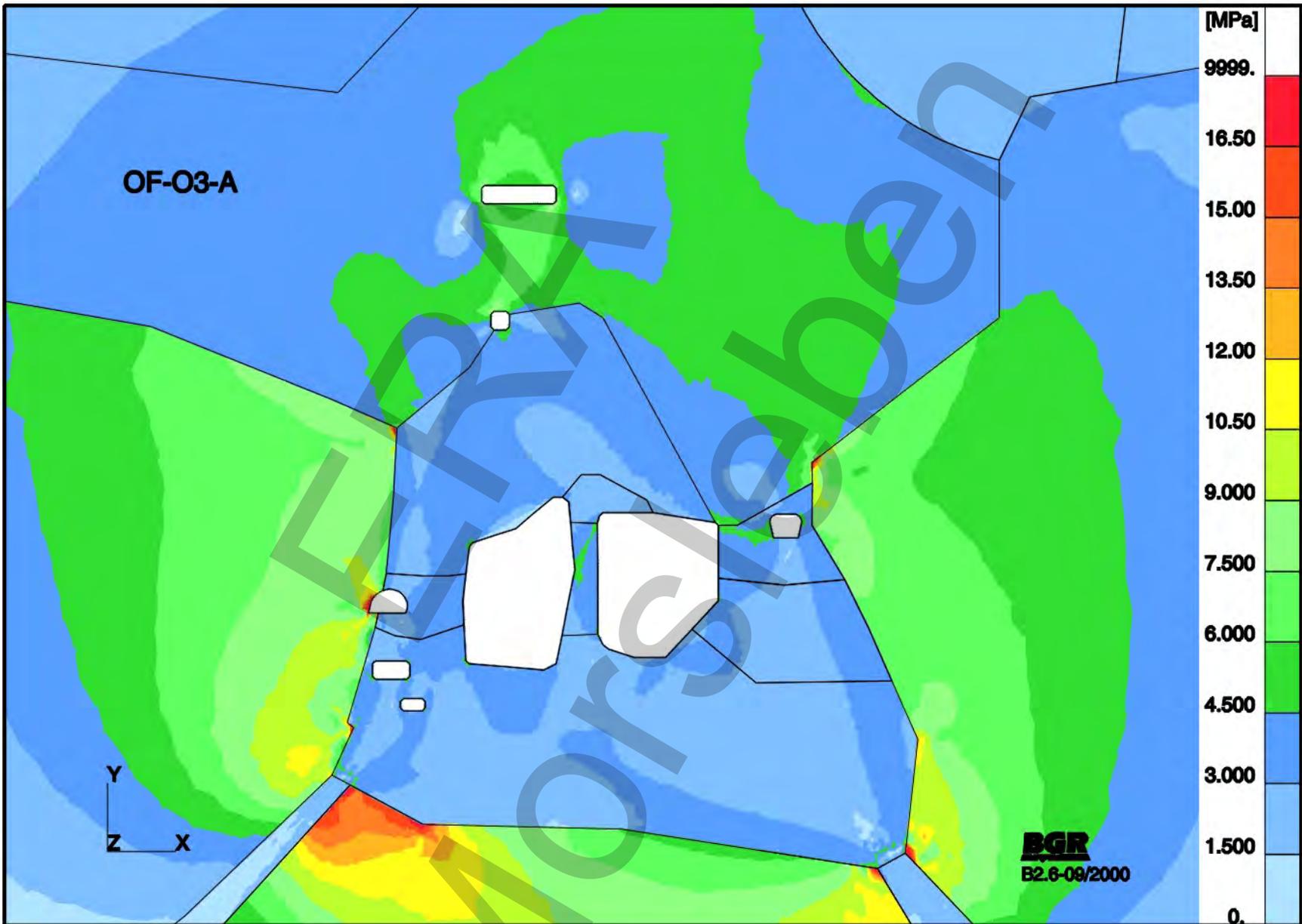
OF-03-A

OF-03-A: Basismodell  
 Kleinste Hauptdruckspannungen S1 nach 100 Jahren (Ausschnitt)

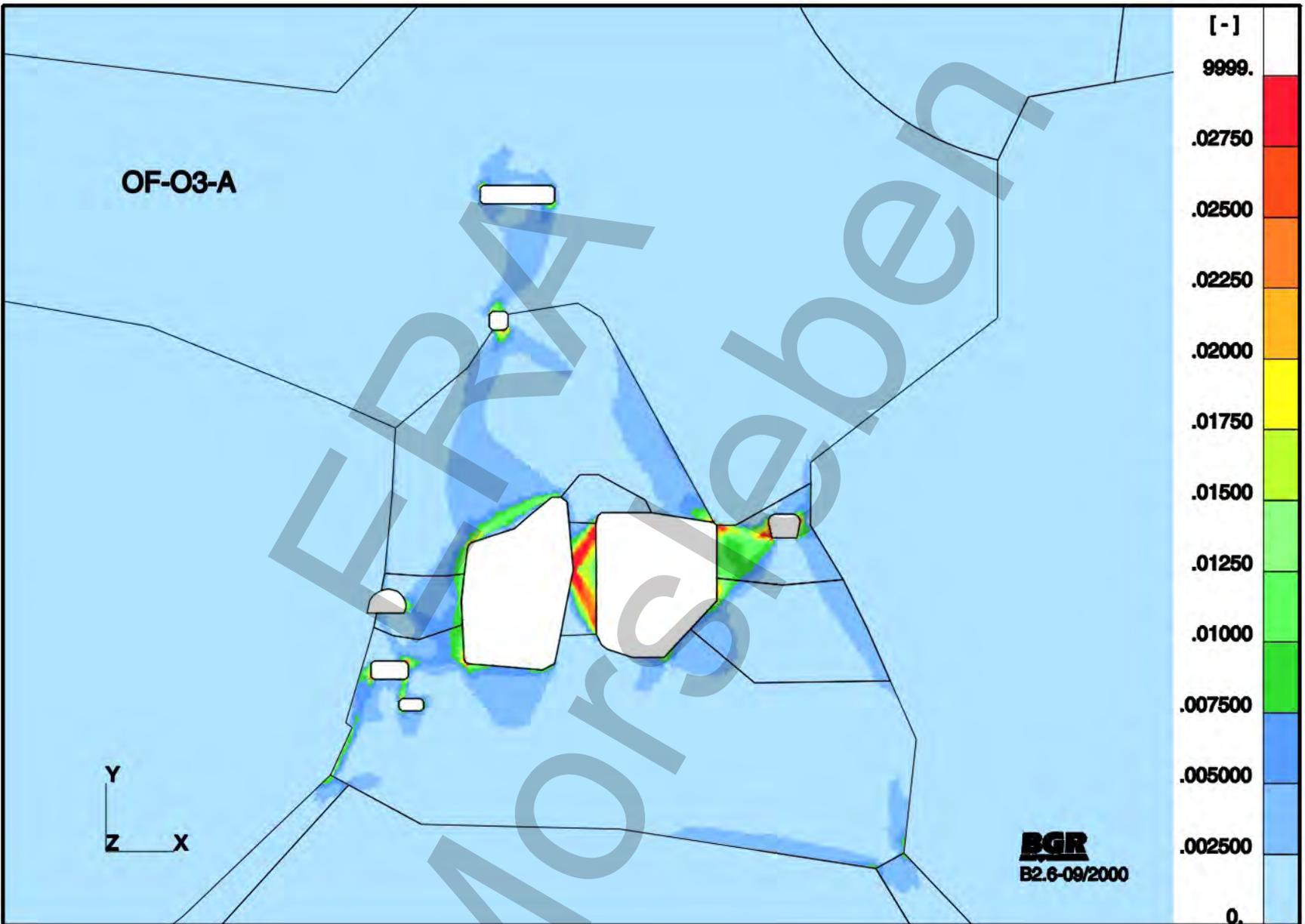
OF-03-A: Basismodell  
Grossste Hauptdruckspannungen S2 nach 100 Jahren (Ausschnitt)

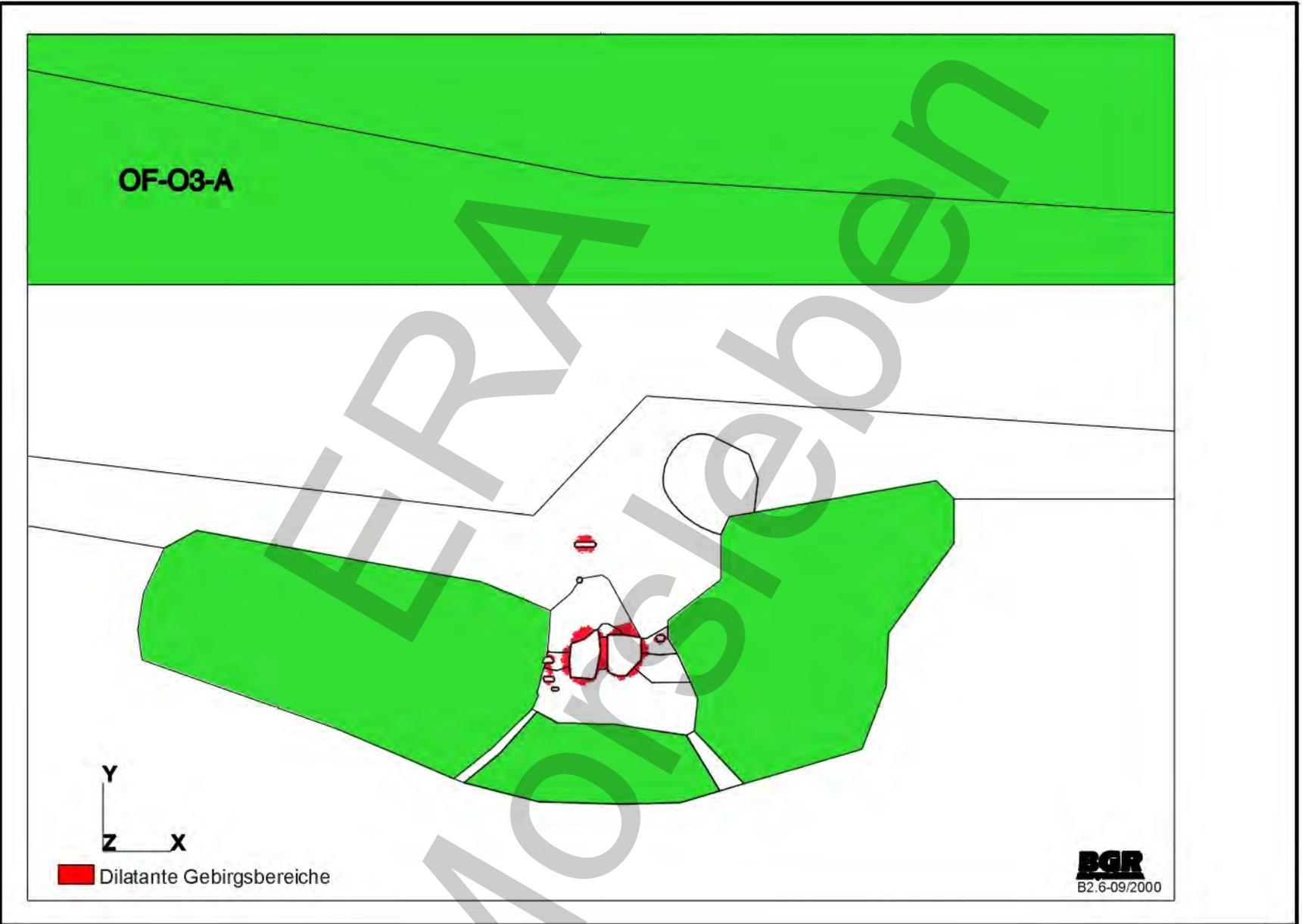


OF-03-A: Basismodell  
Effektivspannungen nach 100 Jahren (Ausschnitt)

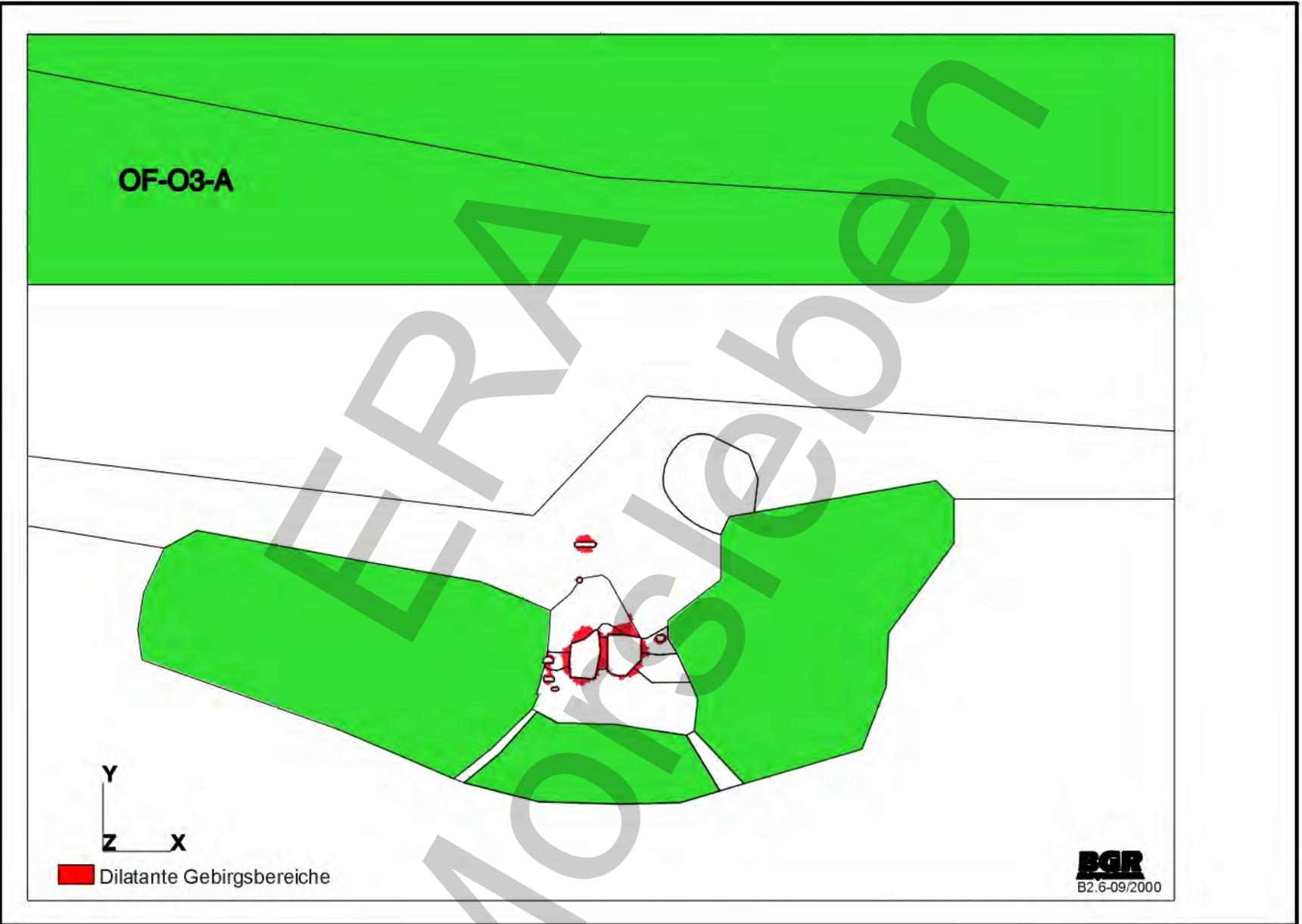


OF-03-A: Basismodell  
Effektivverzerrungen nach 100 Jahren (Ausschnitt)

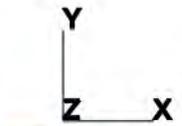




OF-03-A: Basismodell  
Dilatante Gebirgsbereiche nach 45 Jahren



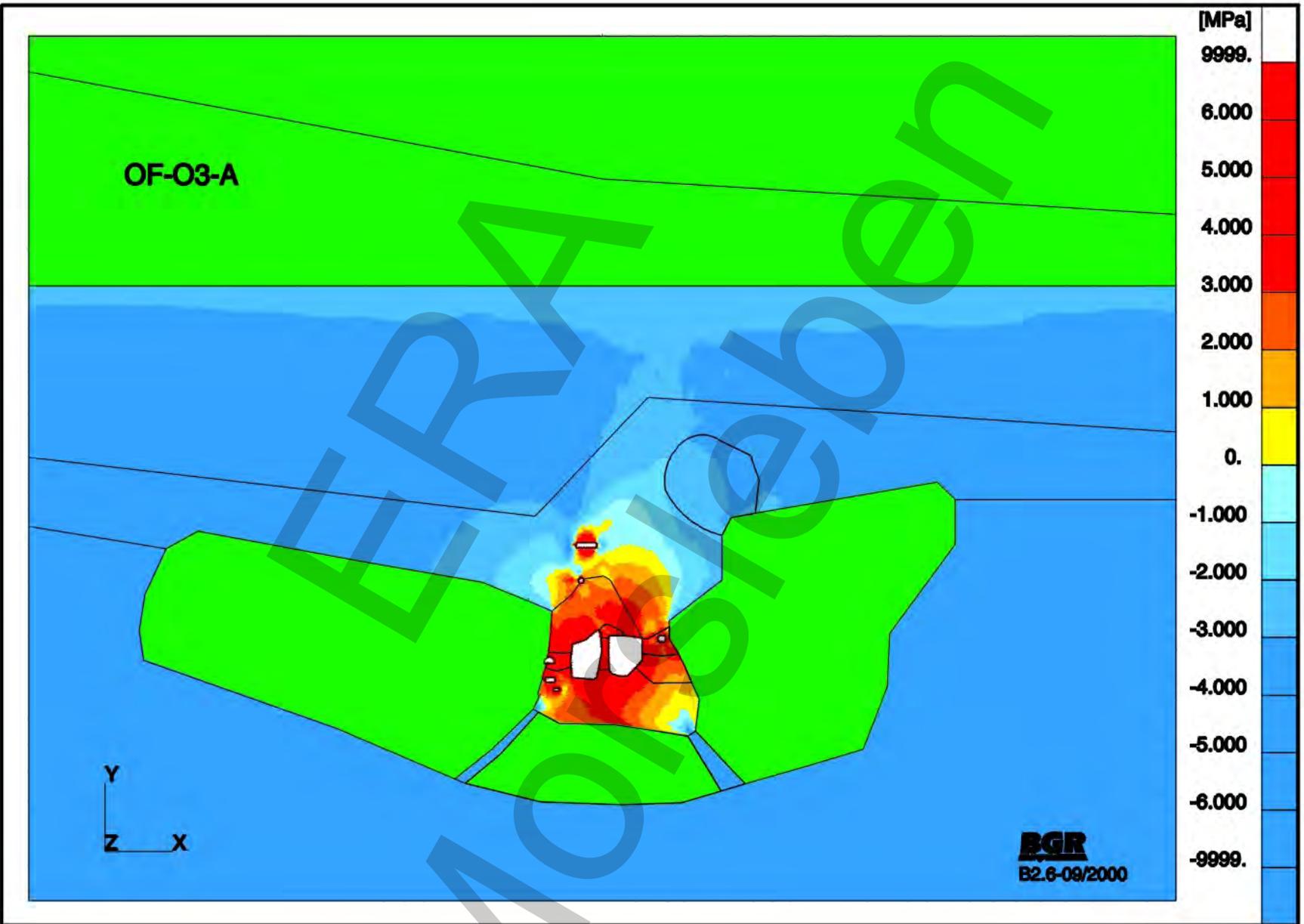
OF-03-A



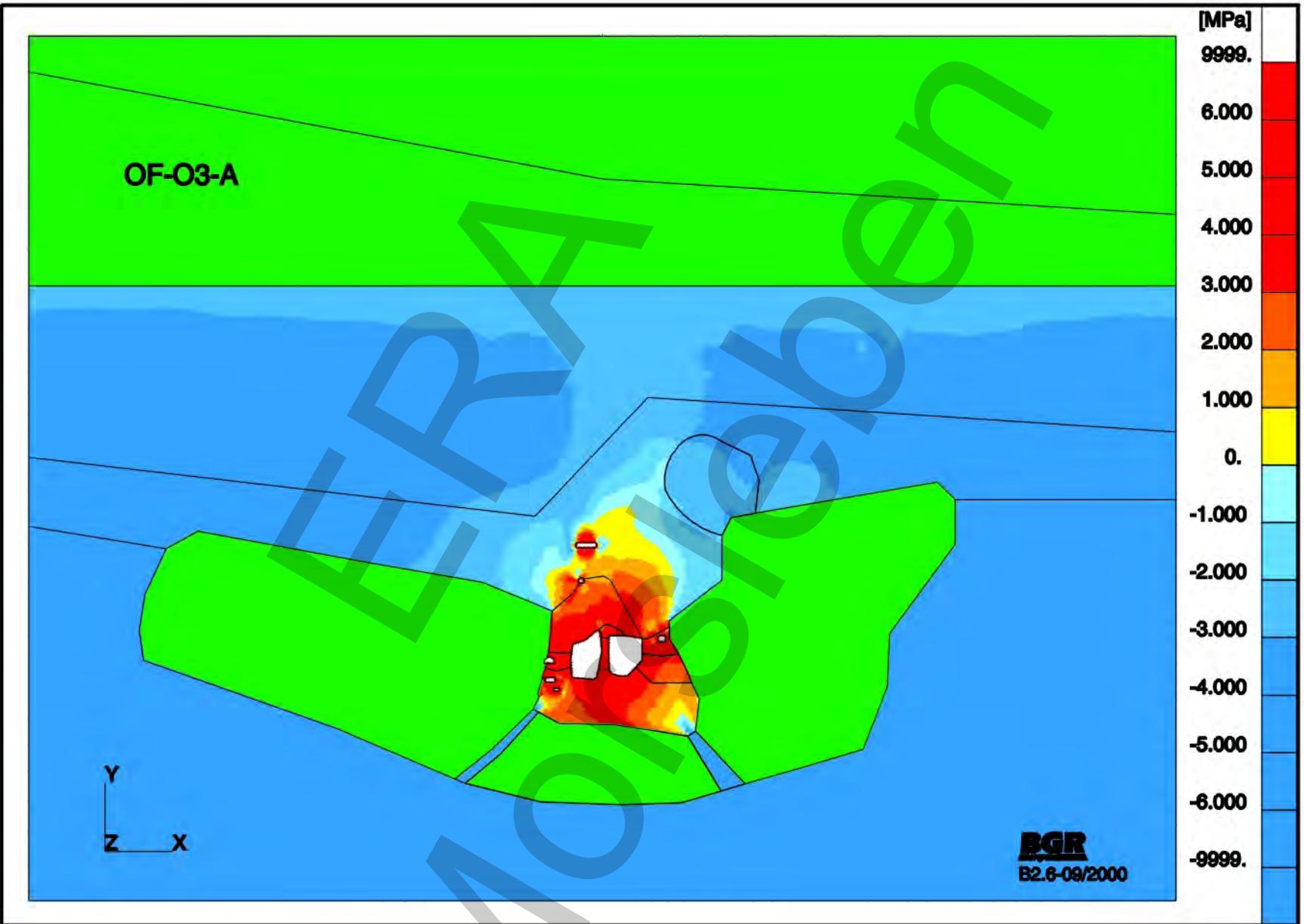
 Dilatante Gebirgsbereiche

**BGR**  
B2.6-09/2000

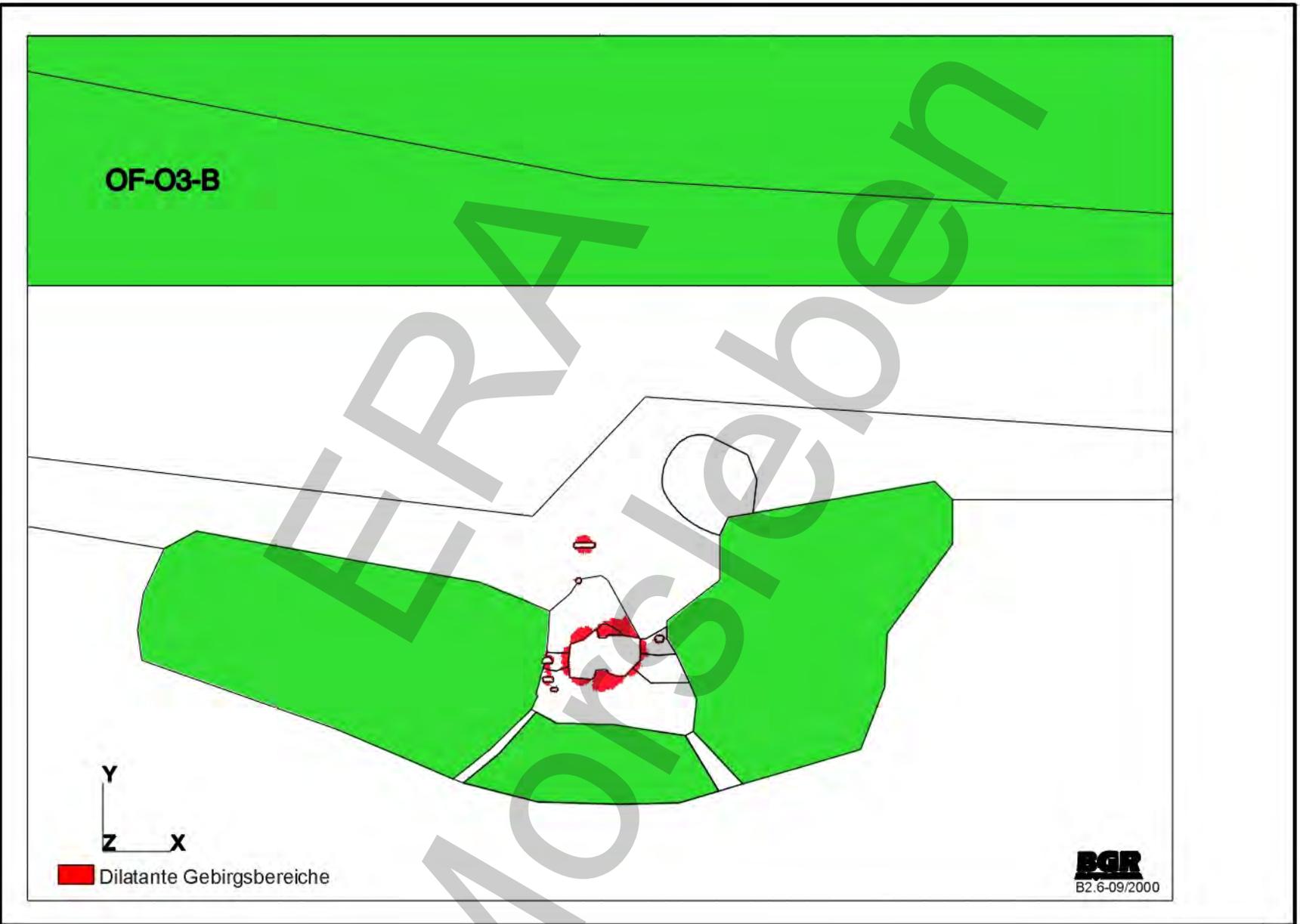
OF-03-A: Basismodell  
Dilatante Gebirgsbereiche nach 100 Jahren



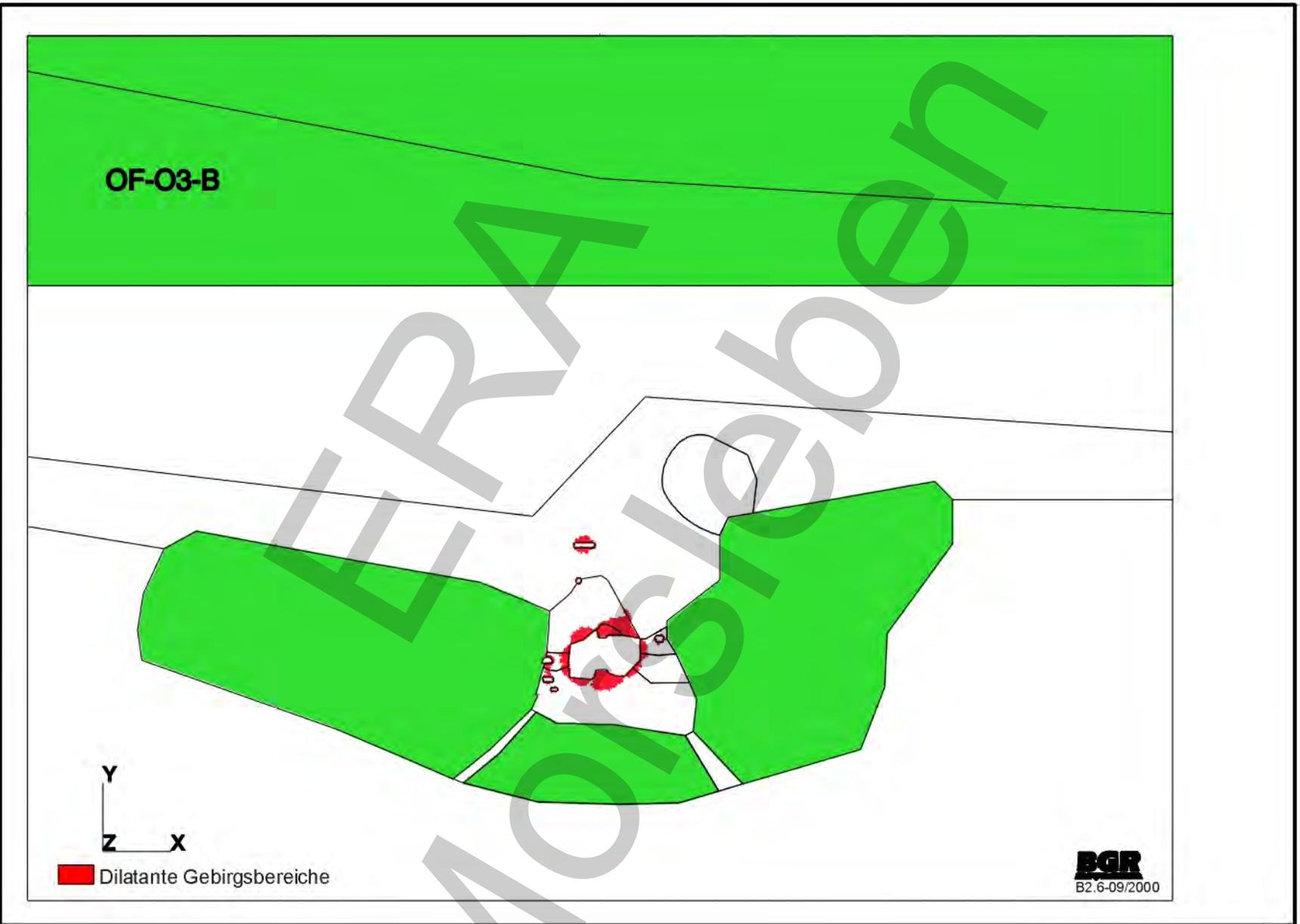
OF-O3-A: Basismodell  
Differenz zwischen Laugendruck und kleinster Hauptdruckspannung nach 45 Jahren



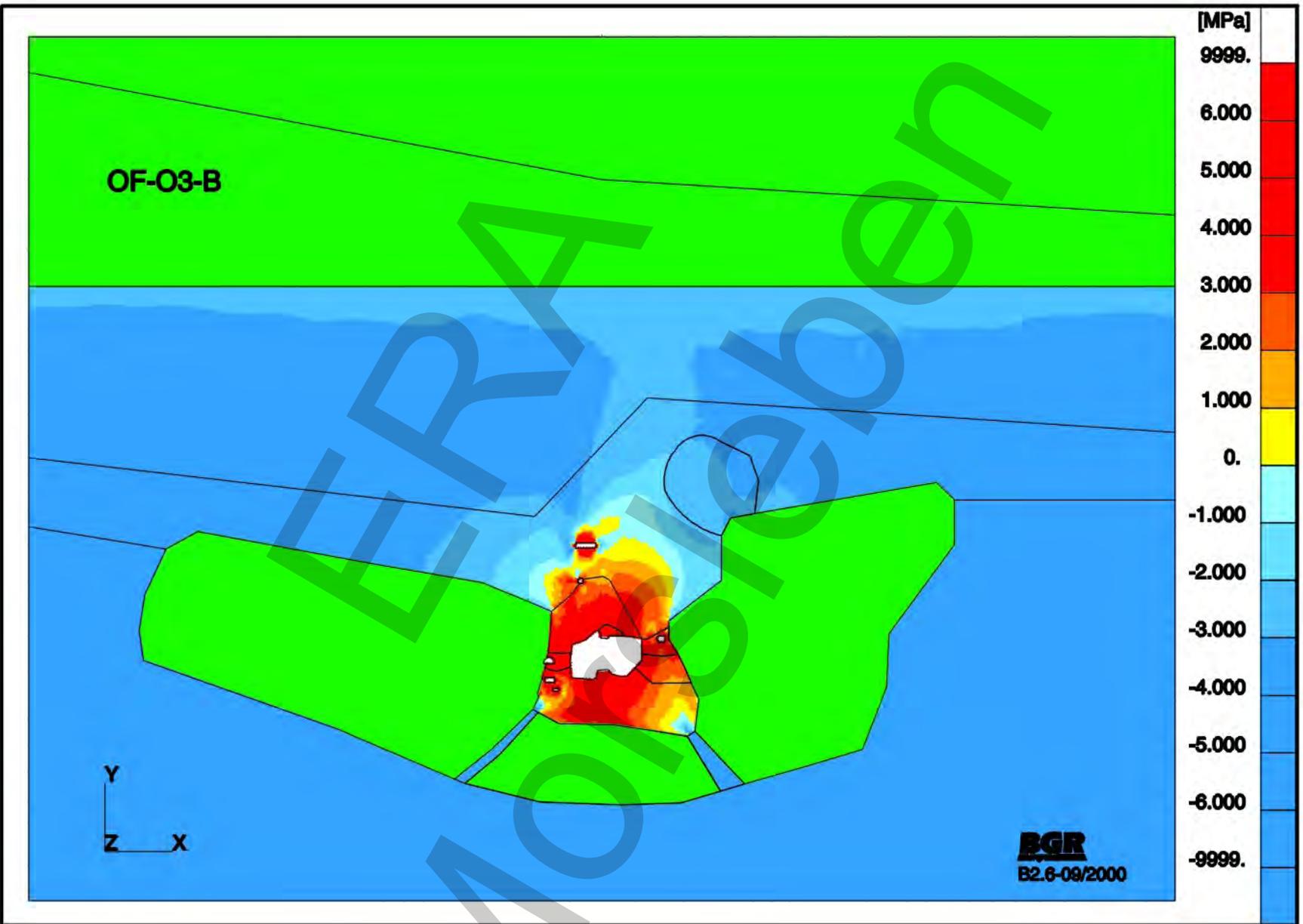
OF-03-A: Basismodell  
Differenz zwischen Laugendruck und kleinster Hauptdruckspannung nach 100 Jahren



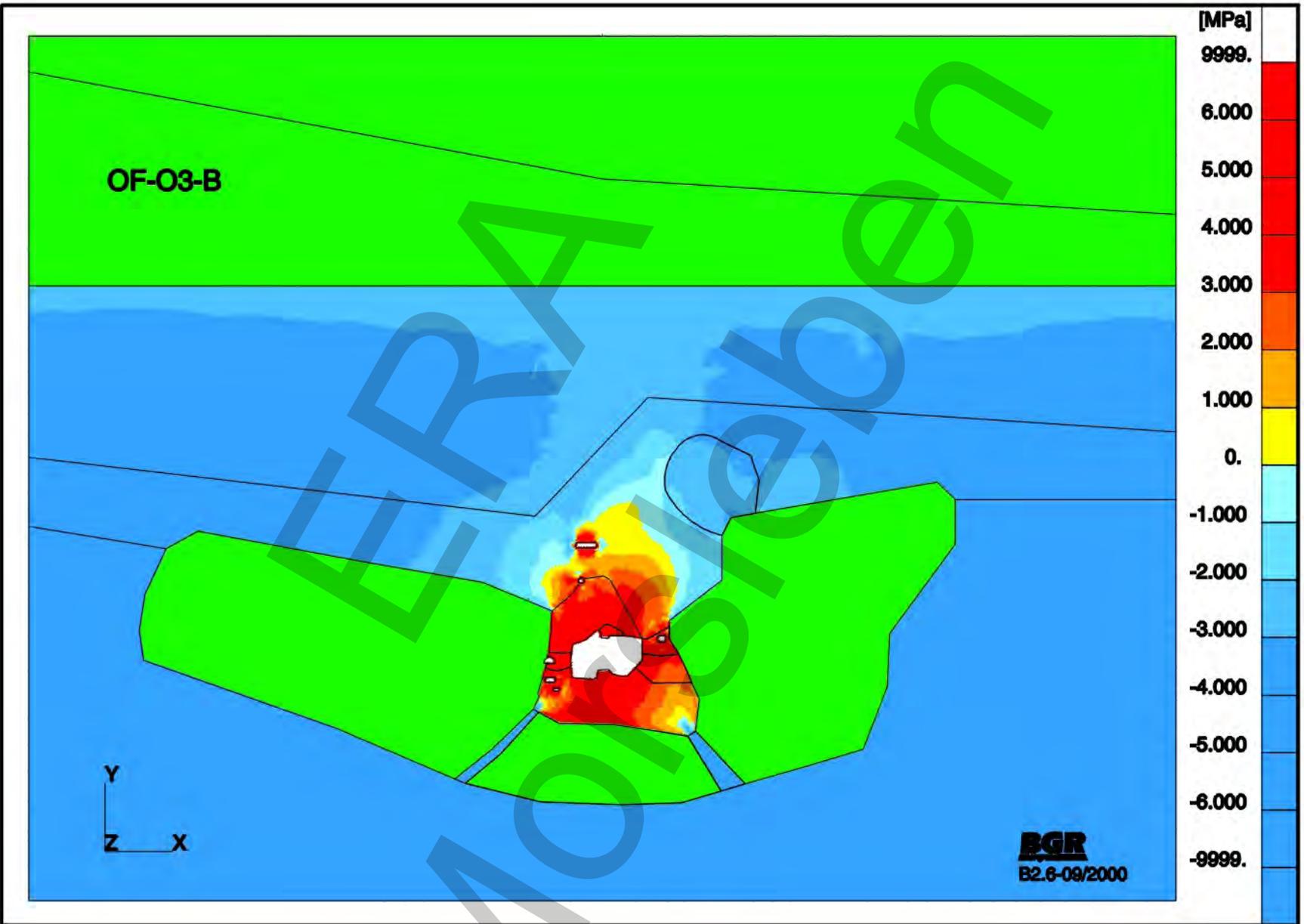
OF-03-B: Ohne Pfeiler zwischen den Abbauen 1 und 4  
Dilatante Gebirgsbereiche nach 45 Jahren



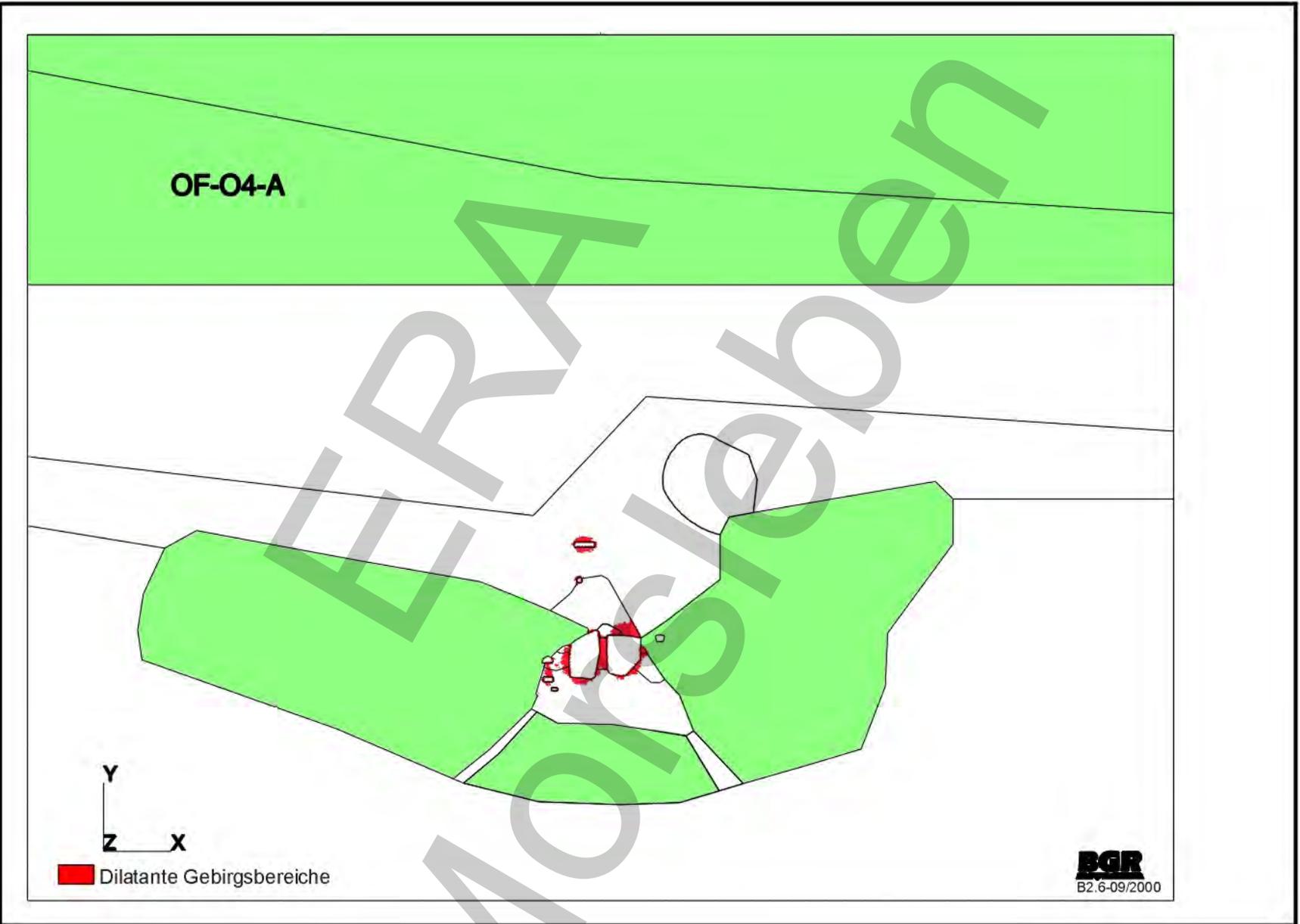
OF-03-B: Ohne Pfeiler zwischen den Abbauen 1 und 4  
Dilatante Gebirgsbereiche nach 100 Jahren



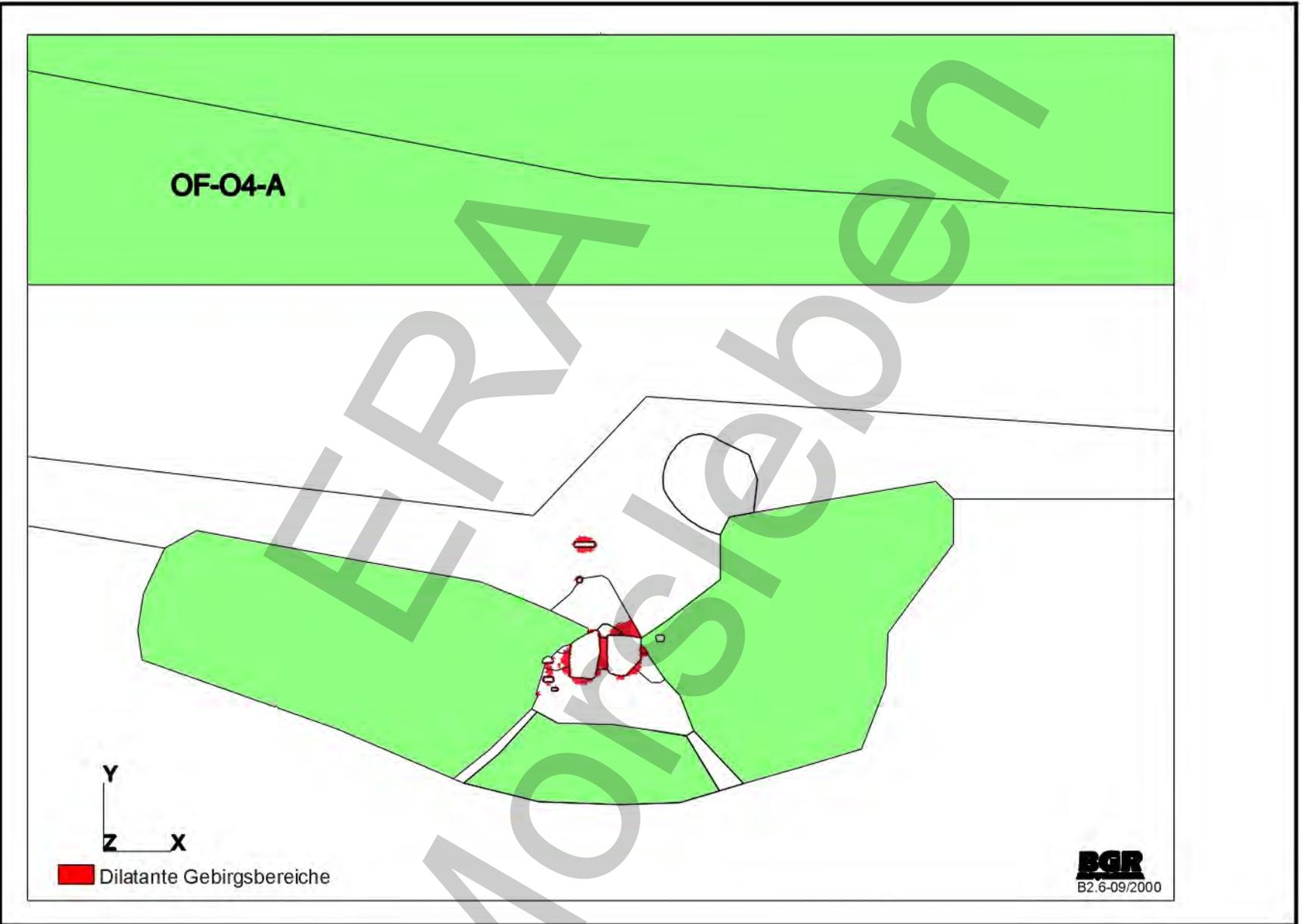
OF-O3-B: Ohne Pfeiler zwischen den Abbauen 1 und 4  
 Differenz zwischen Laugendruck und kleinster Hauptdruckspannung nach 45 Jahren



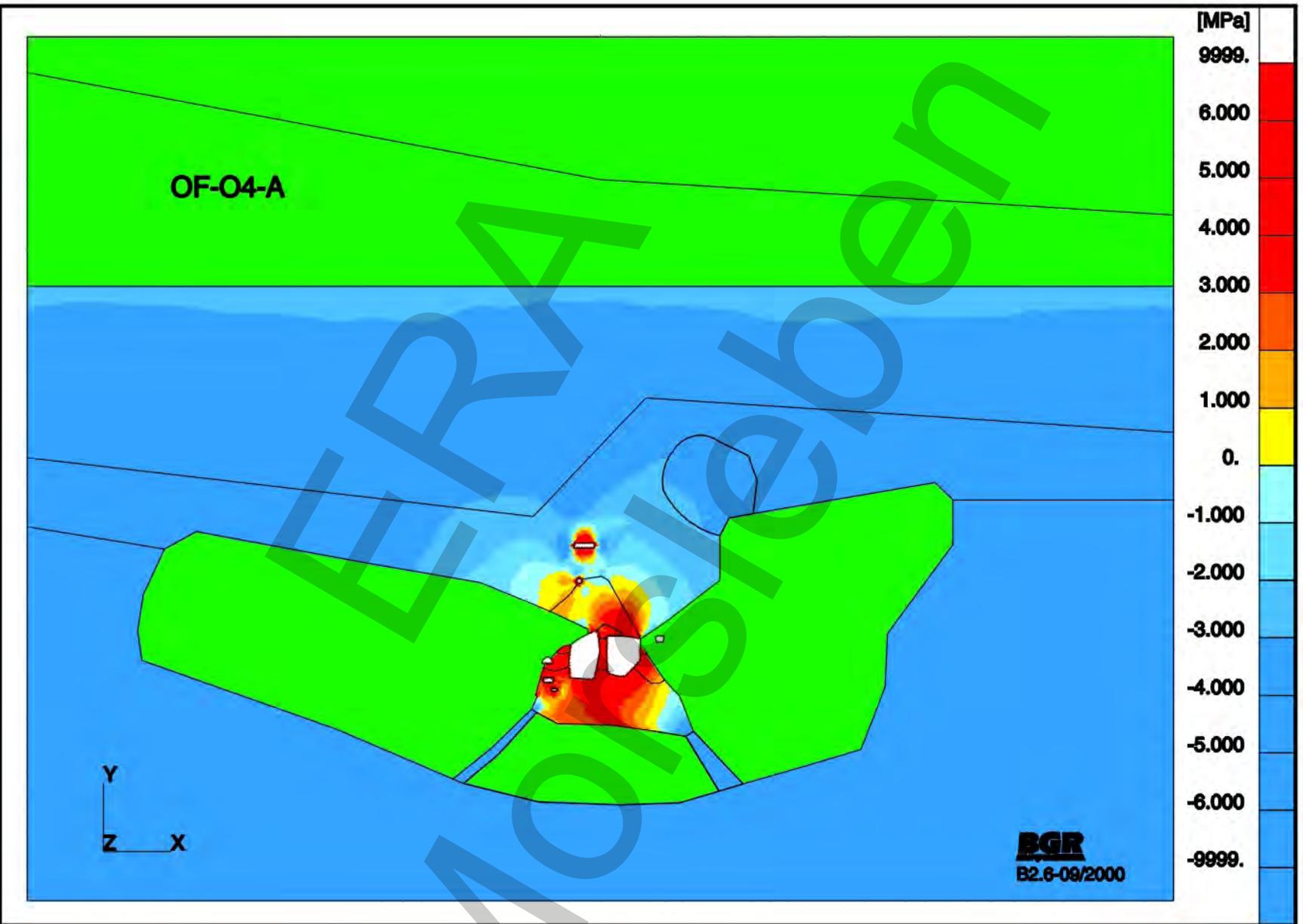
OF-O3-B: Ohne Pfeiler zwischen den Abbauen 1 und 4  
 Differenz zwischen Laugendruck und kleinster Hauptdruckspannung nach 100 Jahren



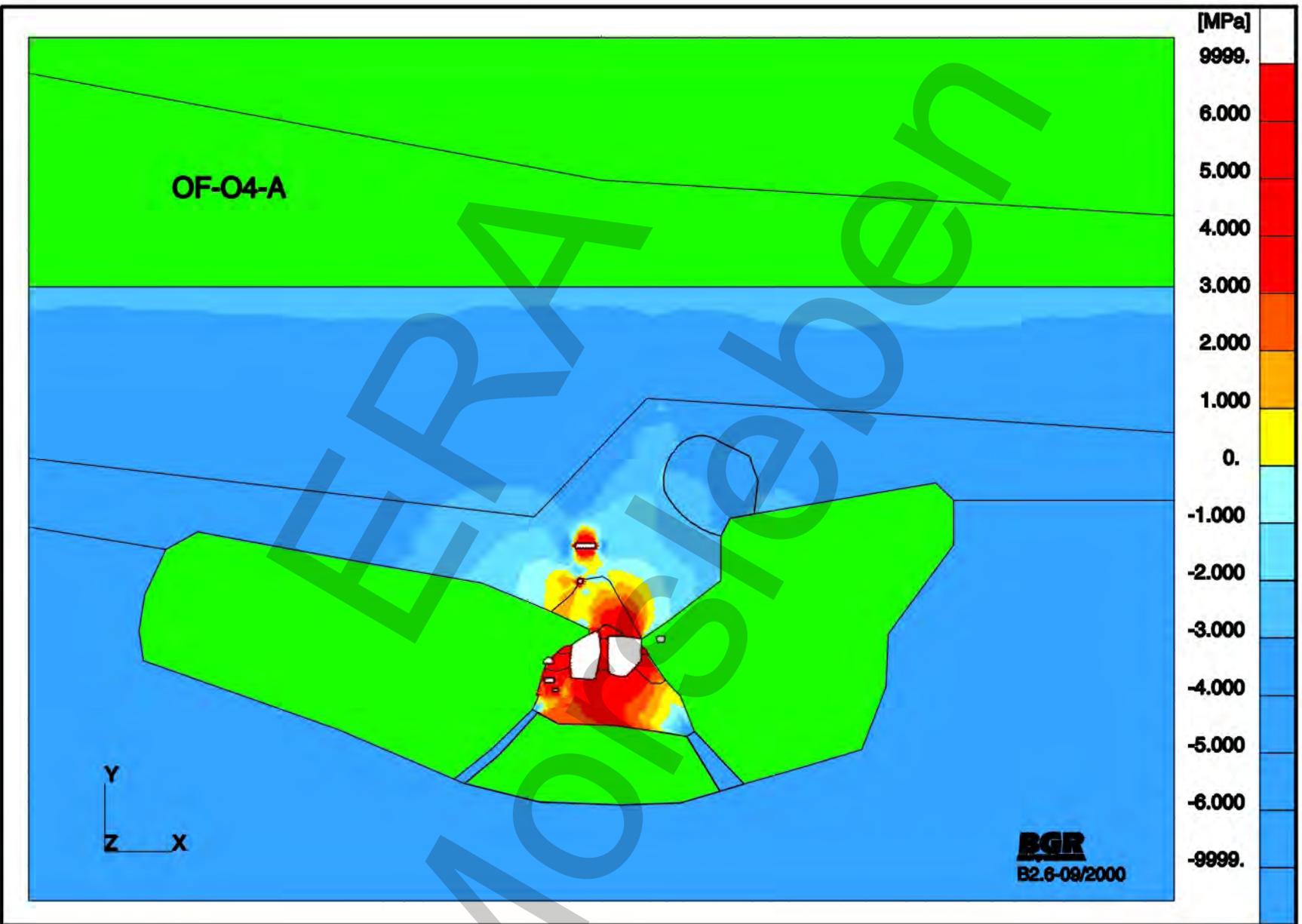
OF-O4-A: Anhydrit in der Firste des Abbaus 1  
Dilatante Gebirgsbereiche nach 45 Jahren



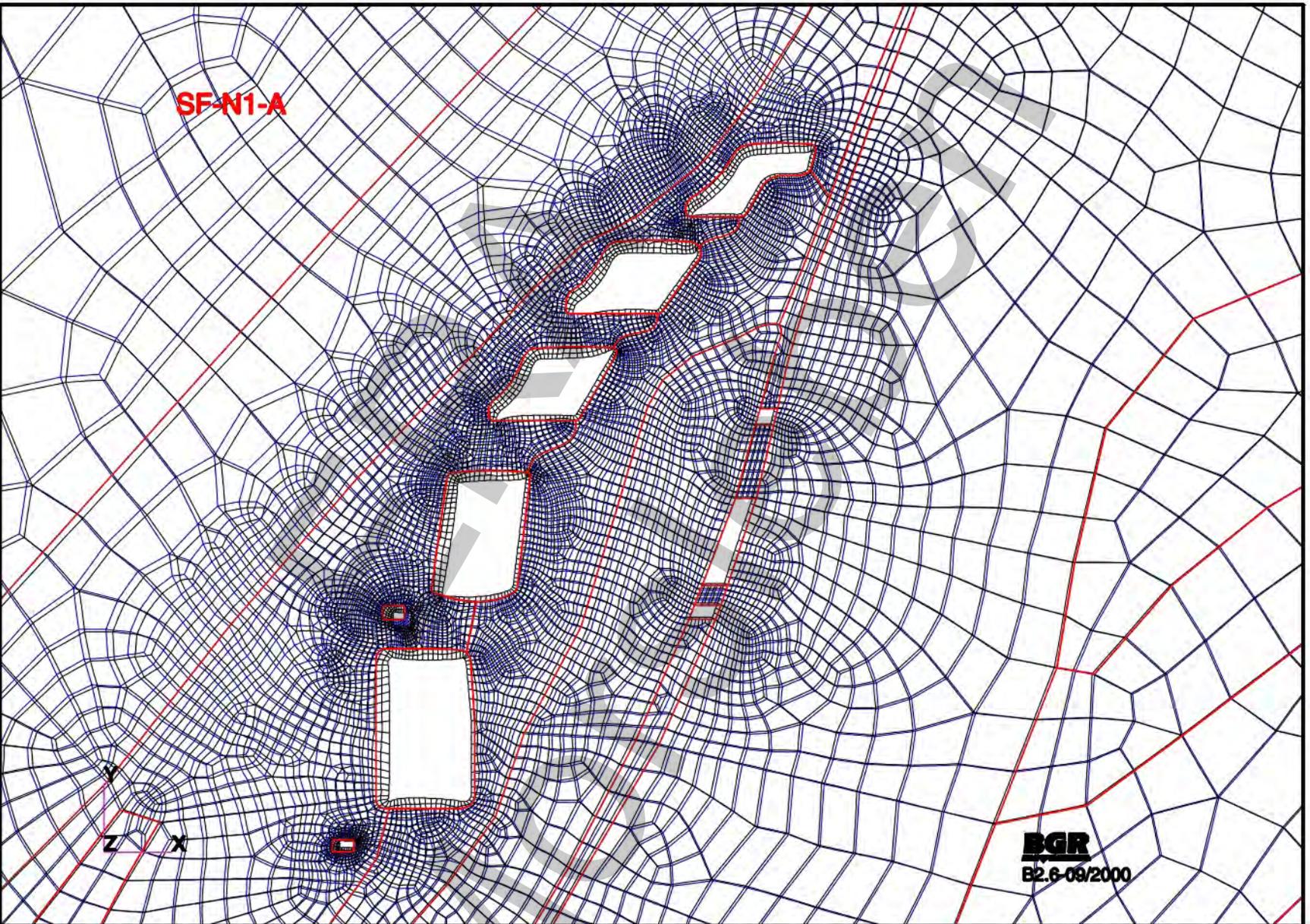
OF-O4-A: Anhydrit in der Firste des Abbaus 1  
Dilatante Gebirgsbereiche nach 100 Jahren



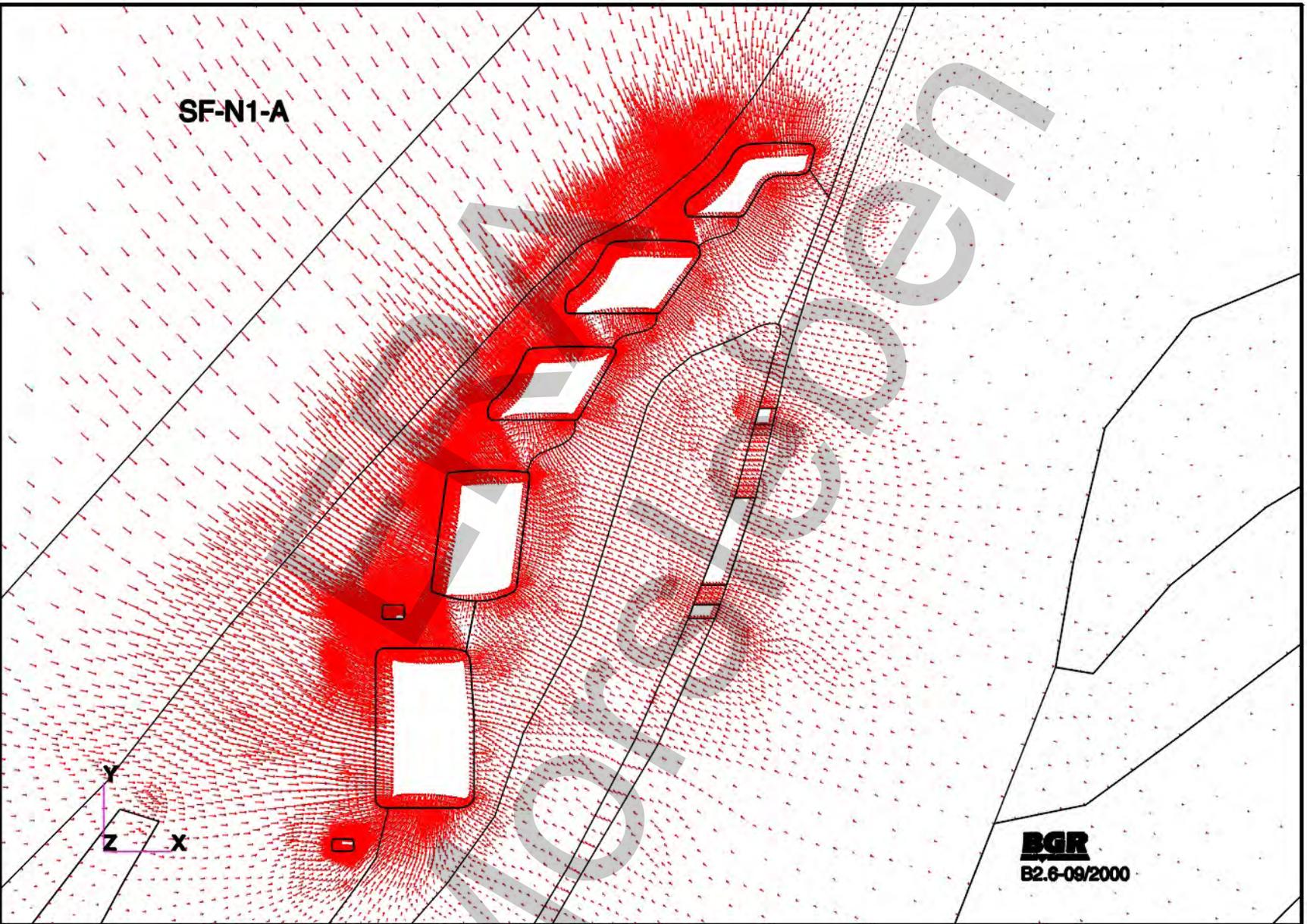
OF-O4-A: Anhydrit in der Firste des Abbaus 1  
Differenz zwischen Laugendruck und kleinster Hauptdruckspannung nach 45 Jahren



OF-O4-A: Anhydrit in der Firste des Abbaus 1  
 Differenz zwischen Laugendruck und kleinster Hauptdruckspannung nach 100 Jahren



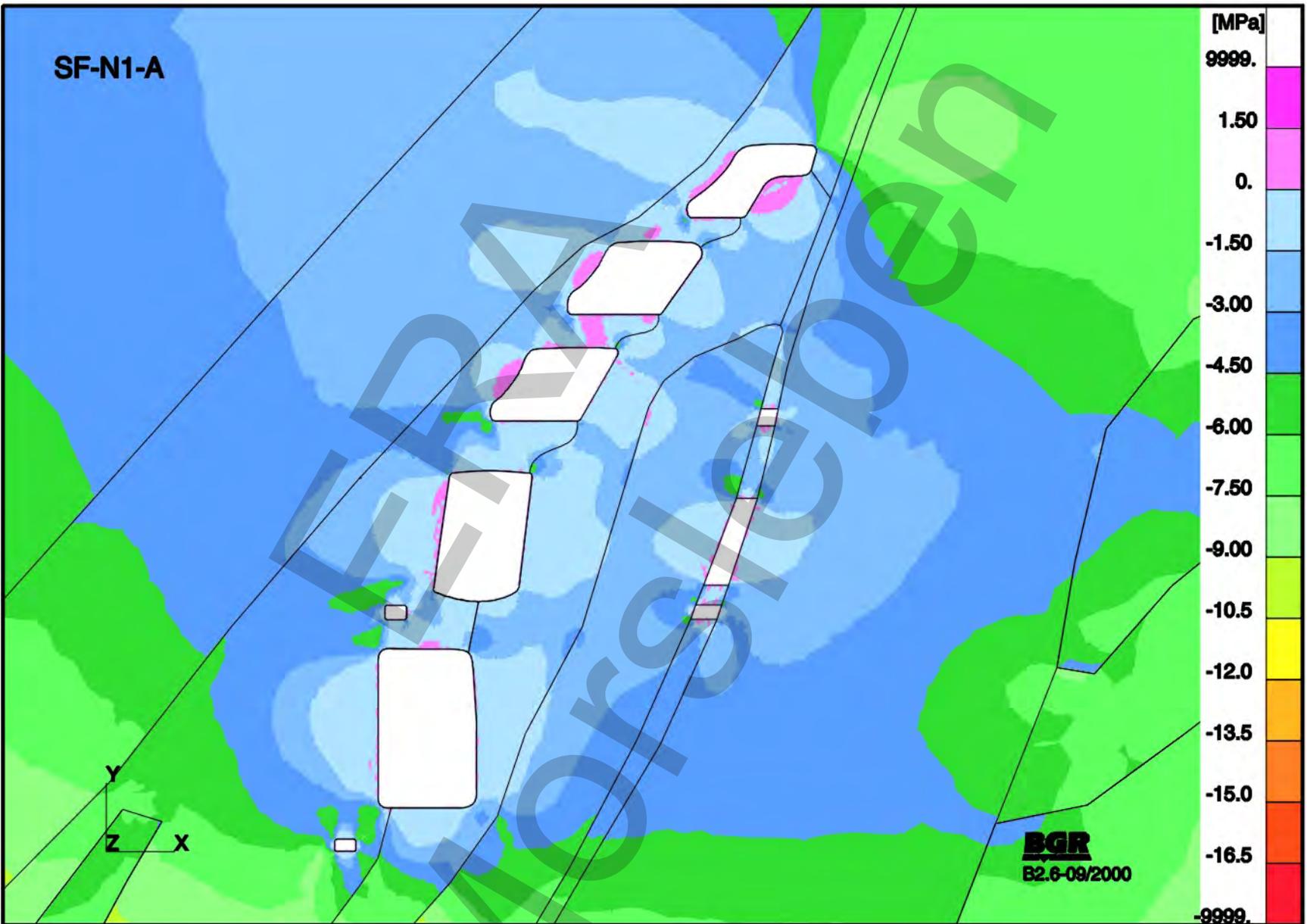
**SF-N1-A: Basismodell**  
Verformte Struktur nach 59 Jahren (Ausschnitt)  
(Skalierungsfaktor=10, unverformtes Modell=rot/blau, verformtes Modell=schwarz)



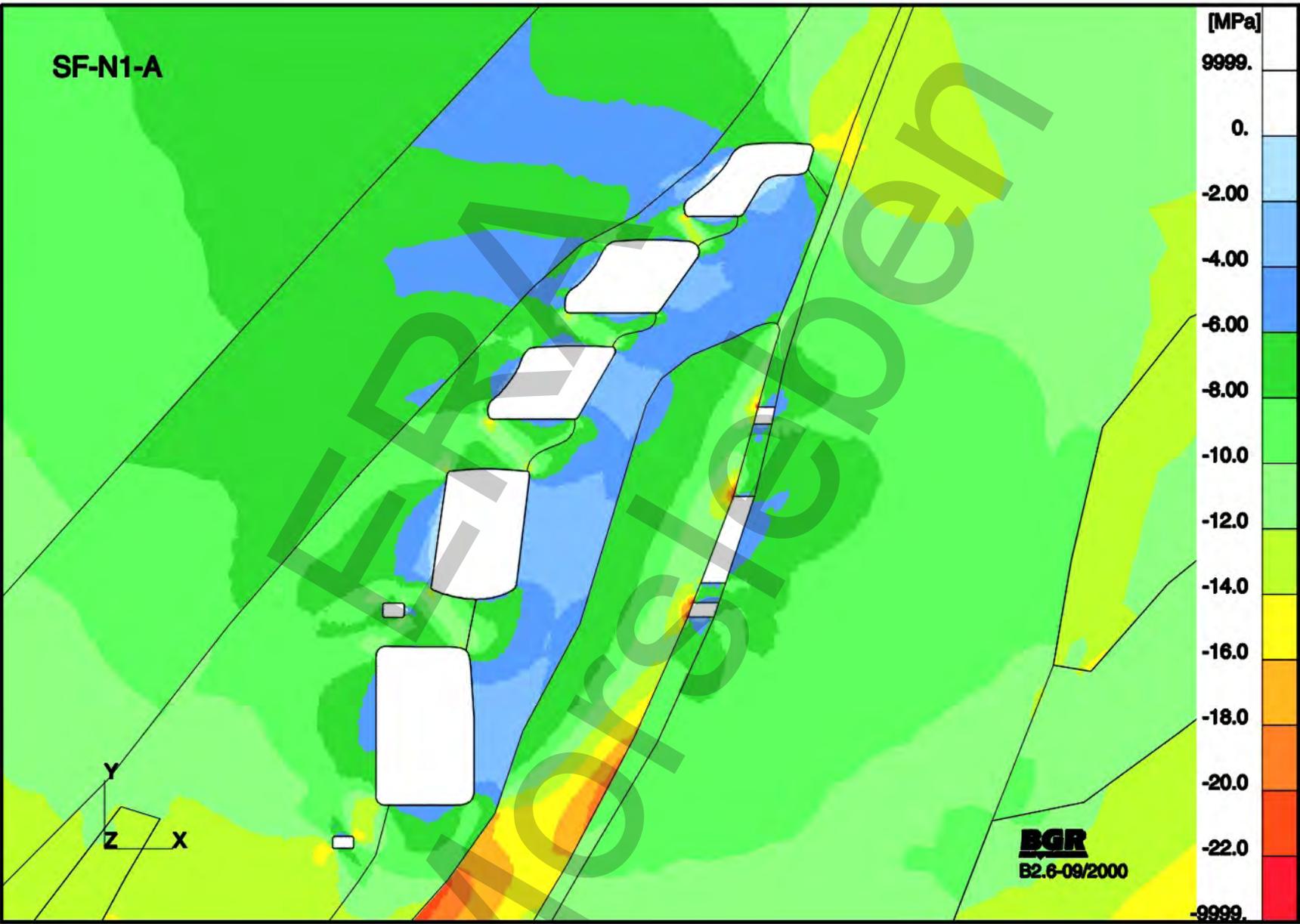
SF-N1-A

SF-N1-A: Basismodell  
Verschiebungsvektoren nach 59 Jahren (Ausschnitt)

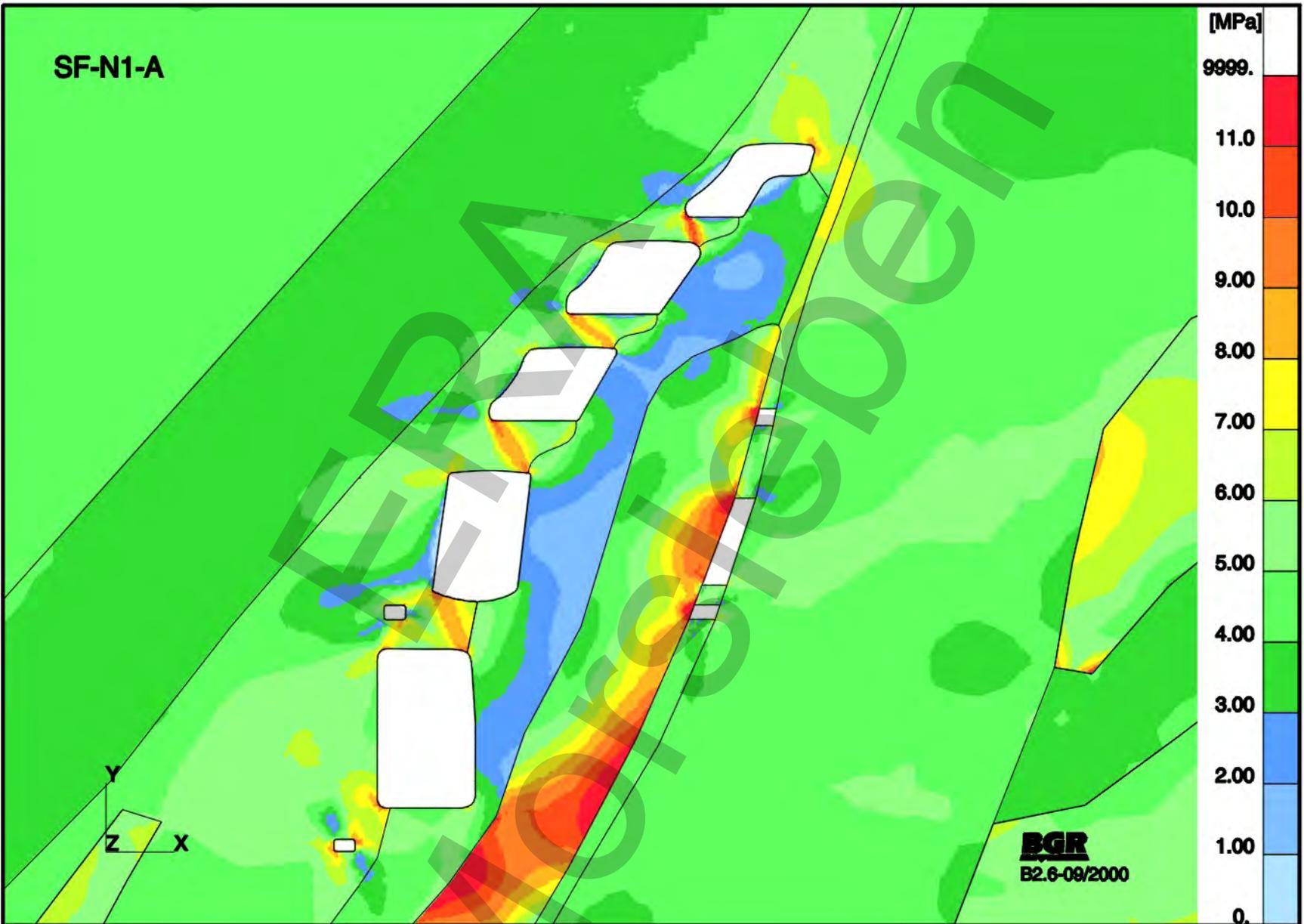
SF-N1-A: Basismodell  
Kleinste Hauptdruckspannungen S1 nach 100 Jahren (Ausschnitt)



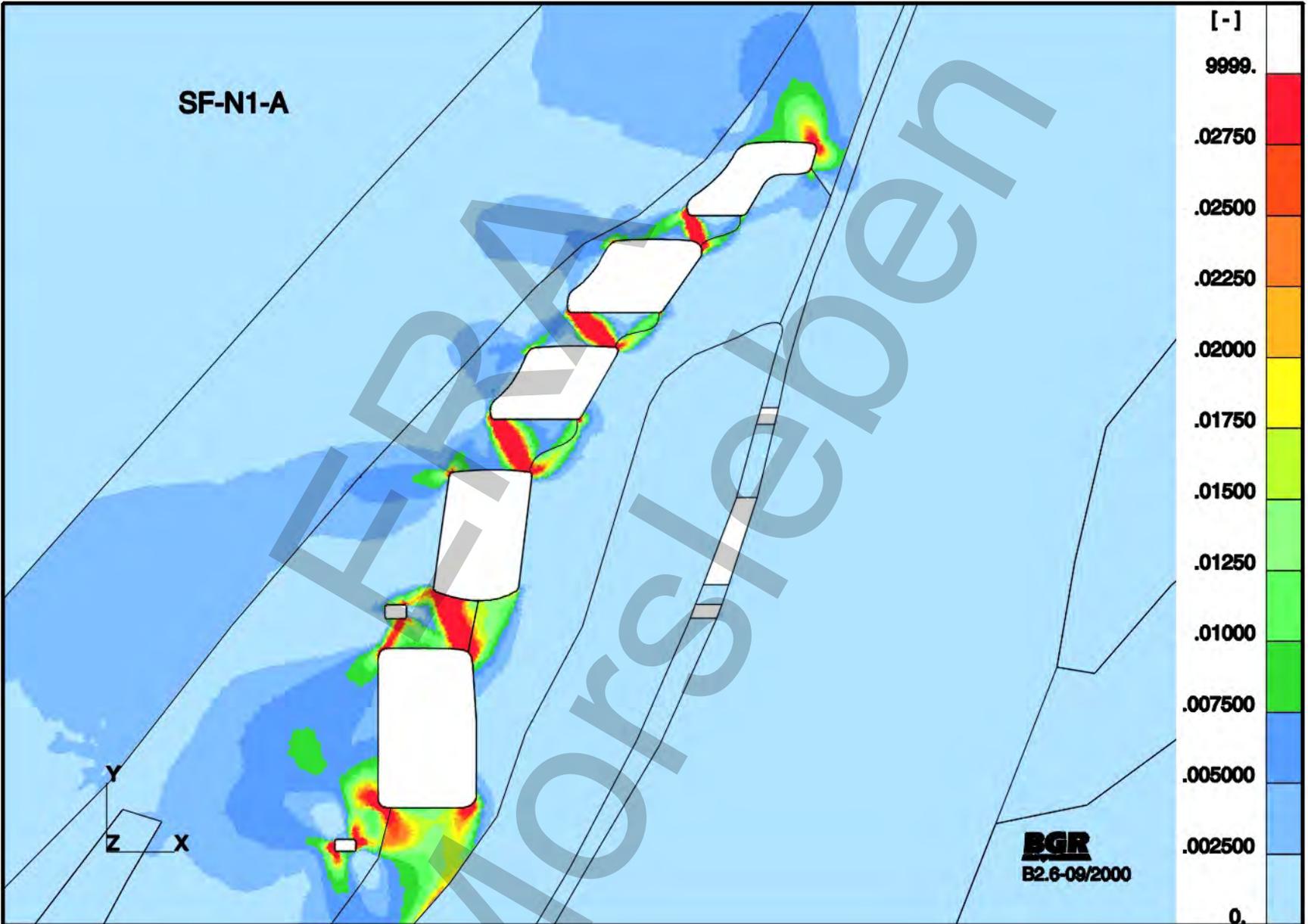
SF-N1-A: Basismodell  
Grossste Hauptdruckspannungen S2 nach 100 Jahren (Ausschnitt)



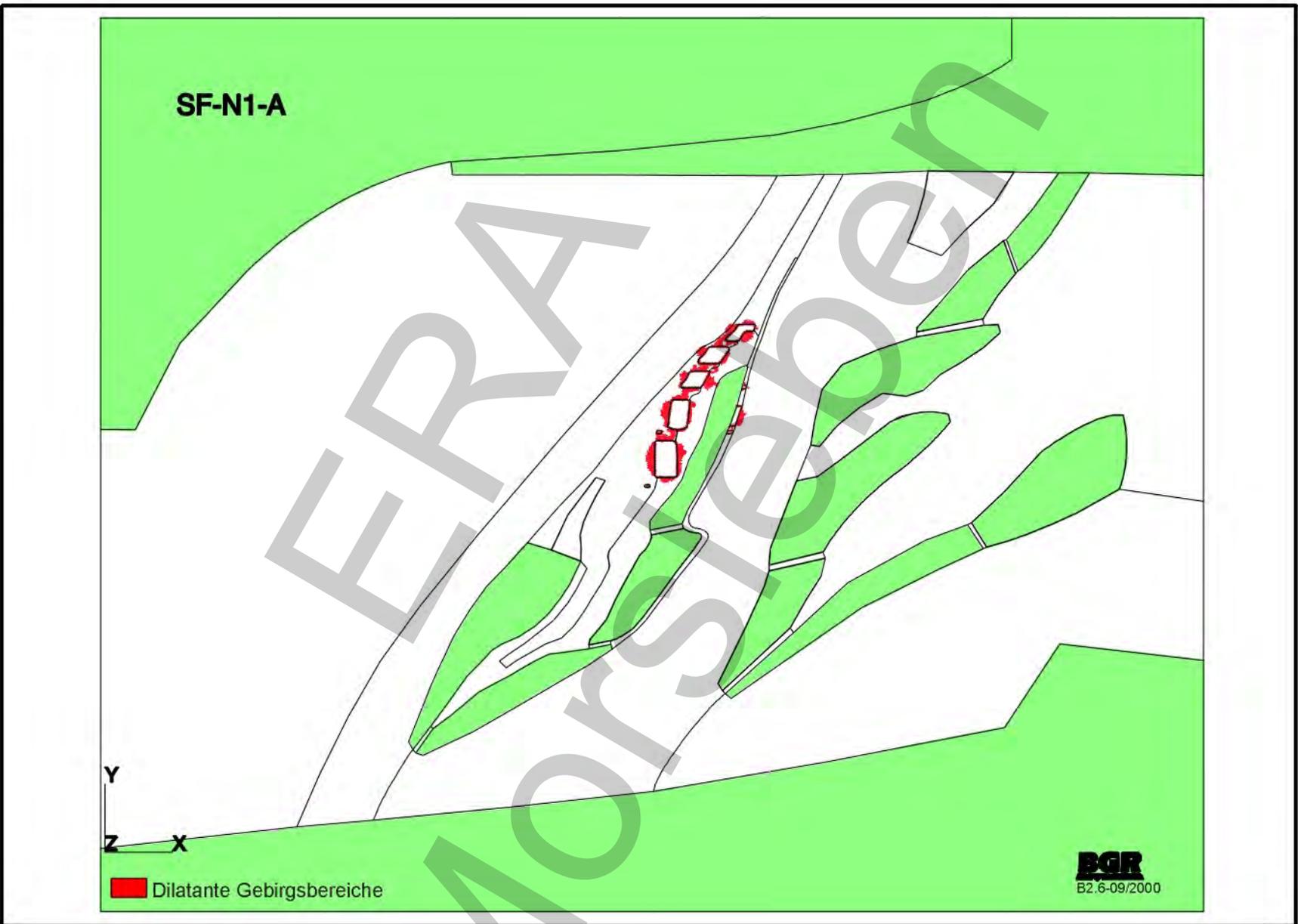
SF-N1-A: Basismodell  
Effektivspannungen nach 100 Jahren (Ausschnitt)

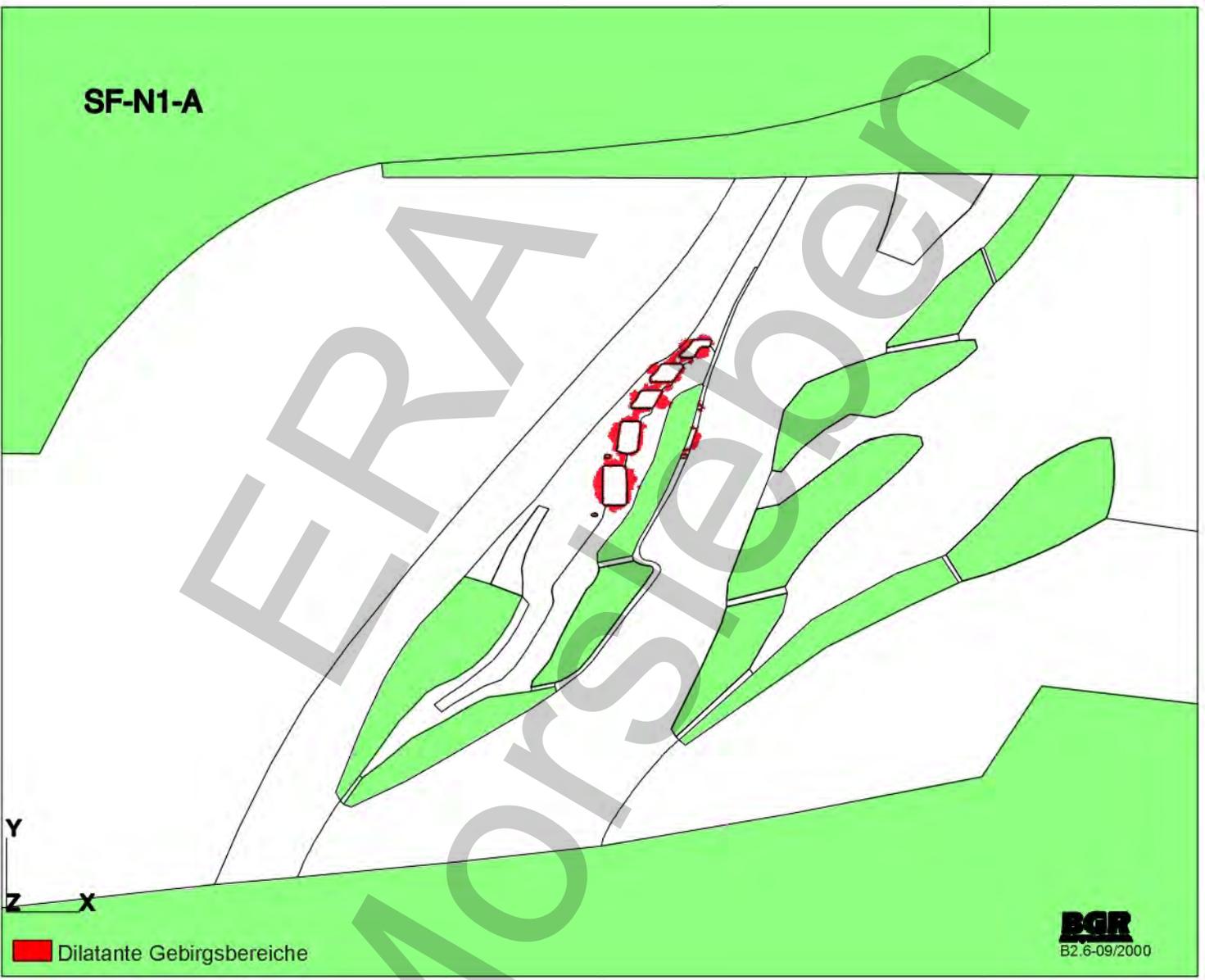


SF-N1-A: Basismodell  
Effektivverzerrungen nach 100 Jahren (Ausschnitt)

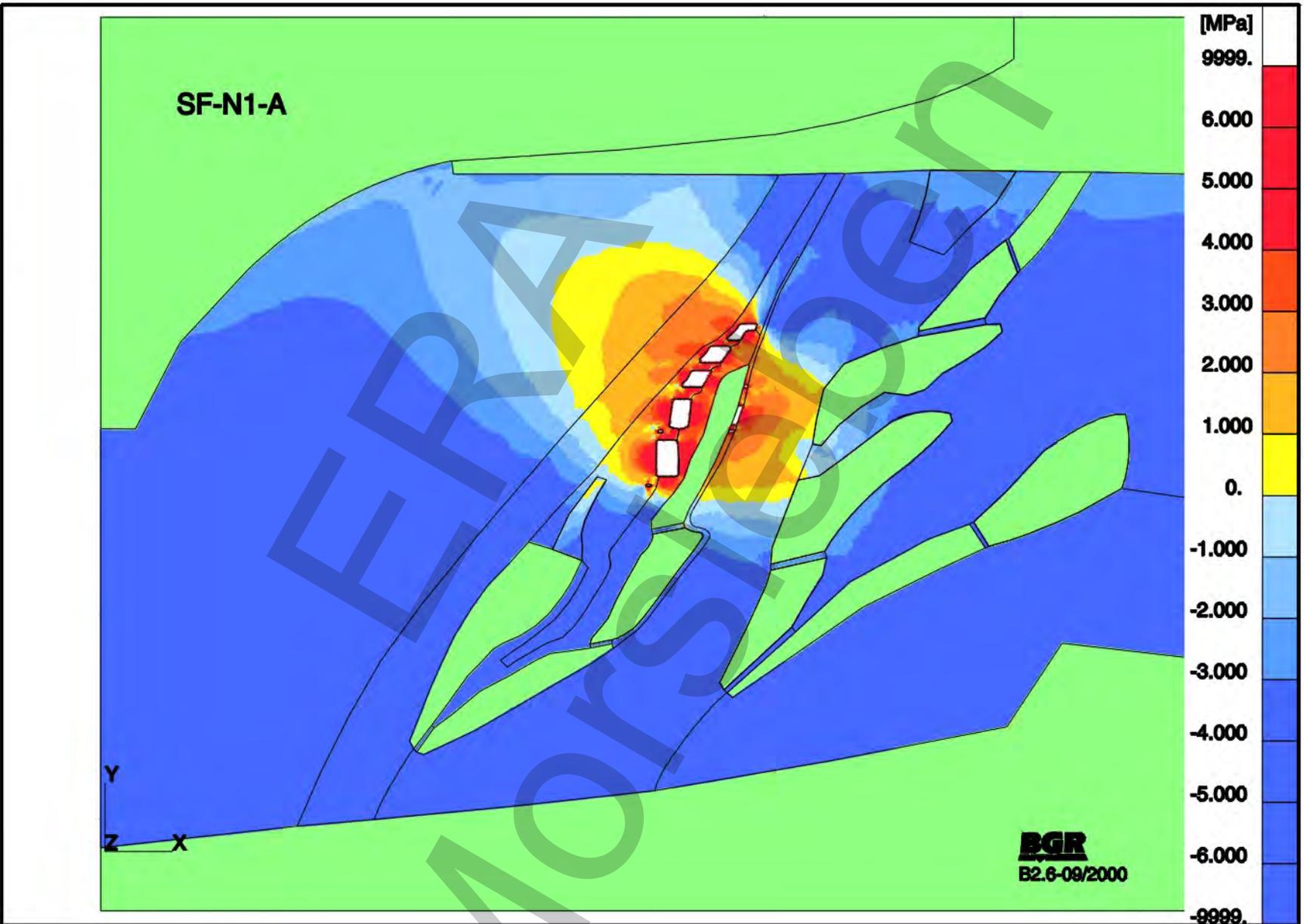


**SF-N1-A: Basismodell**  
**Dilatante Gebirgsbereiche nach 59 Jahren**

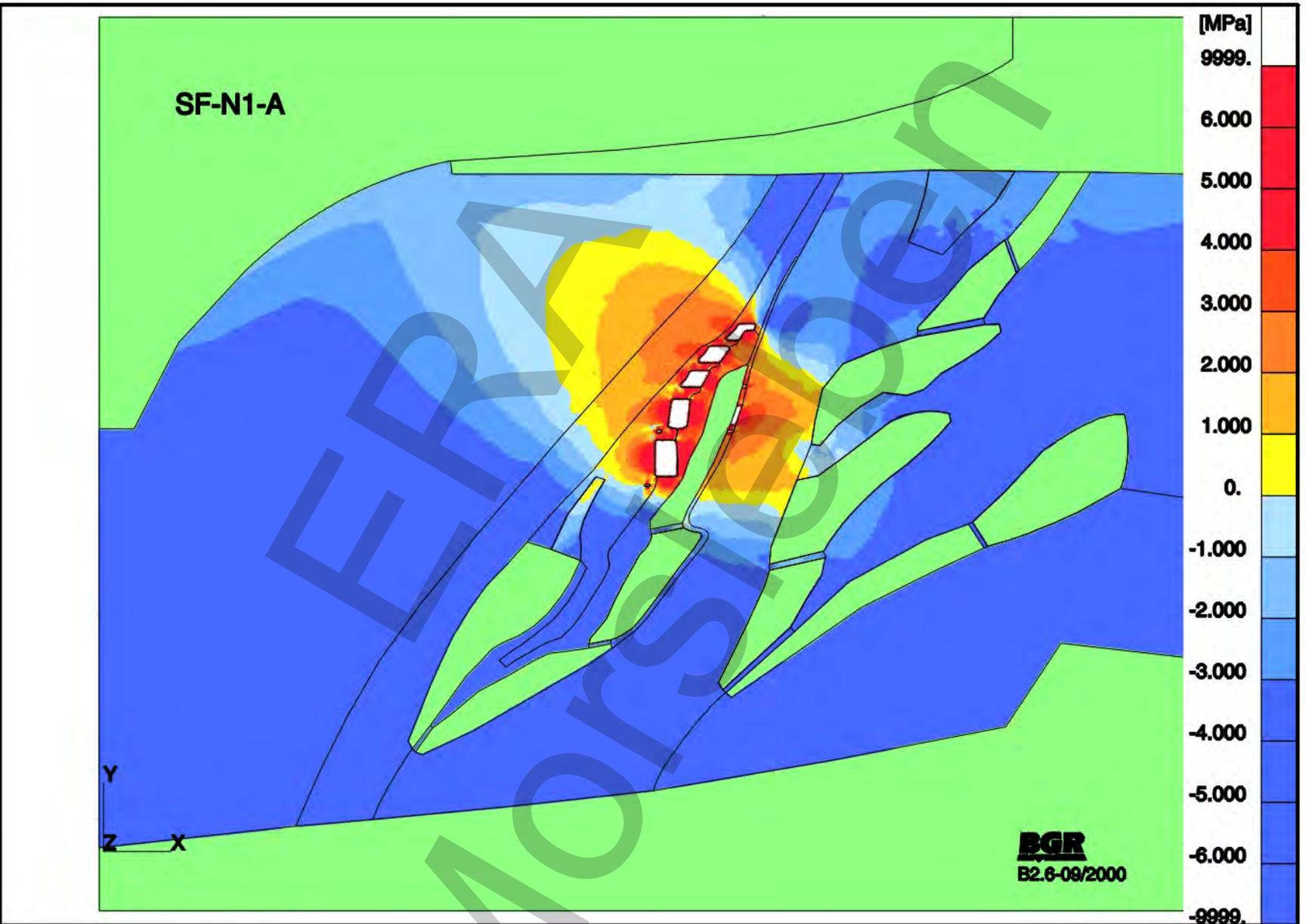




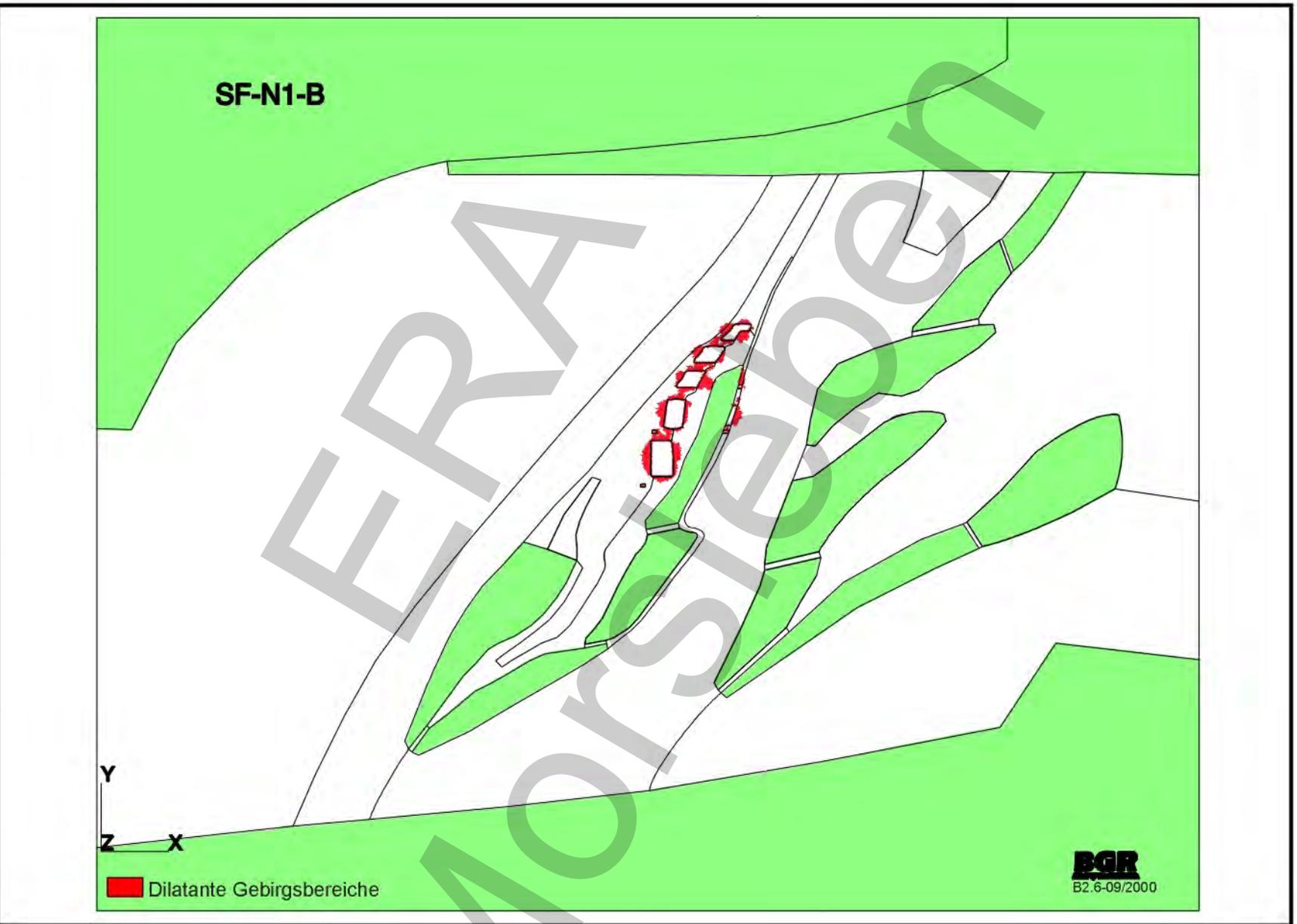
SF-N1-A: Basismodell  
Dilatante Gebirgsbereiche nach 100 Jahren



SF-N1-A: Basismodell  
 Differenz zwischen Laugendruck und kleinster Hauptdruckspannung nach 59 Jahren



SF-N1-A: Basismodell  
Differenz zwischen Laugendruck und kleinster Hauptdruckspannung nach 100 Jahren

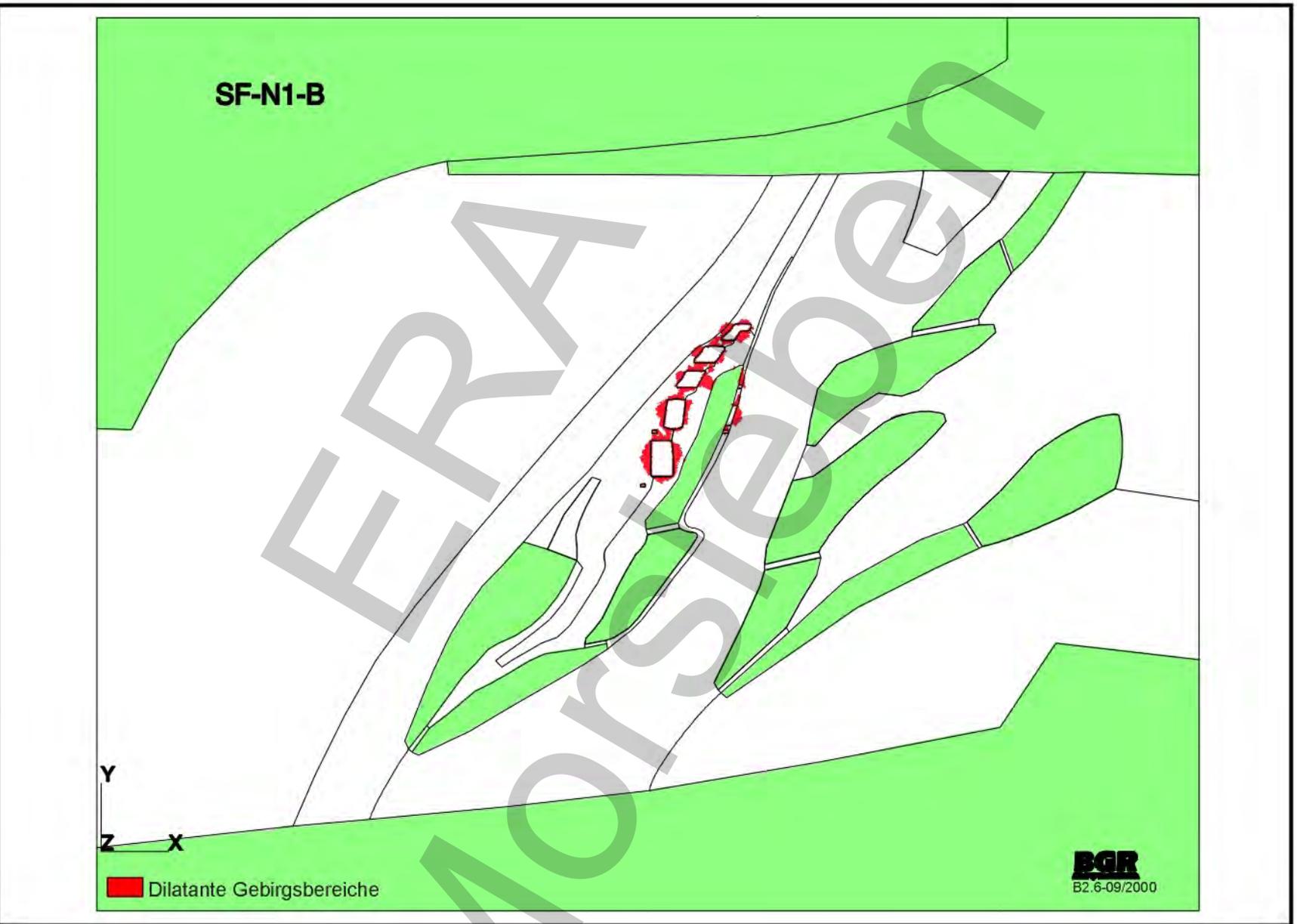


SF-N1-B

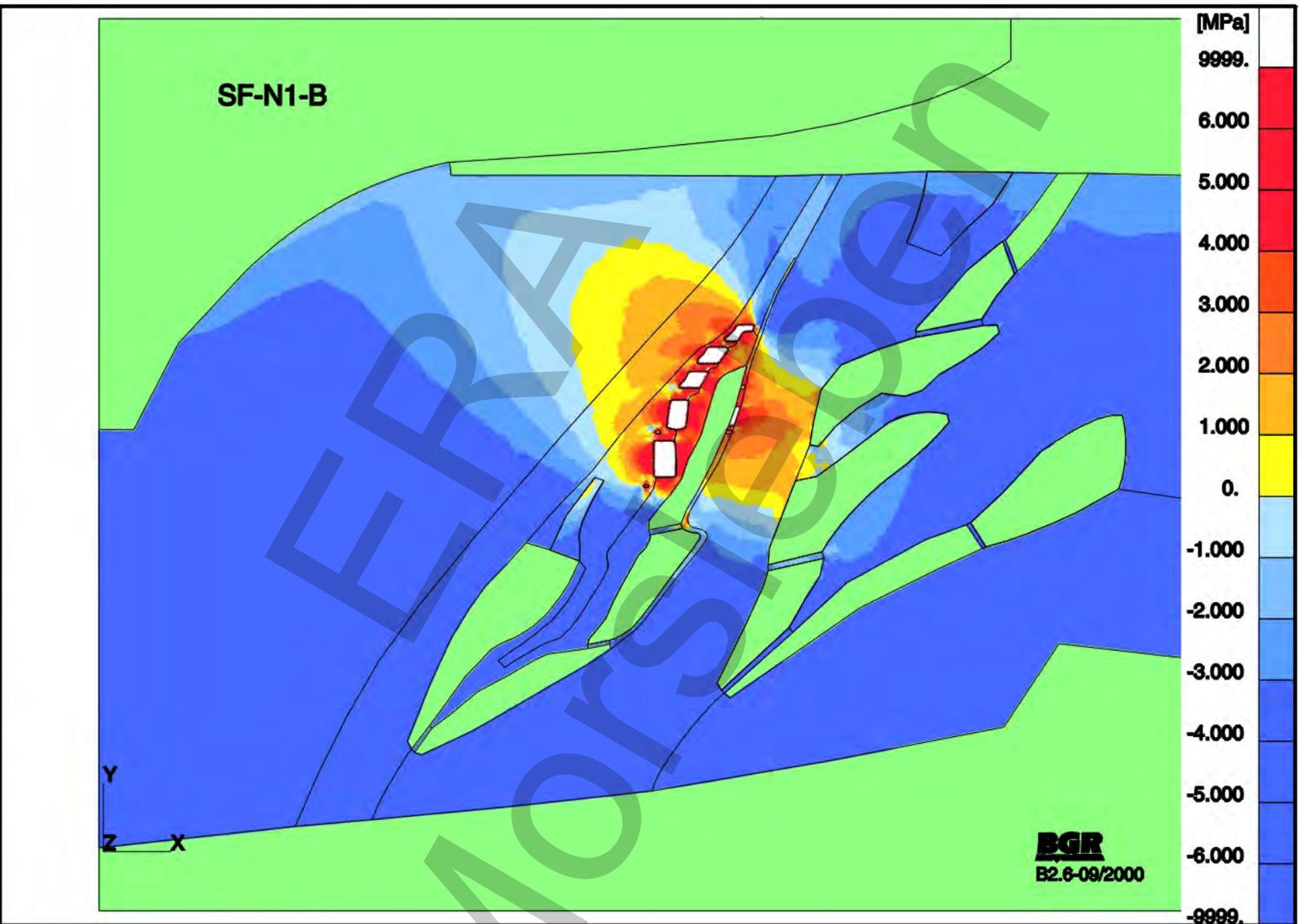
 Dilatante Gebirgsbereiche

**BGR**  
B2.6-09/2000

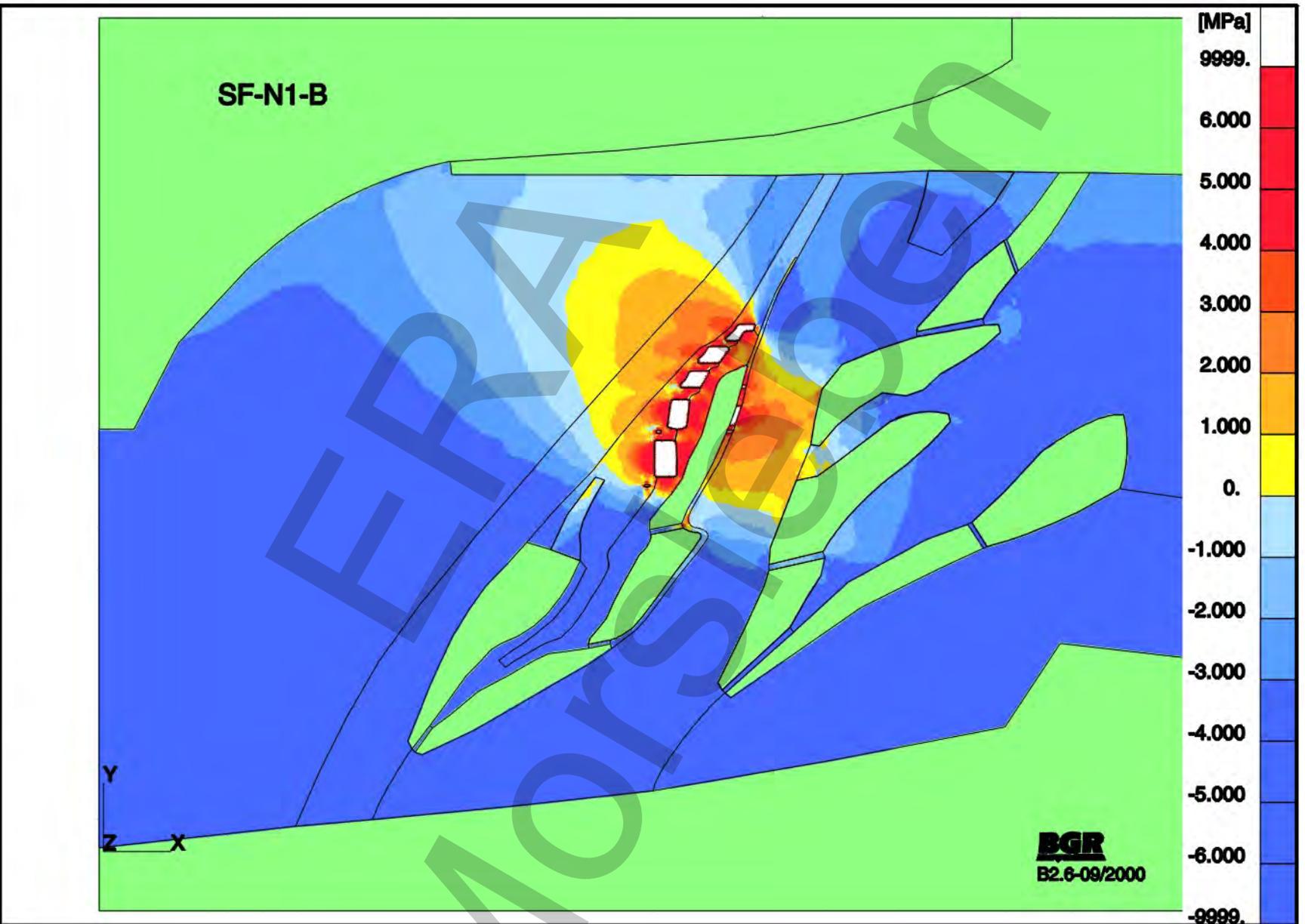
SF-N1-B: Höhere Duktilität der Homogenbereiche z2(West) und z2HS(Ost)  
Dilatante Gebirgsbereiche nach 59 Jahren



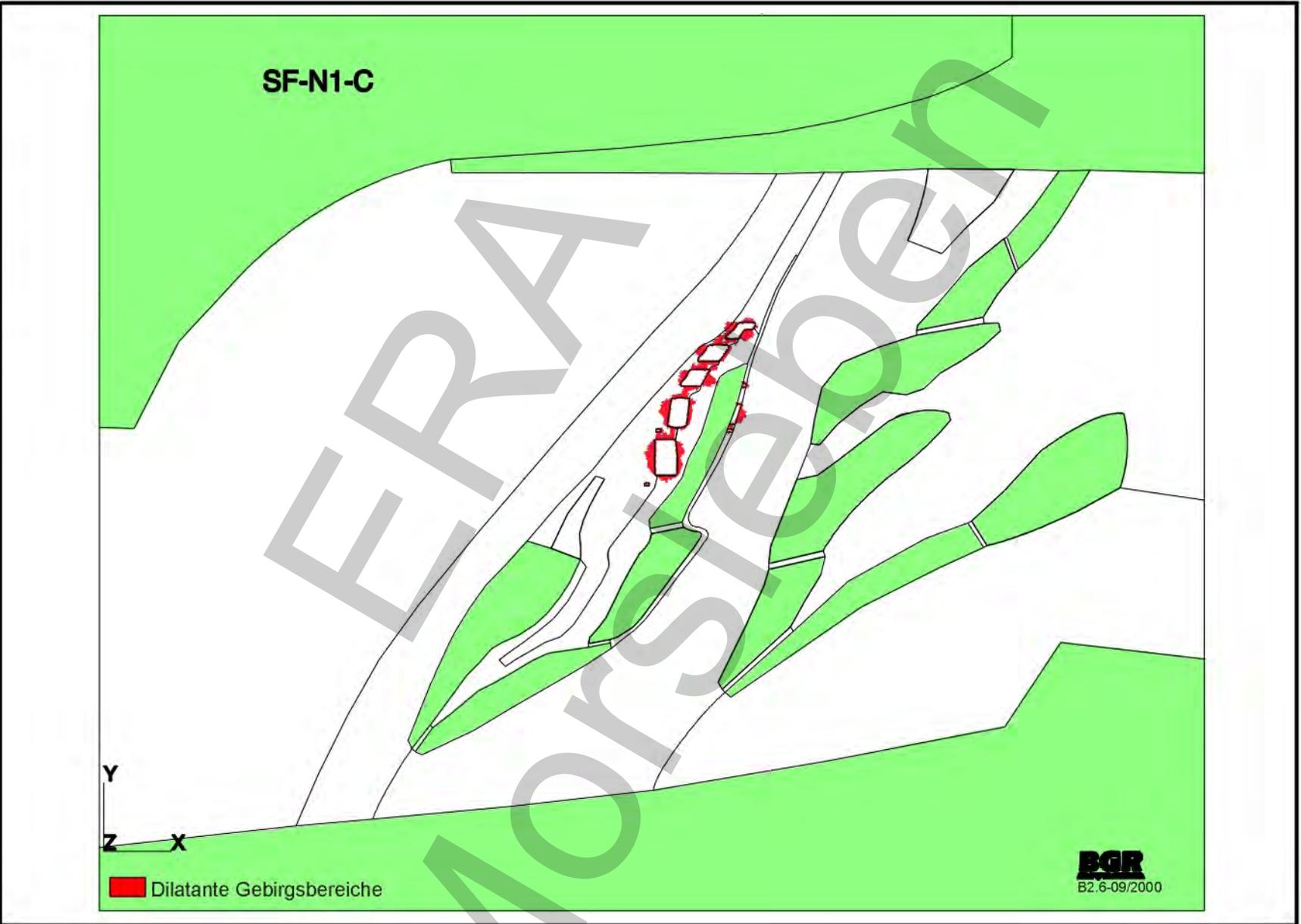
SF-N1-B: Höhere Duktilität der Homogenbereiche z2(West) und z2HS(Ost)  
Dilatante Gebirgsbereiche nach 100 Jahren



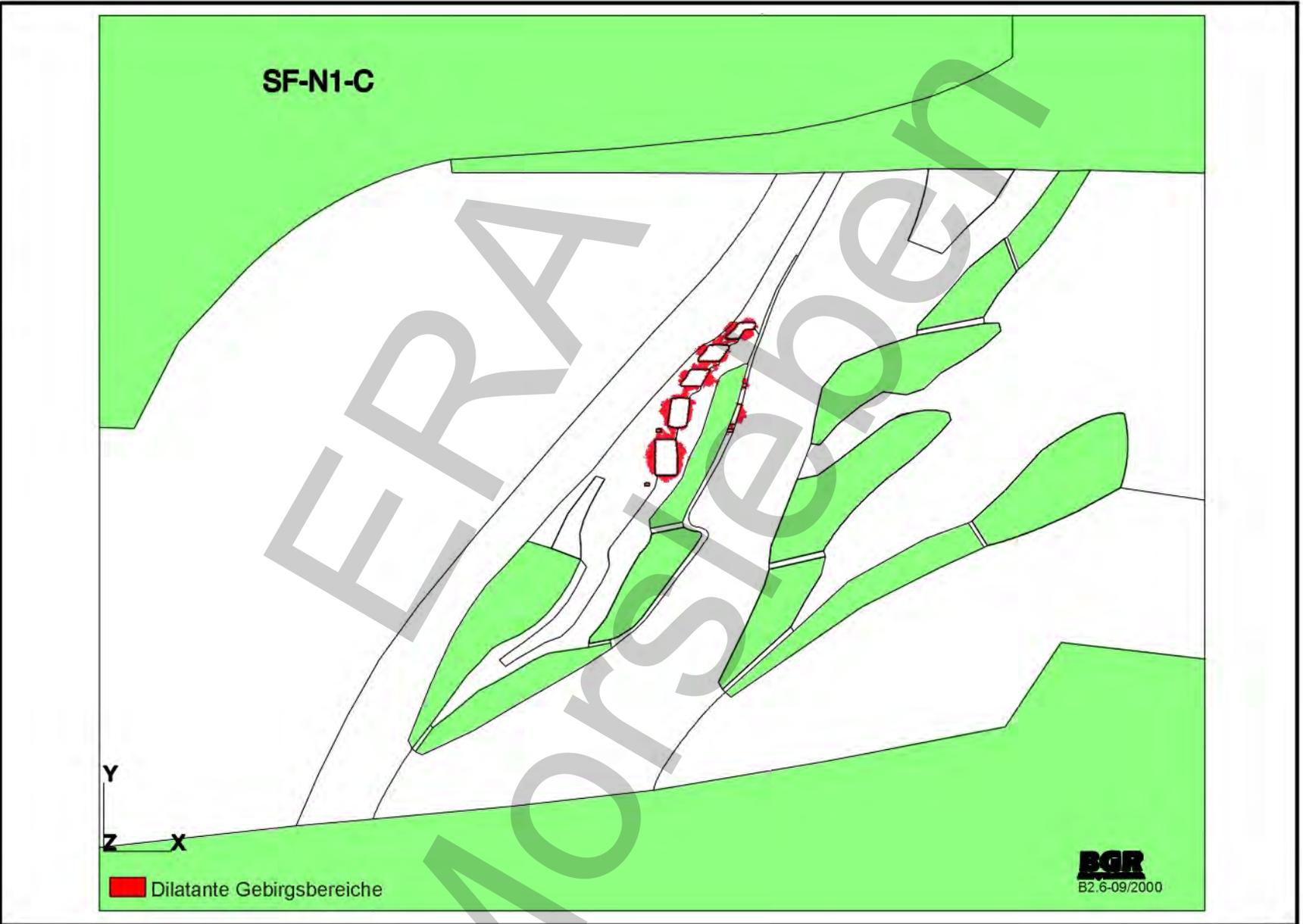
SF-N1-B: Hoehere Duktilitaet der Homogenbereiche z2(West) und z2HS(Ost)  
Differenz zwischen Laugendruck und kleinster Hauptdruckspannung nach 59 Jahren



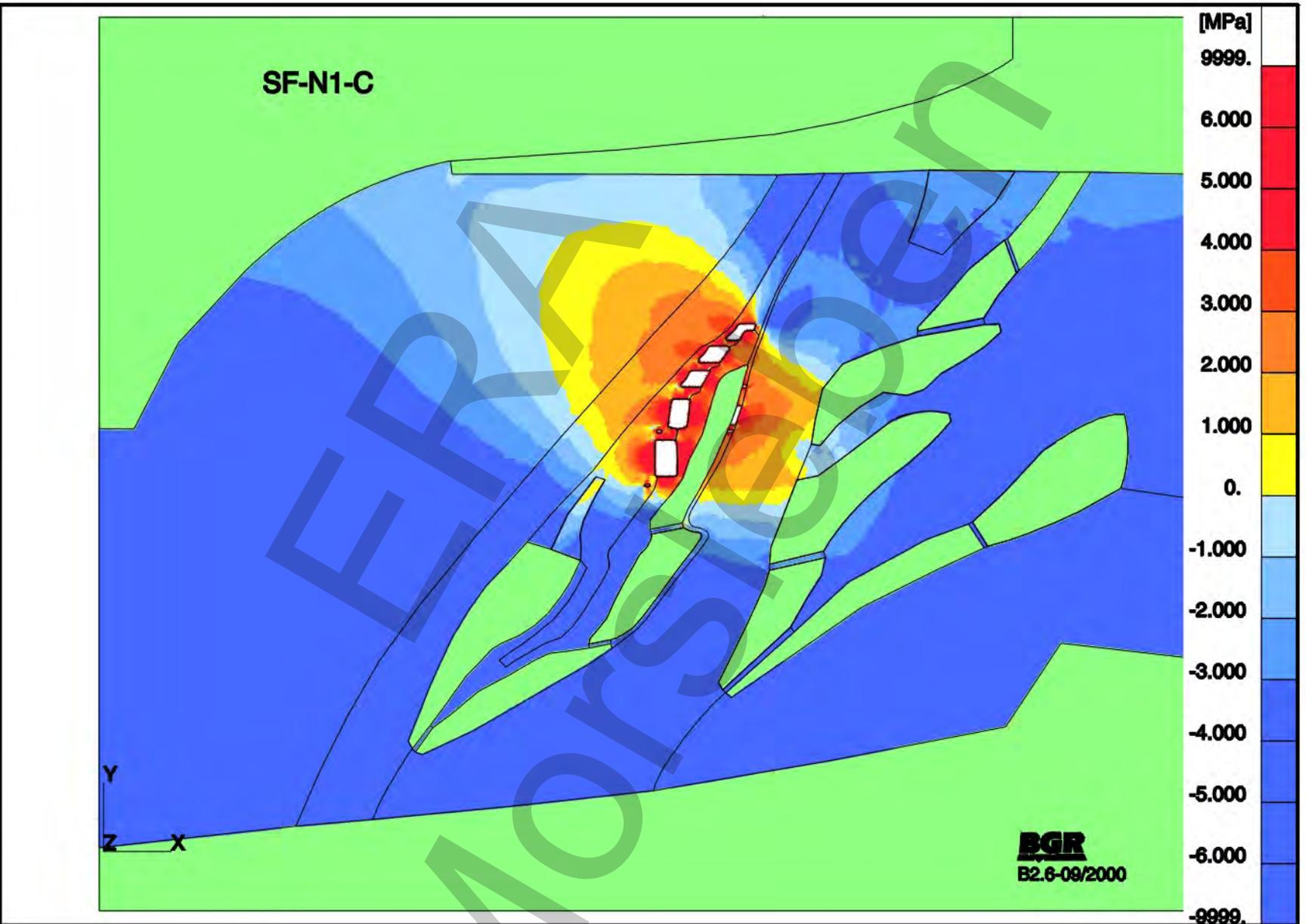
SF-N1-B: Höhere Duktilität der Homogenbereiche z2(West) und z2HS(Ost)  
 Differenz zwischen Laugendruck und kleinster Hauptdruckspannung nach 100 Jahren



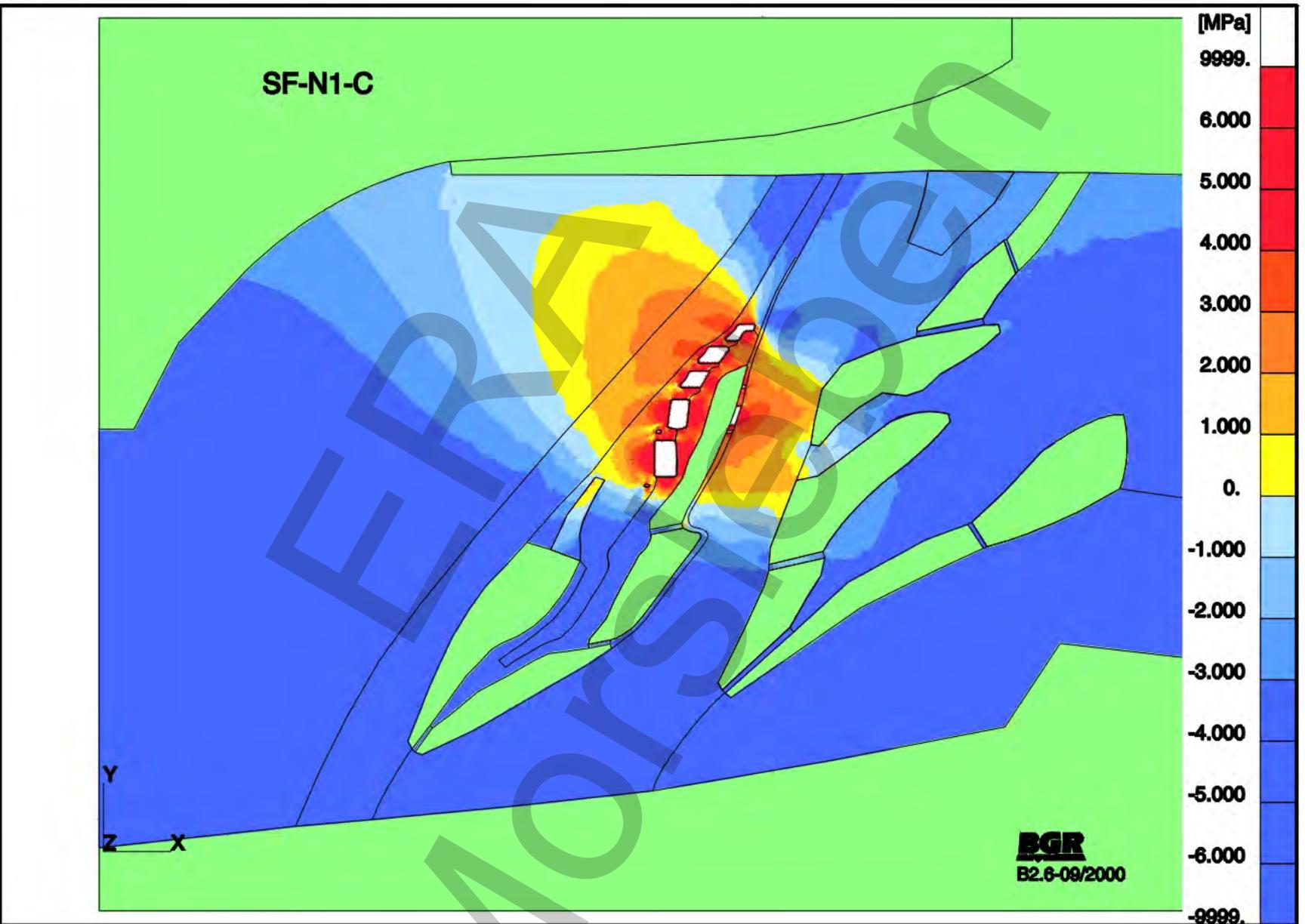
**SF-N1-C: Steireres Deckgebirge  
Dilatante Gebirgsbereiche nach 59 Jahren**



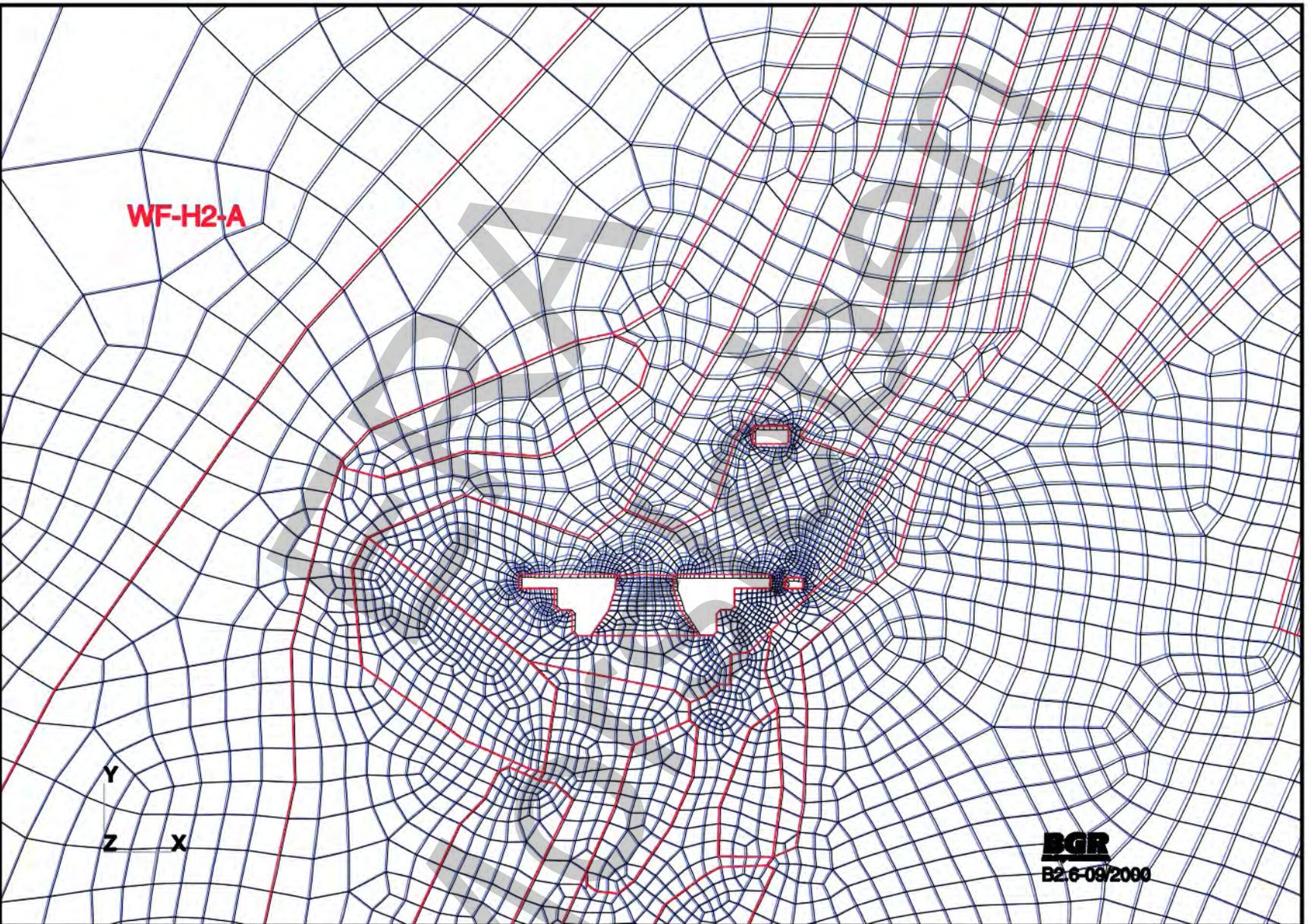
**SF-N1-C: Steireres Deckgebirge  
Dilatante Gebirgsbereiche nach 100 Jahren**



SF-N1-C: Steireres Deckgebirge  
 Differenz zwischen Laugendruck und kleinster Hauptdruckspannung nach 59 Jahren



SF-N1-C: Steireres Deckgebirge  
 Differenz zwischen Laugendruck und kleinster Hauptdruckspannung nach 100 Jahren

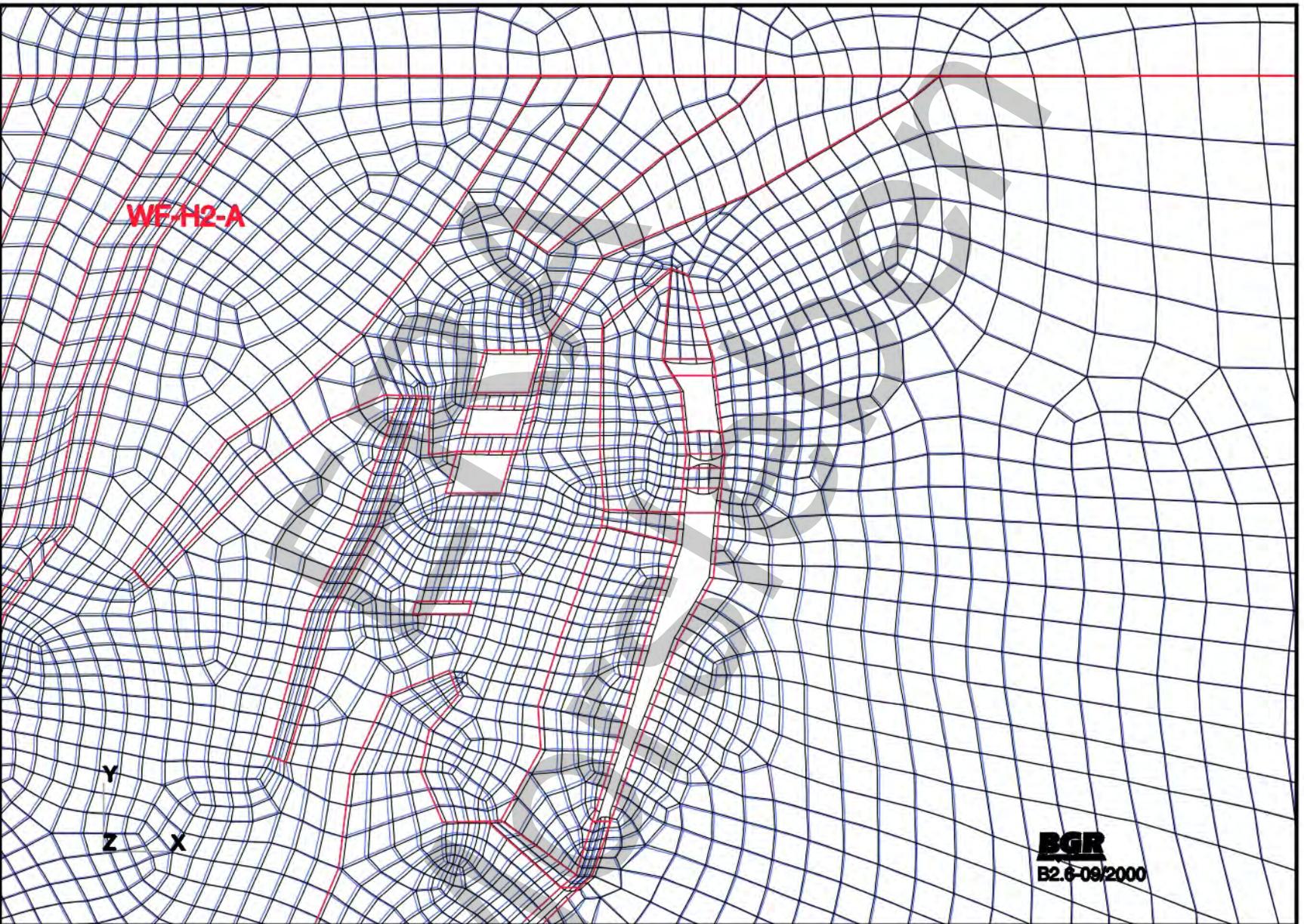


**WF-H2-A**

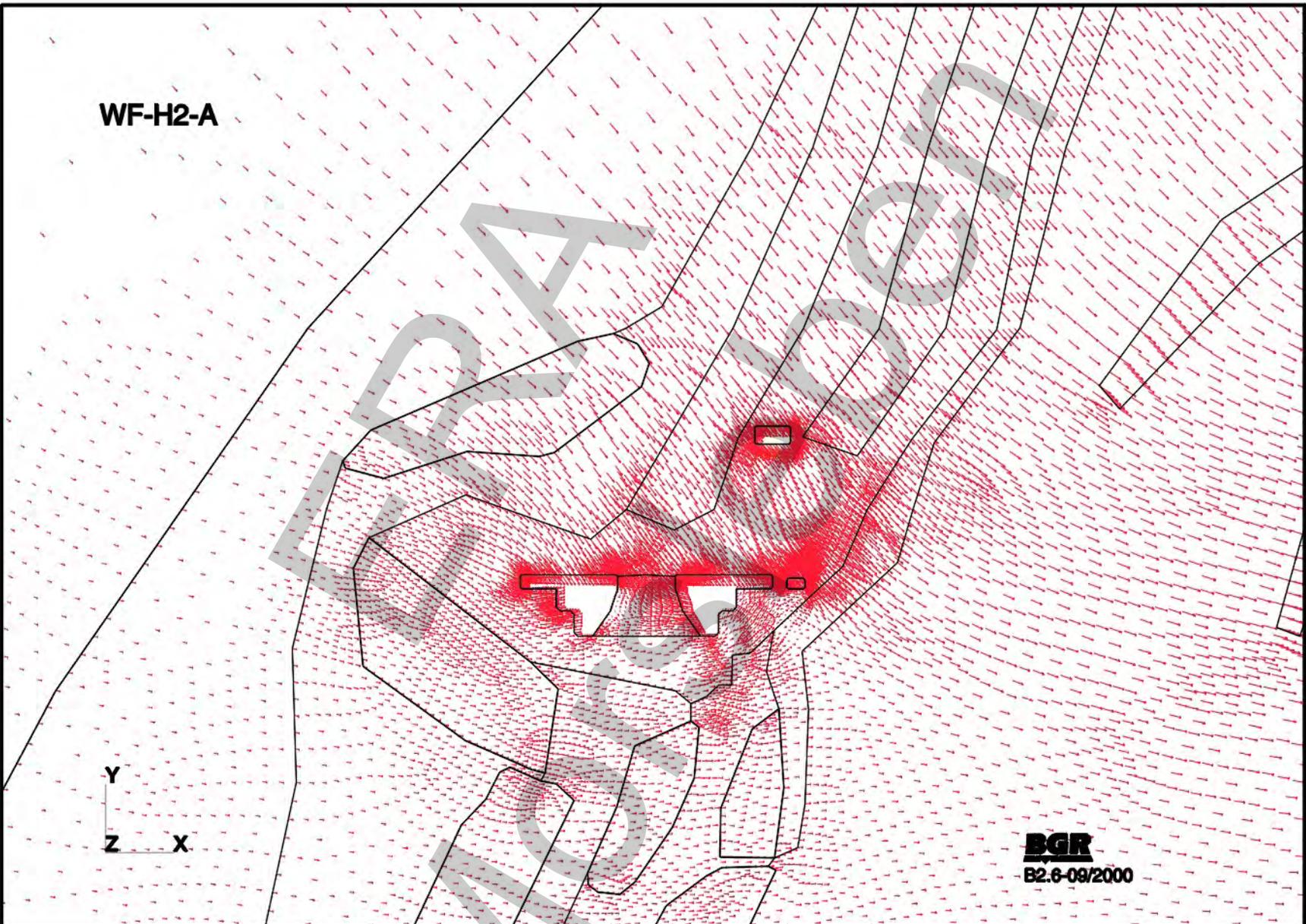
Y  
Z X

**BGR**  
B2-6-09/2000

**WF-H2-A: Basismodell**  
**Verformte Struktur nach 72 Jahren (Ausschnitt 1)**  
**(Skalierungsfaktor=5, unverformtes Modell=rot/blau, verformtes Modell=schwarz)**



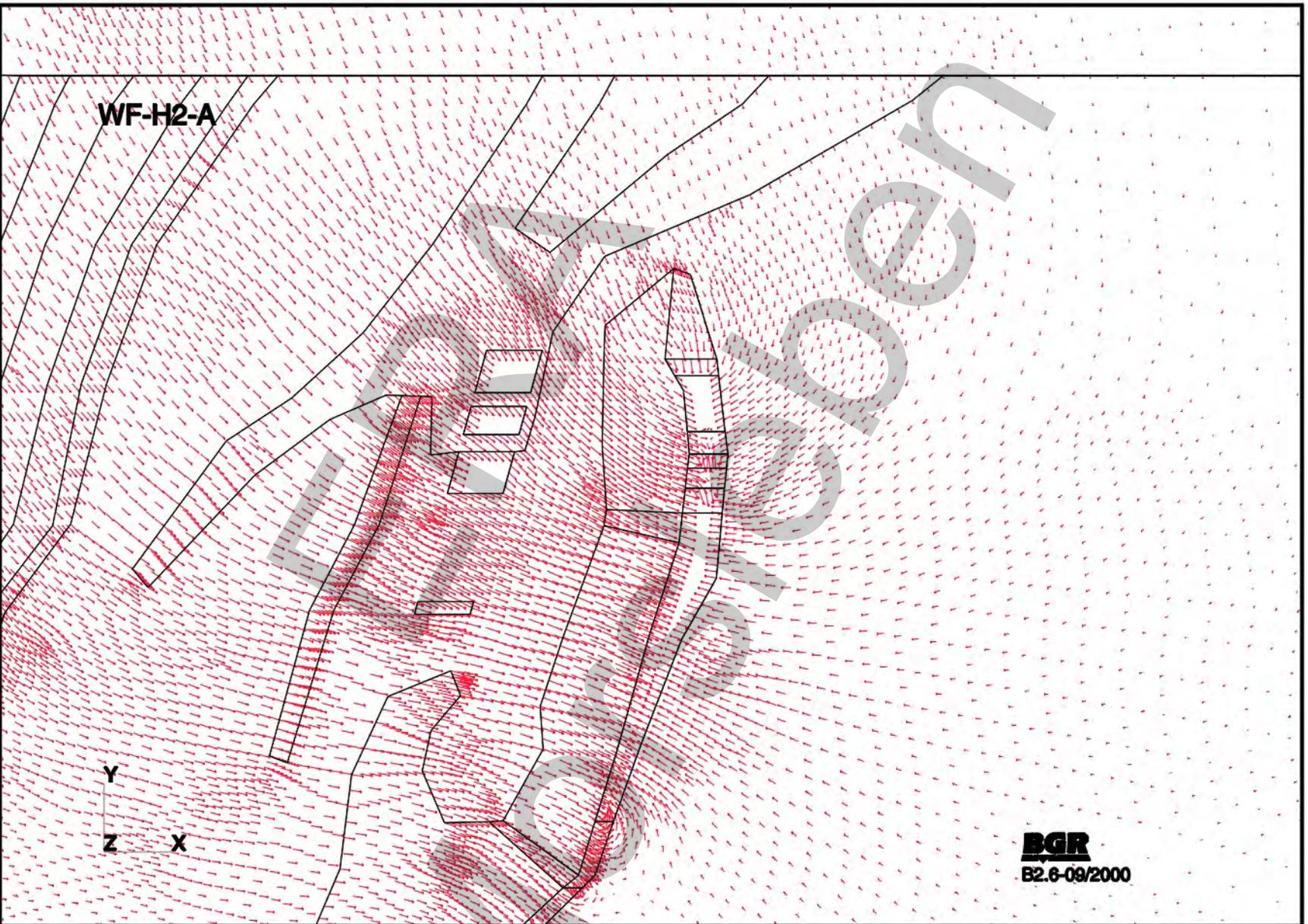
**WF-H2-A: Basismodell**  
**Verformte Struktur nach 72 Jahren (Ausschnitt 2)**  
**(Skalierungsfaktor=5, unverformtes Modell=rot/blau, verformtes Modell=schwarz)**



WF-H2-A

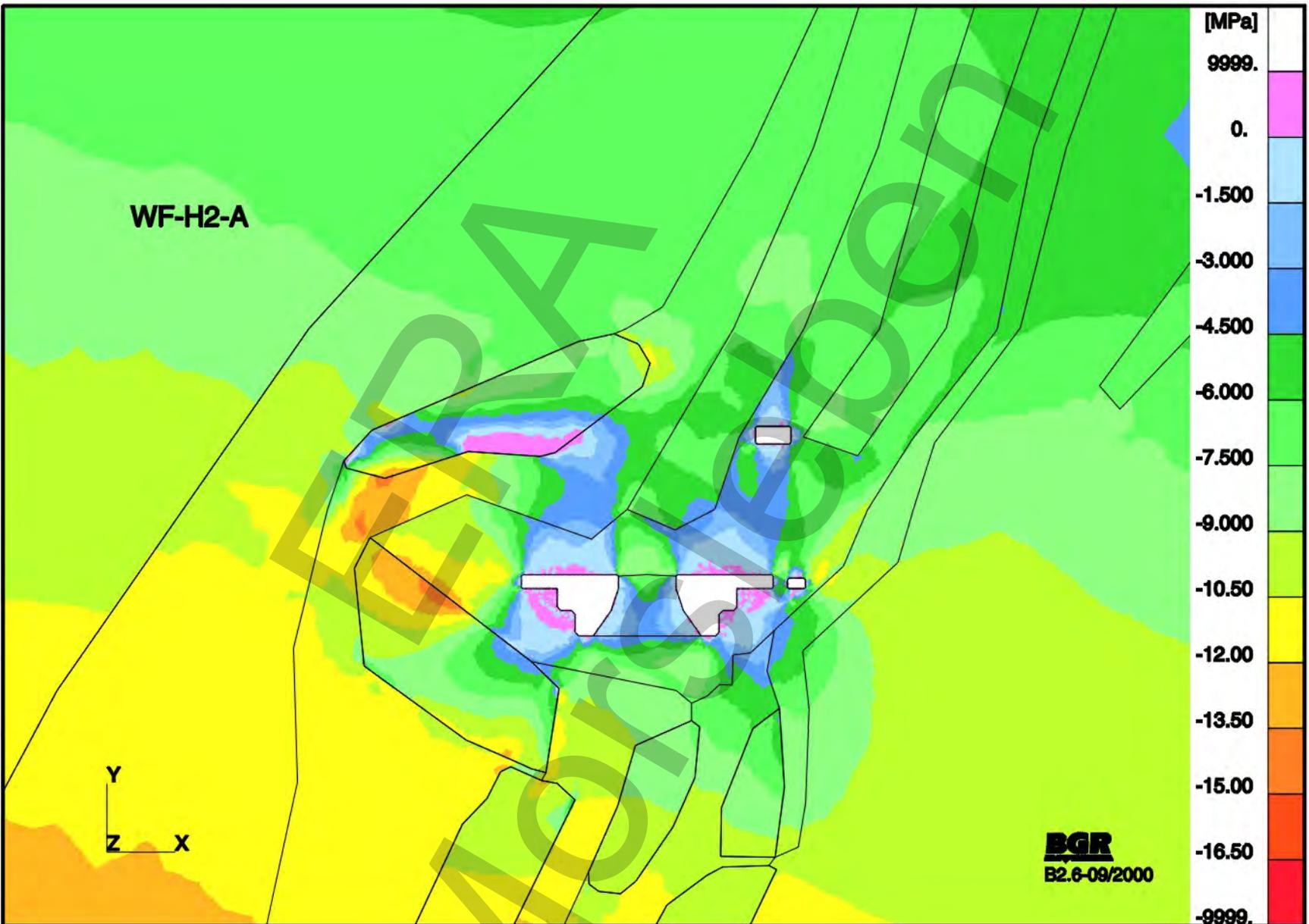
**BGR**  
B2.6-09/2000

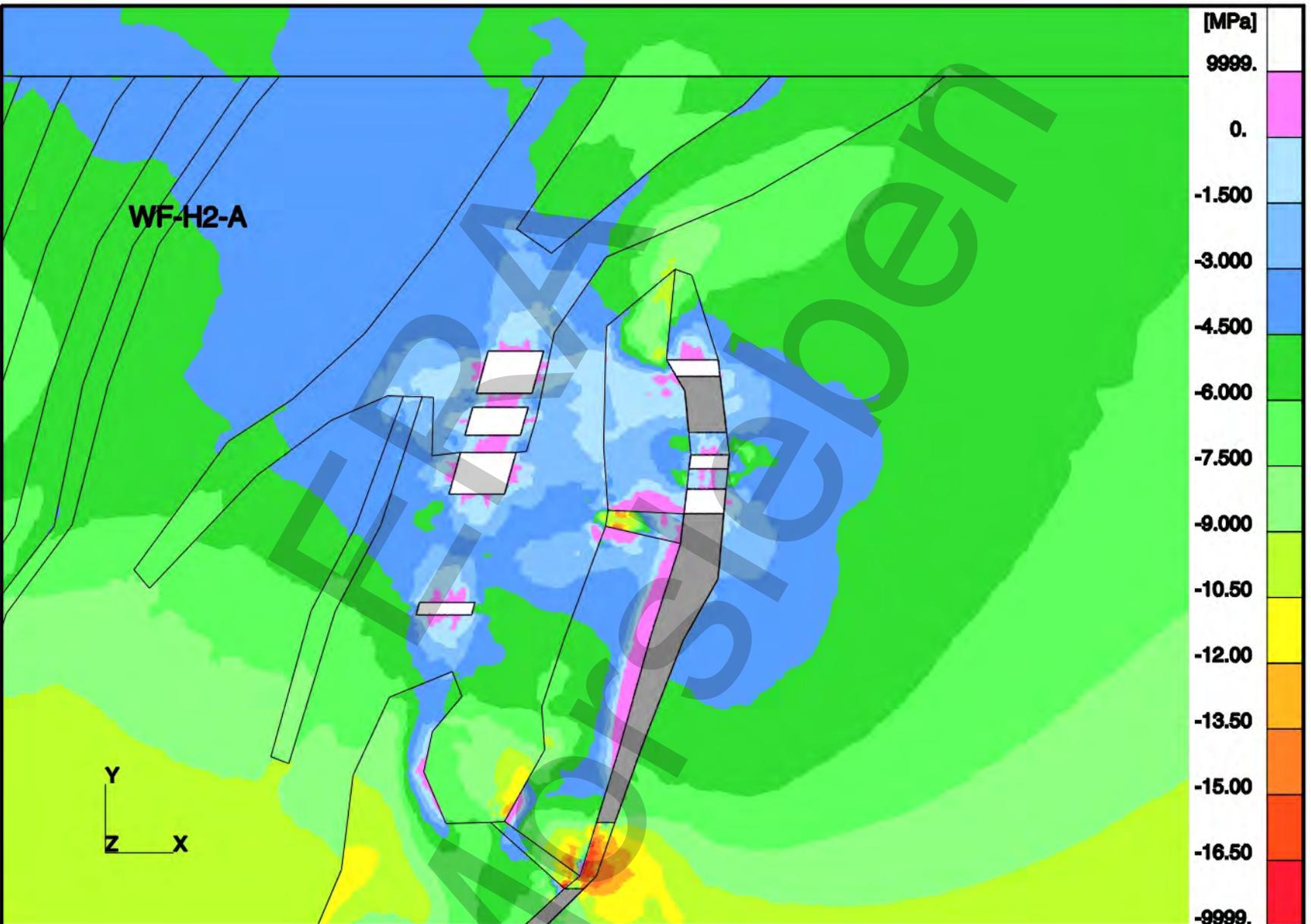
WF-H2-A: Basismodell  
Verschiebungsvektoren nach 72 Jahren (Ausschnitt 1)



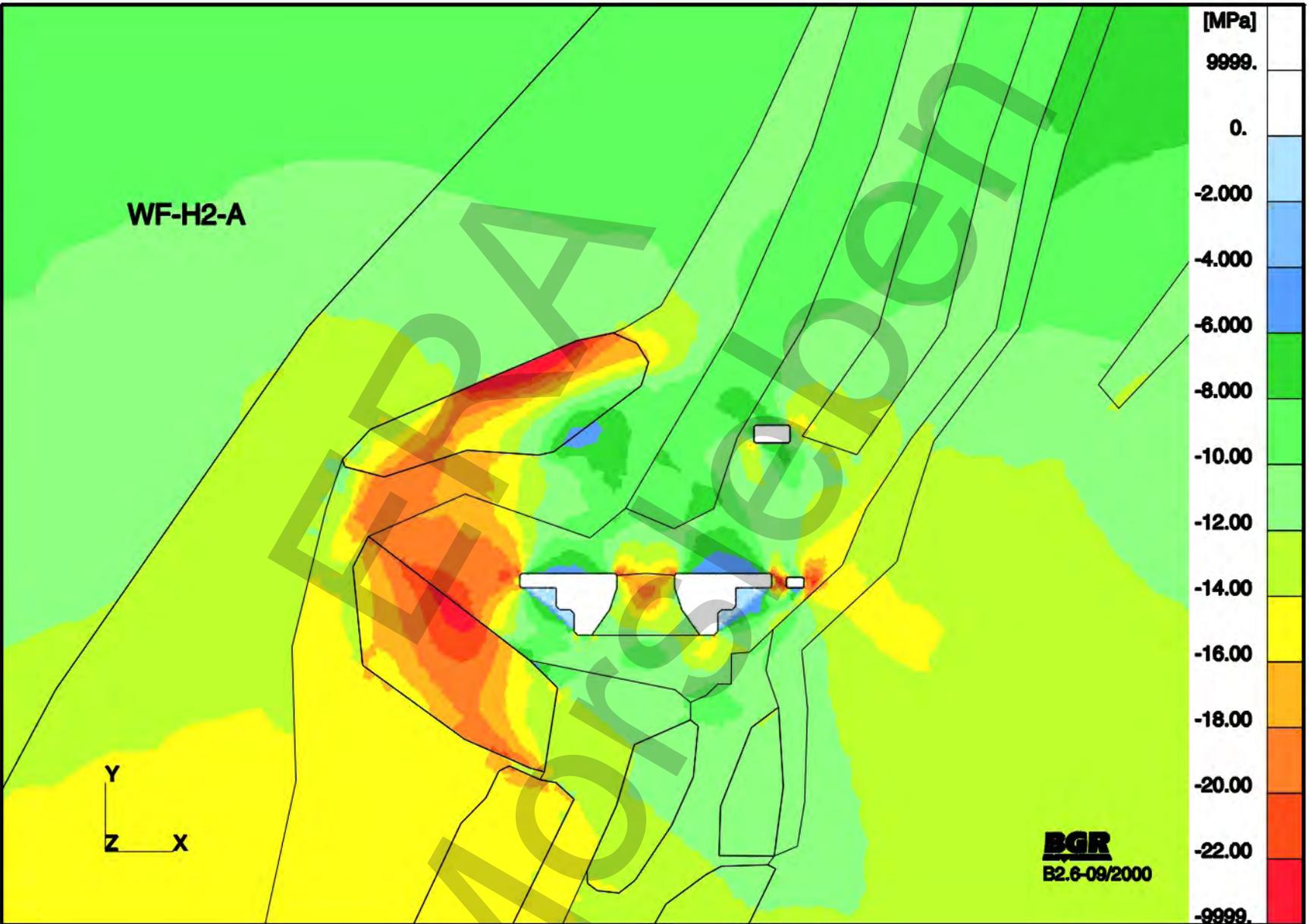
**WF-H2-A: Basismodell**  
**Verschiebungsvektoren nach 72 Jahren (Ausschnitt 2)**

**WF-H2-A: Basismodell**  
**Kleinste Hauptdruckspannungen S1 nach 100 Jahren (Ausschnitt 1)**

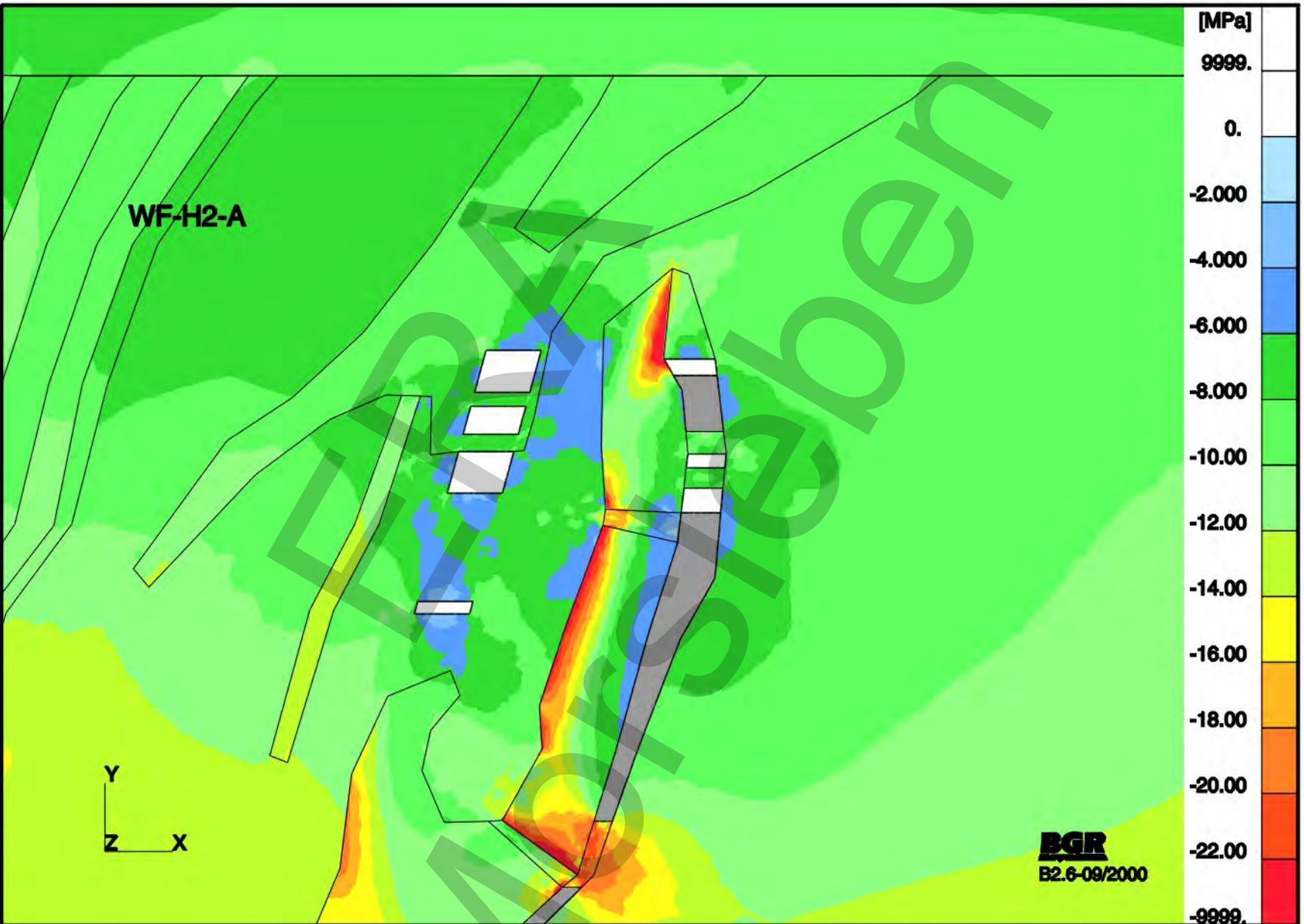




**WF-H2-A: Basismodell**  
**Kleinste Hauptdruckspannungen S1 nach 100 Jahren (Ausschnitt 2)**

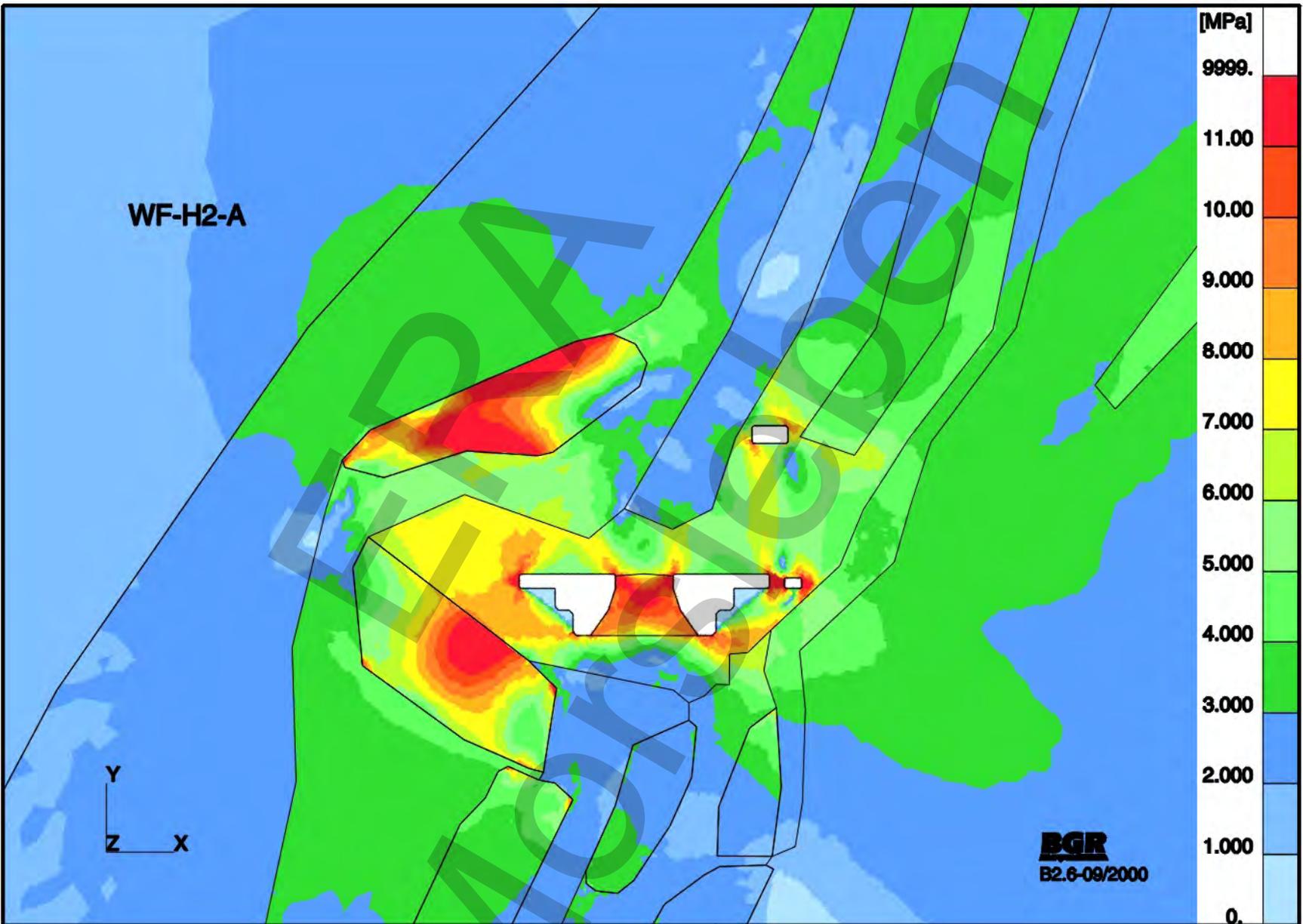


WF-H2-A: Basismodell  
Grösste Hauptdruckspannungen  $S_2$  nach 100 Jahren (Ausschnitt 1)

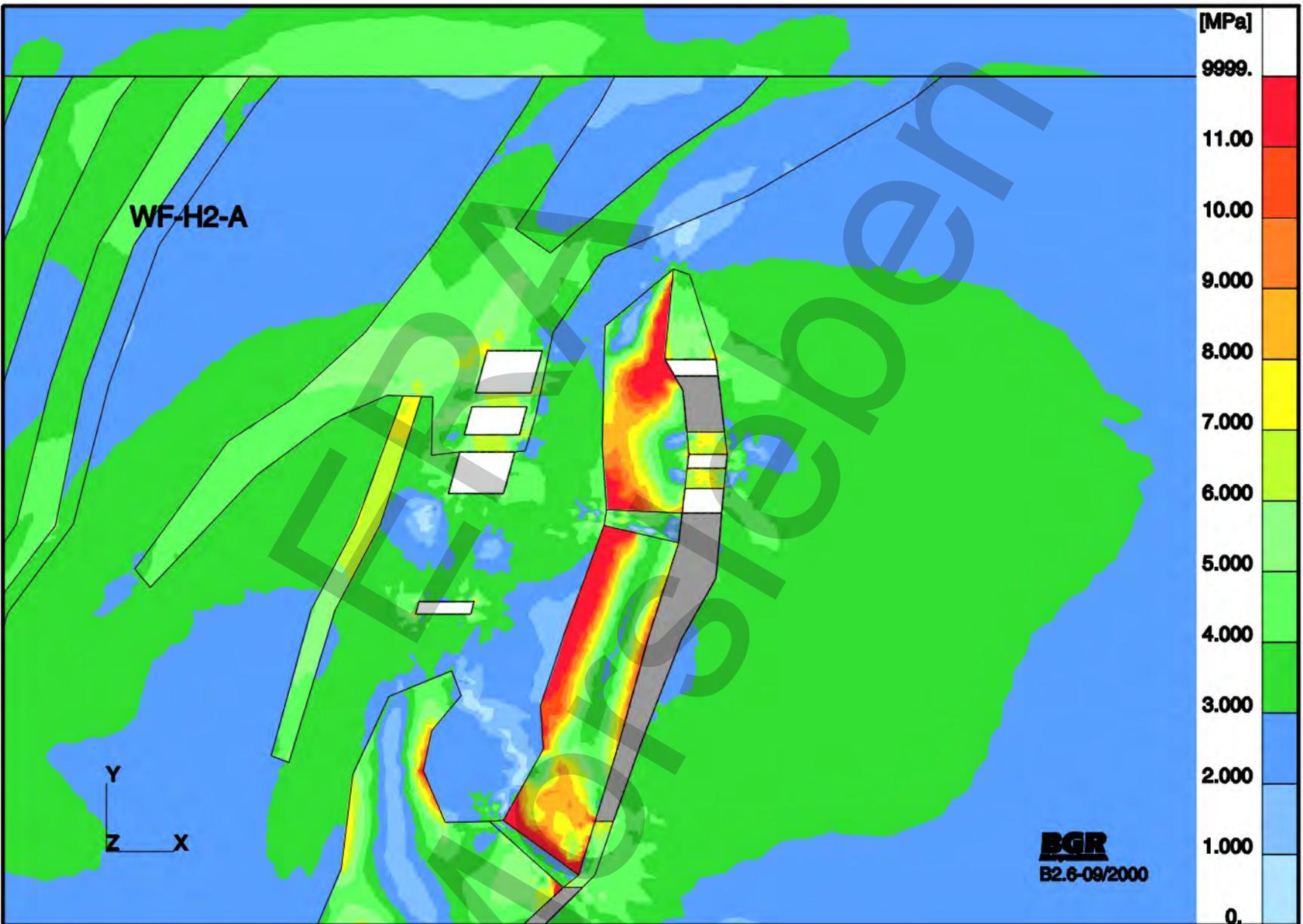


WF-H2-A: Basismodell  
Grossste Hauptdruckspannungen S2 nach 100 Jahren (Ausschnitt 2)

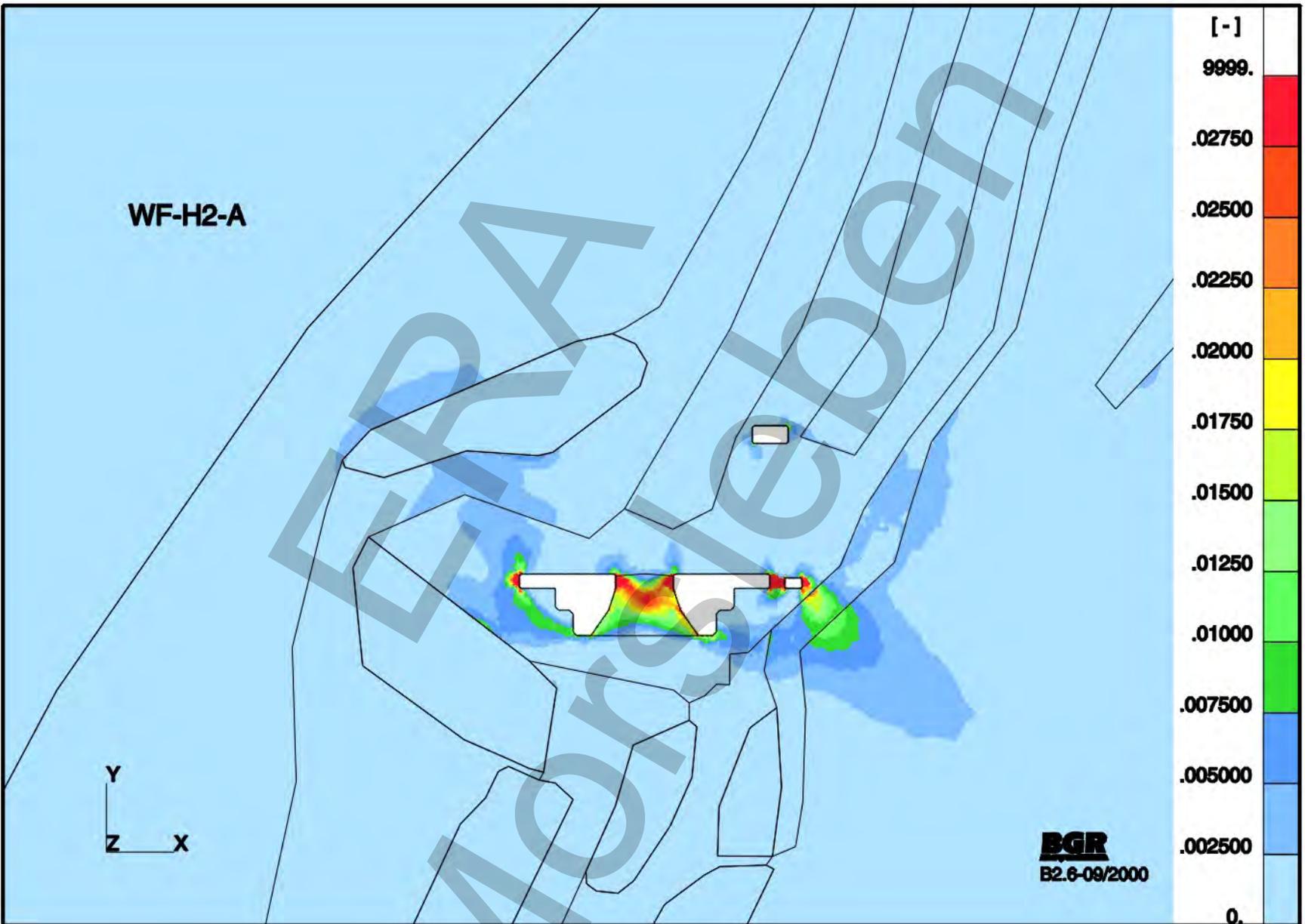
WF-H2-A: Basismodell  
Effektivspannungen nach 100 Jahren (Ausschnitt 1)

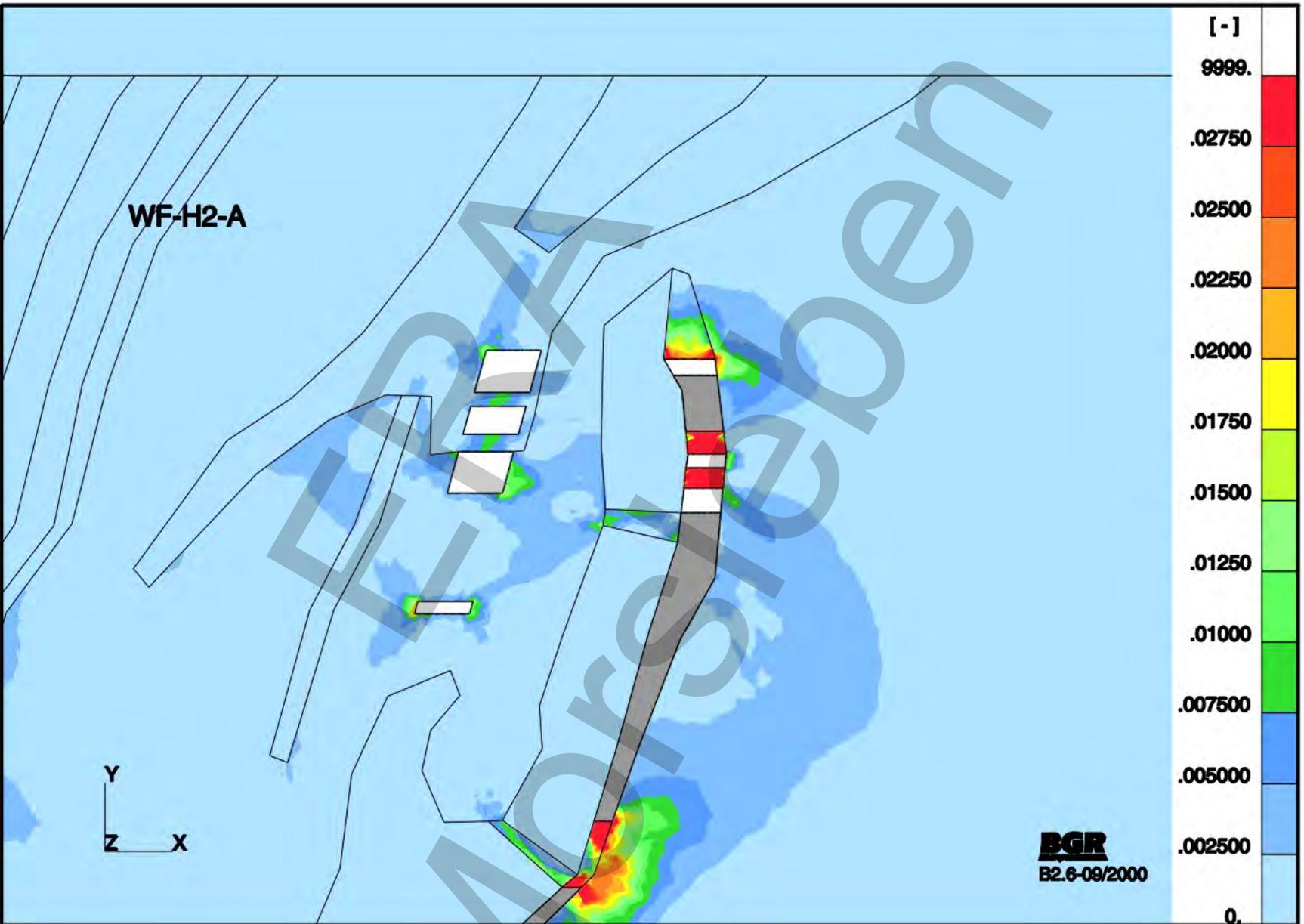


WF-H2-A: Basismodell  
Effektivspannungen nach 100 Jahren (Ausschnitt 2)



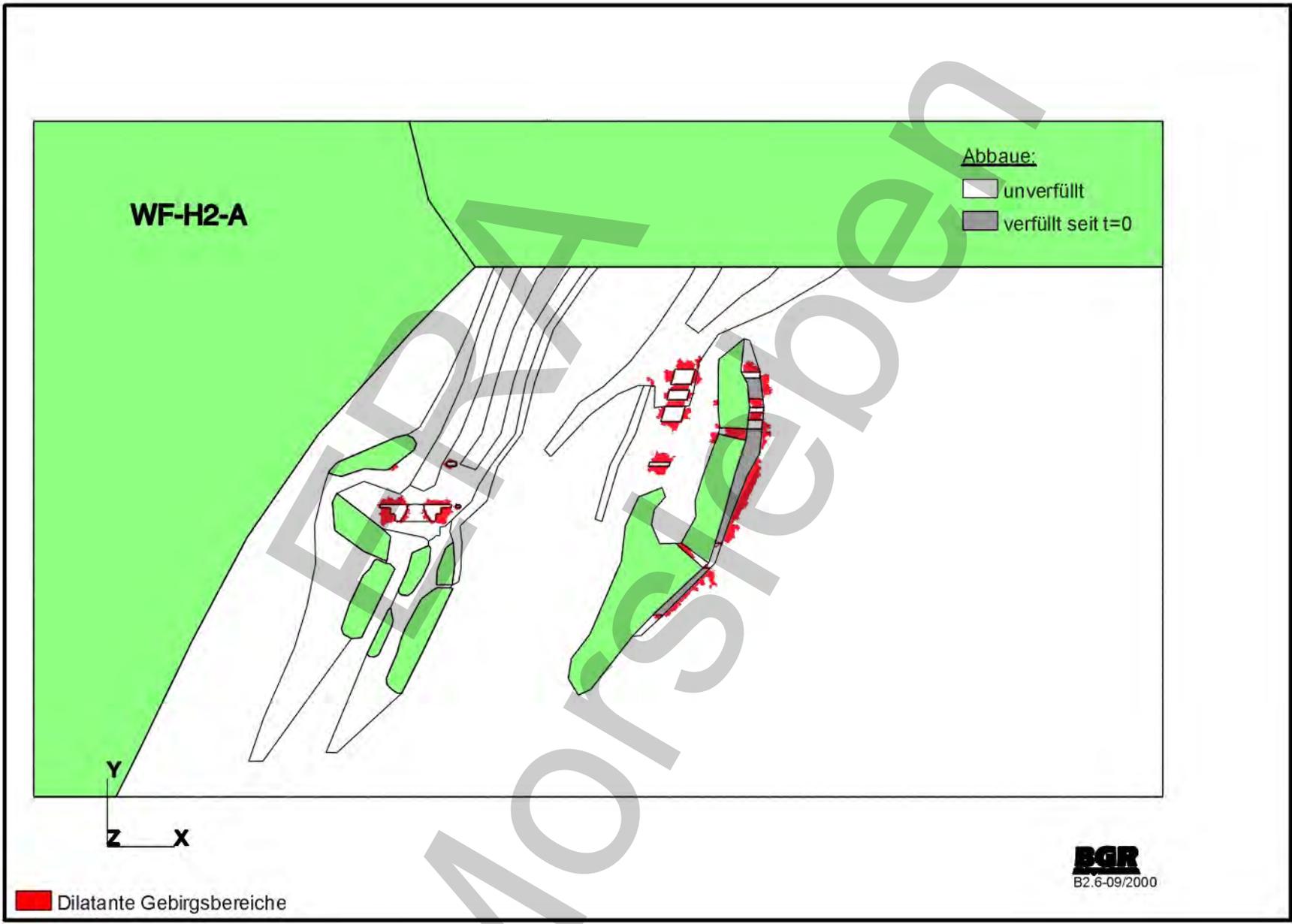
WF-H2-A: Basismodell  
Effektivverzerrungen nach 100 Jahren (Ausschnitt 1)



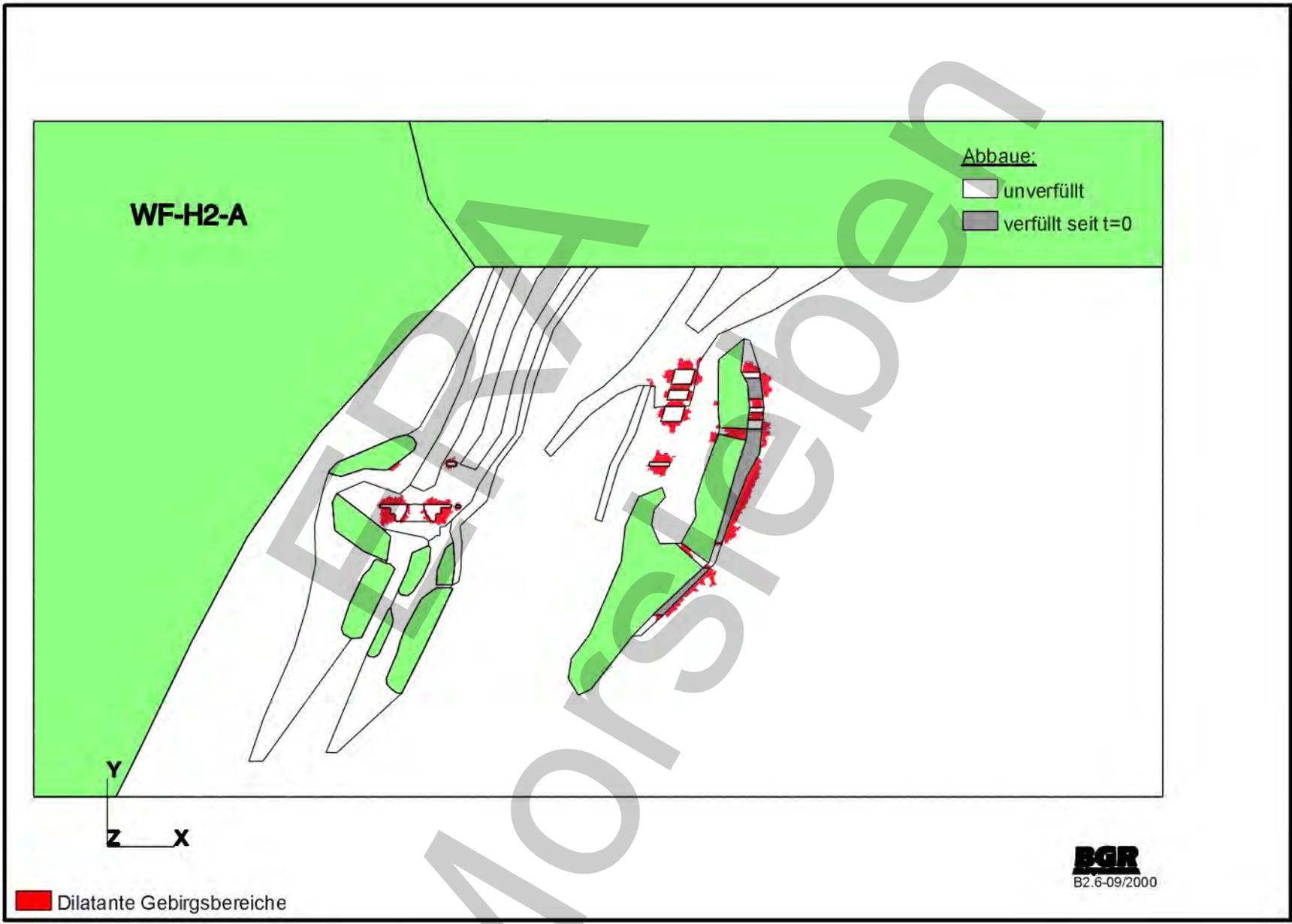


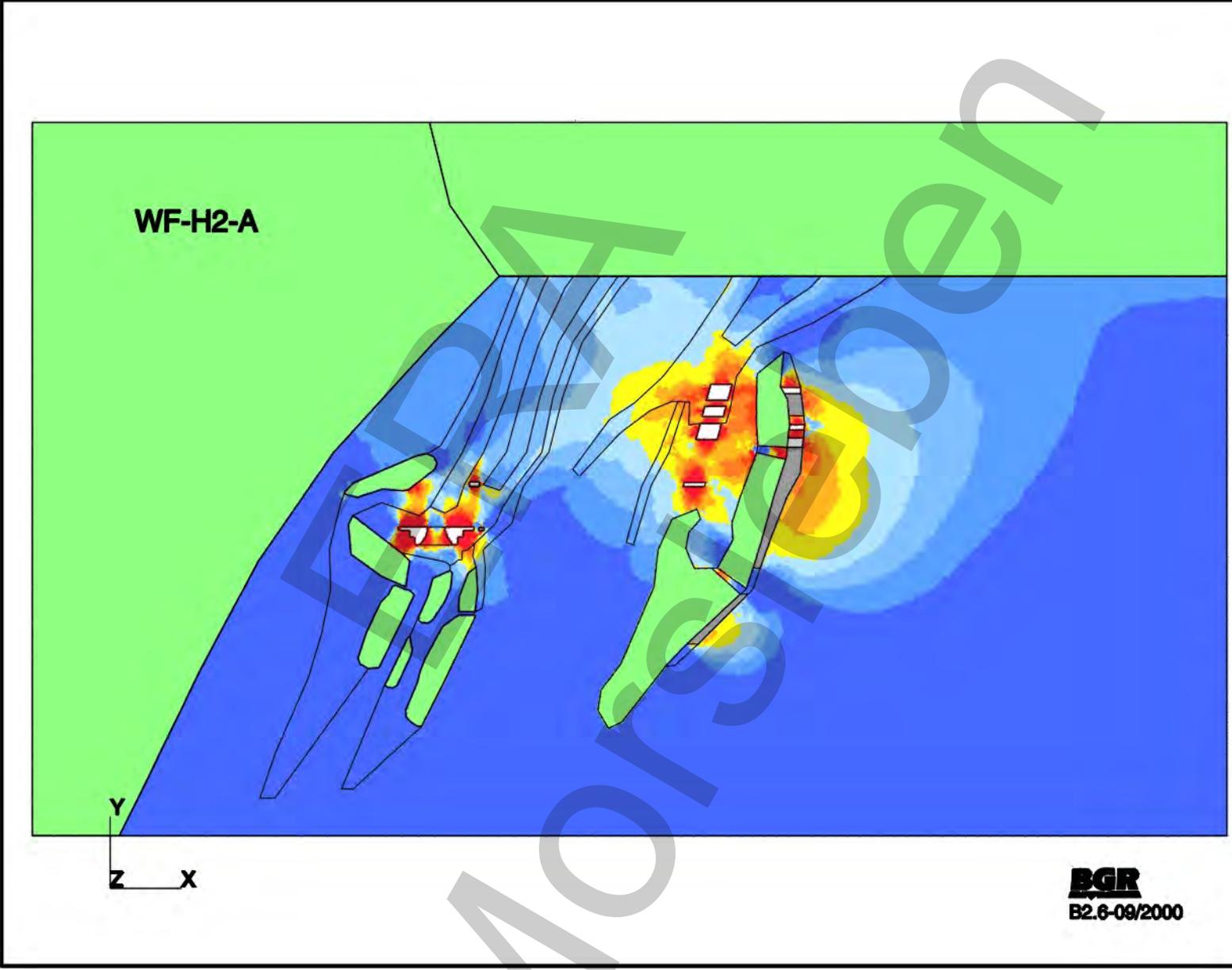
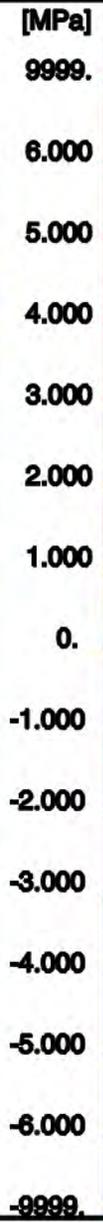
WF-H2-A: Basismodell  
 Effektivverzerrungen nach 100 Jahren (Ausschnitt 2)

**WF-H2-A: Basismodell  
Dilatante Gebirgsbereiche nach 72 Jahren**



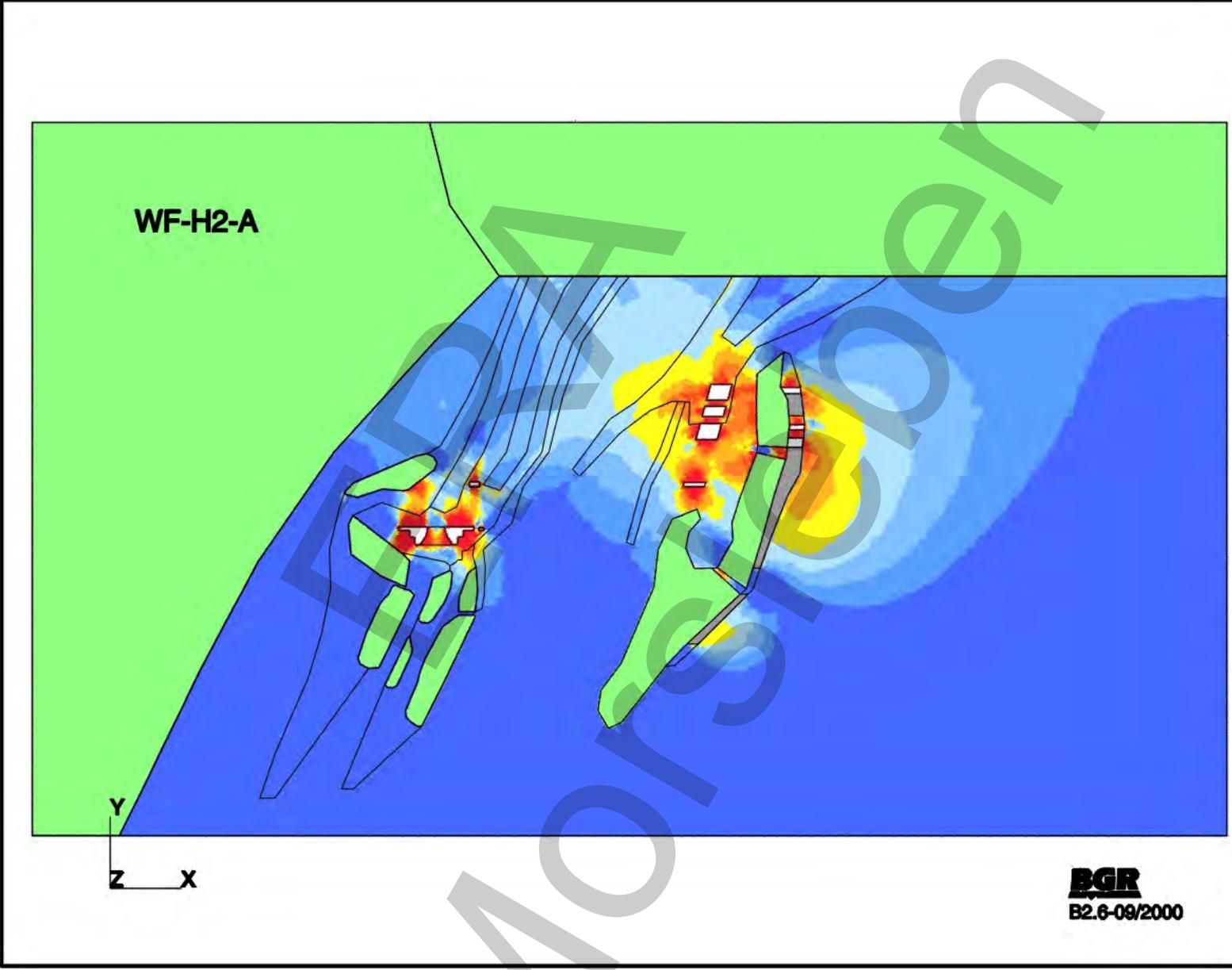
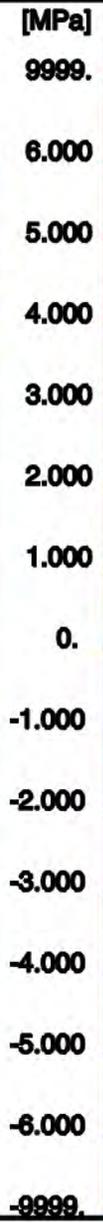
**WF-H2-A: Basismodell**  
**Dilatante Gebirgsbereiche nach 100 Jahren**





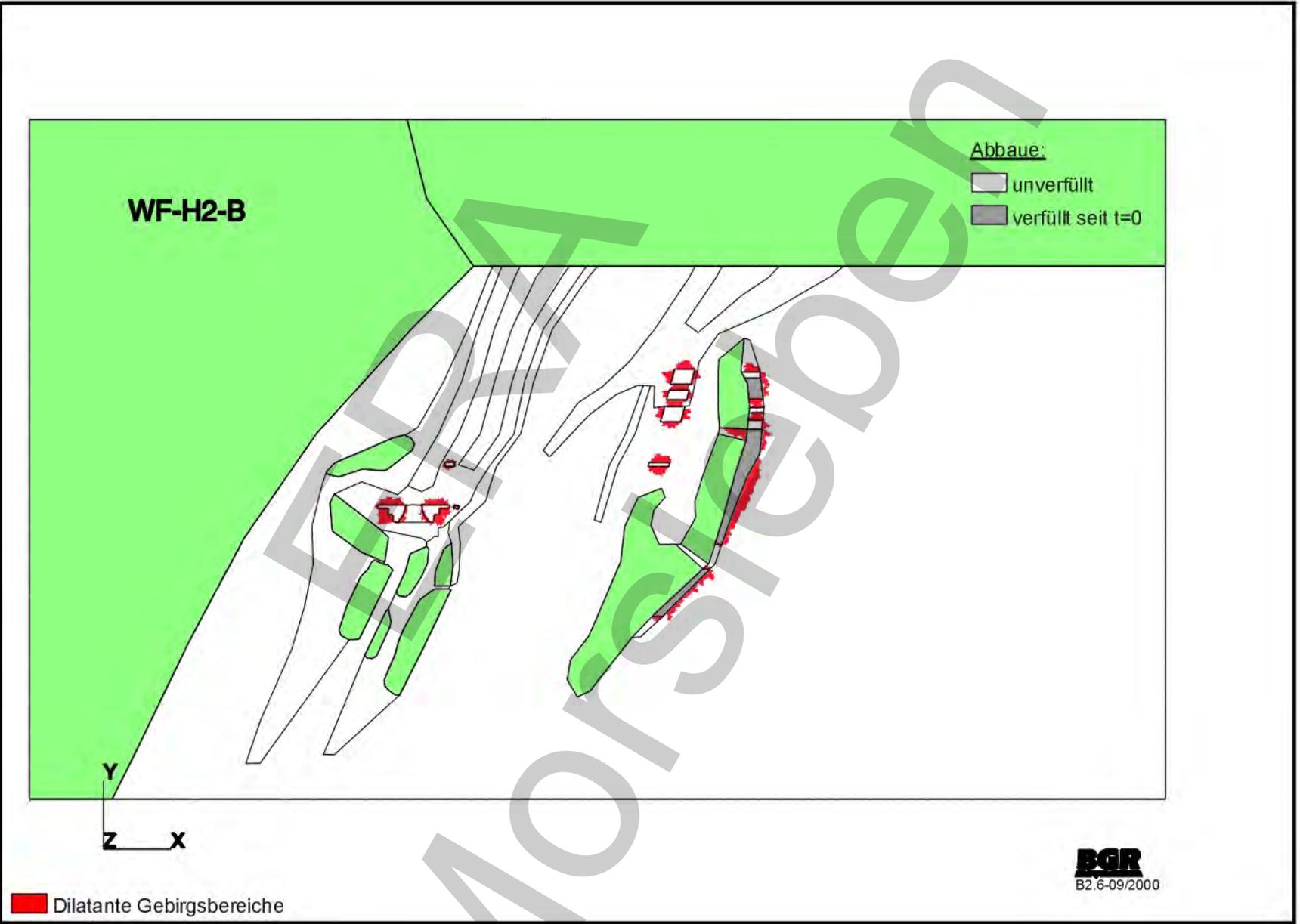
**BGR**  
B2.6-09/2000

WF-H2-A: Basismodell  
Differenz zwischen Laugendruck und kleinster Hauptdruckspannung nach 72 Jahren

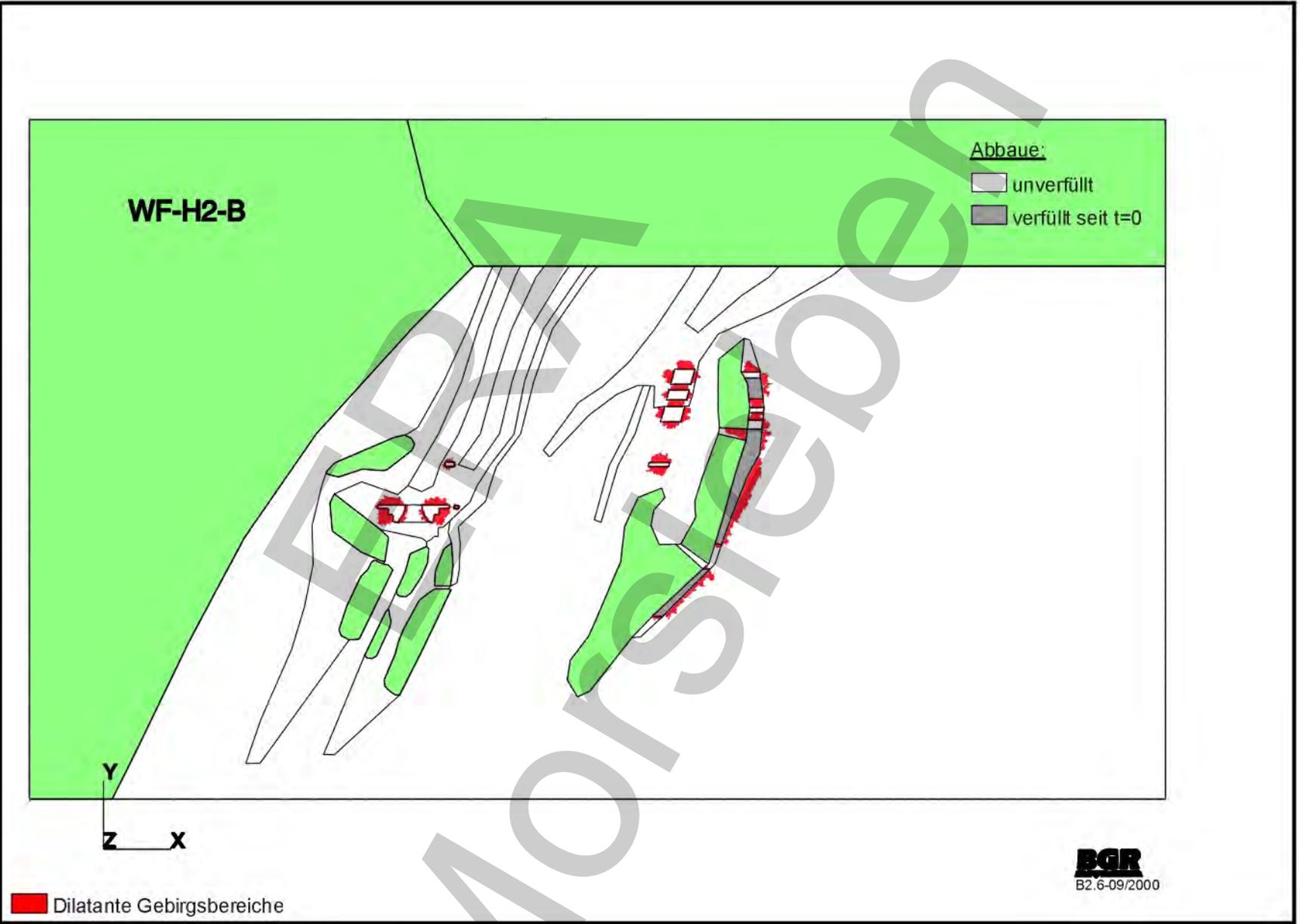


**BGR**  
B2.6-09/2000

WF-H2-A: Basismodell  
Differenz zwischen Laugendruck und kleinster Hauptdruckspannung nach 100 Jahren



WF-H2-B: Steifer Versatz im Kallilager B ( $E=3500$  Mpa)  
Dilatante Gebirgsbereiche nach 72 Jahren



WF-H2-B: Steifer Versatz im Kallilager B ( $E=3500 \text{ Mpa}$ )  
 Dilatante Gebirgsbereiche nach 100 Jahren

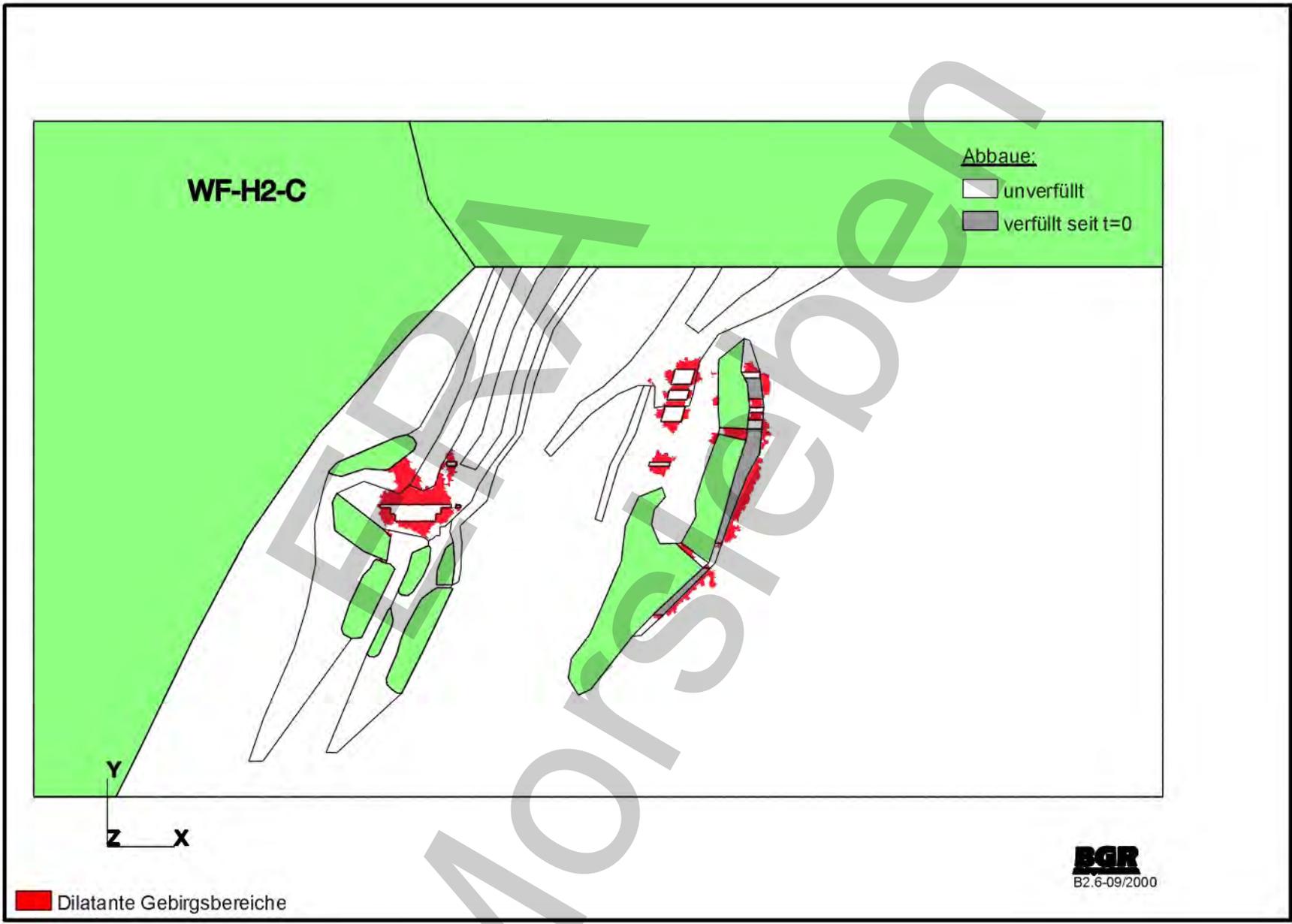


WF-H2-B: Steifer Versatz im Kalllager B (E=3500 MPa)  
Differenz zwischen Laugendruck und kleinster Hauptdruckspannung nach 72 Jahren

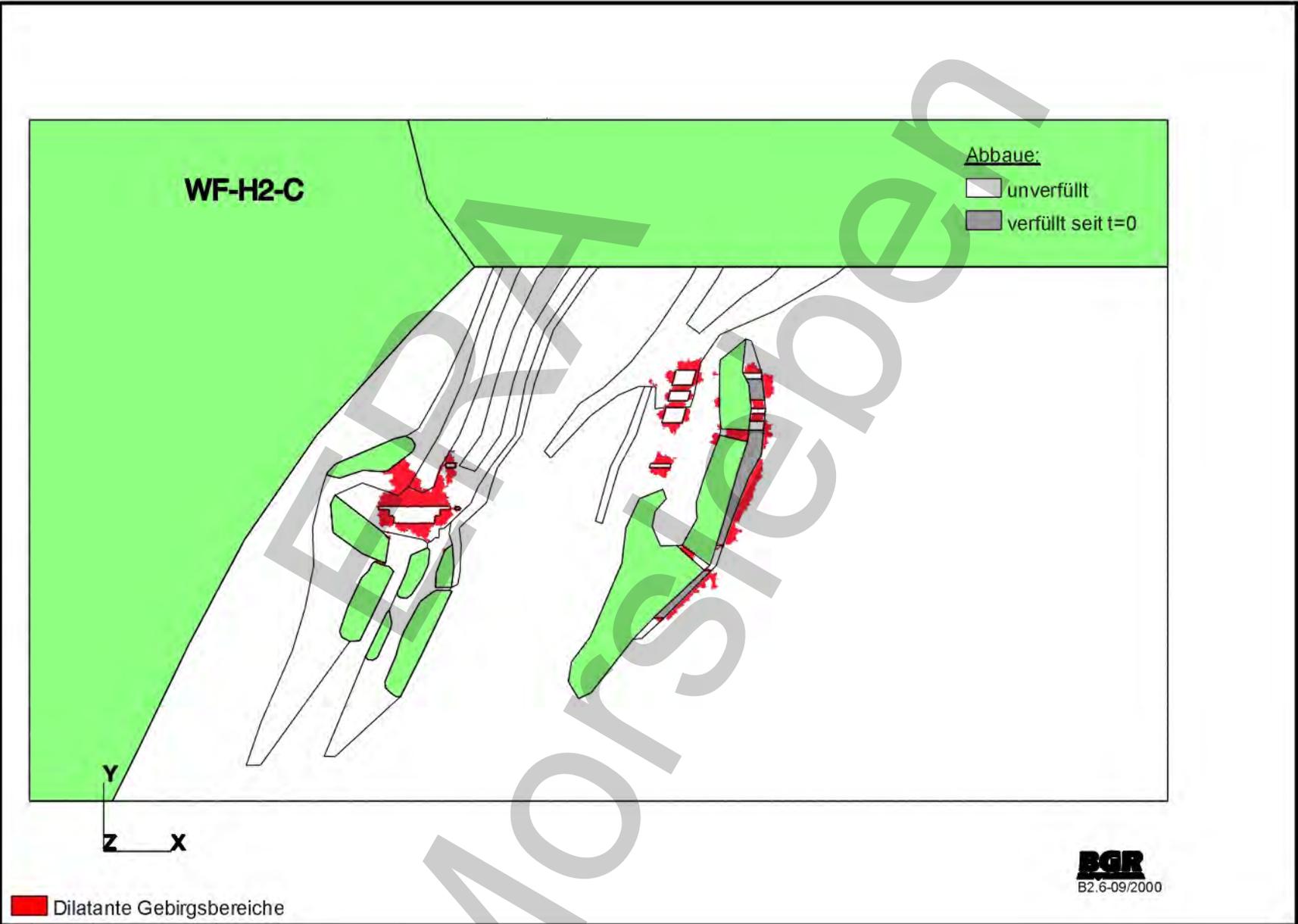


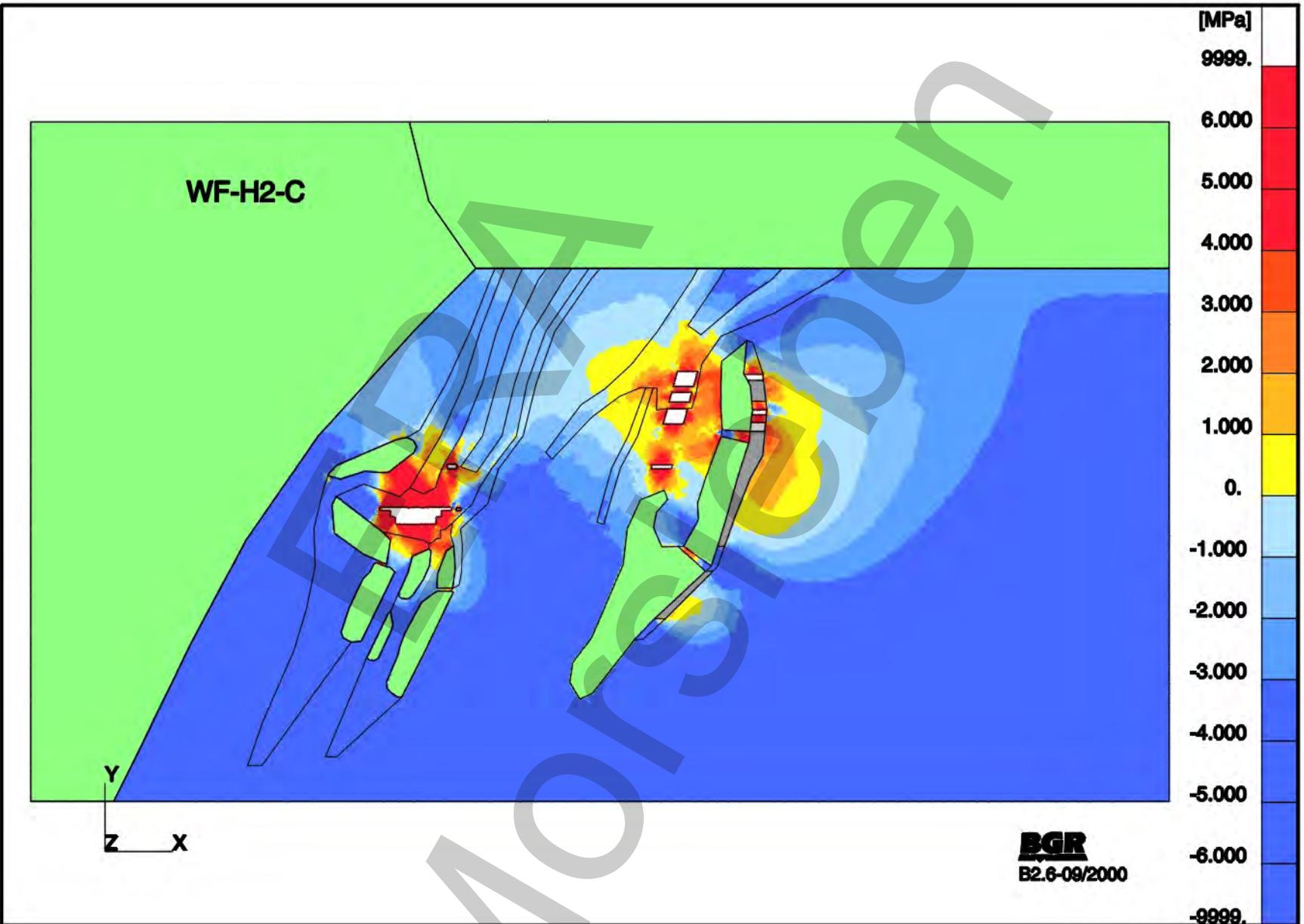
WF-H2-B: Steifer Versatz im Kalllager B ( $E=3500$  MPa)  
 Differenz zwischen Laugendruck und kleinster Hauptdruckspannung nach 100 Jahren

**WF-H2-C: Ohne Pfeiler zwischen den Abbauen 1n und 1s  
Dilatante Gebirgsbereiche nach 72 Jahren**



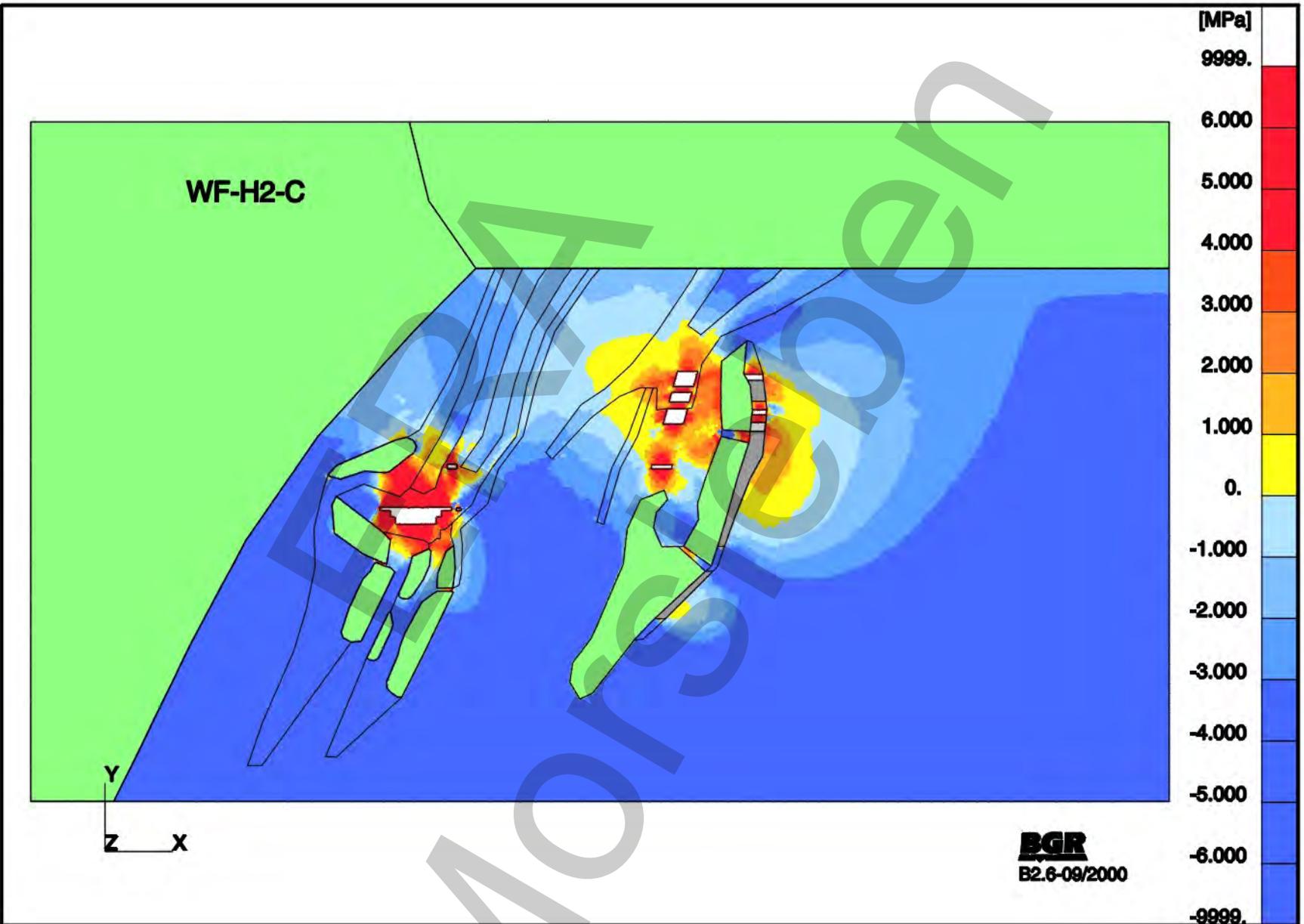
**WF-H2-C: Ohne Pfeiler zwischen den Abbauen 1n und 1s  
Dilatante Gebirgsbereiche nach 100 Jahren**



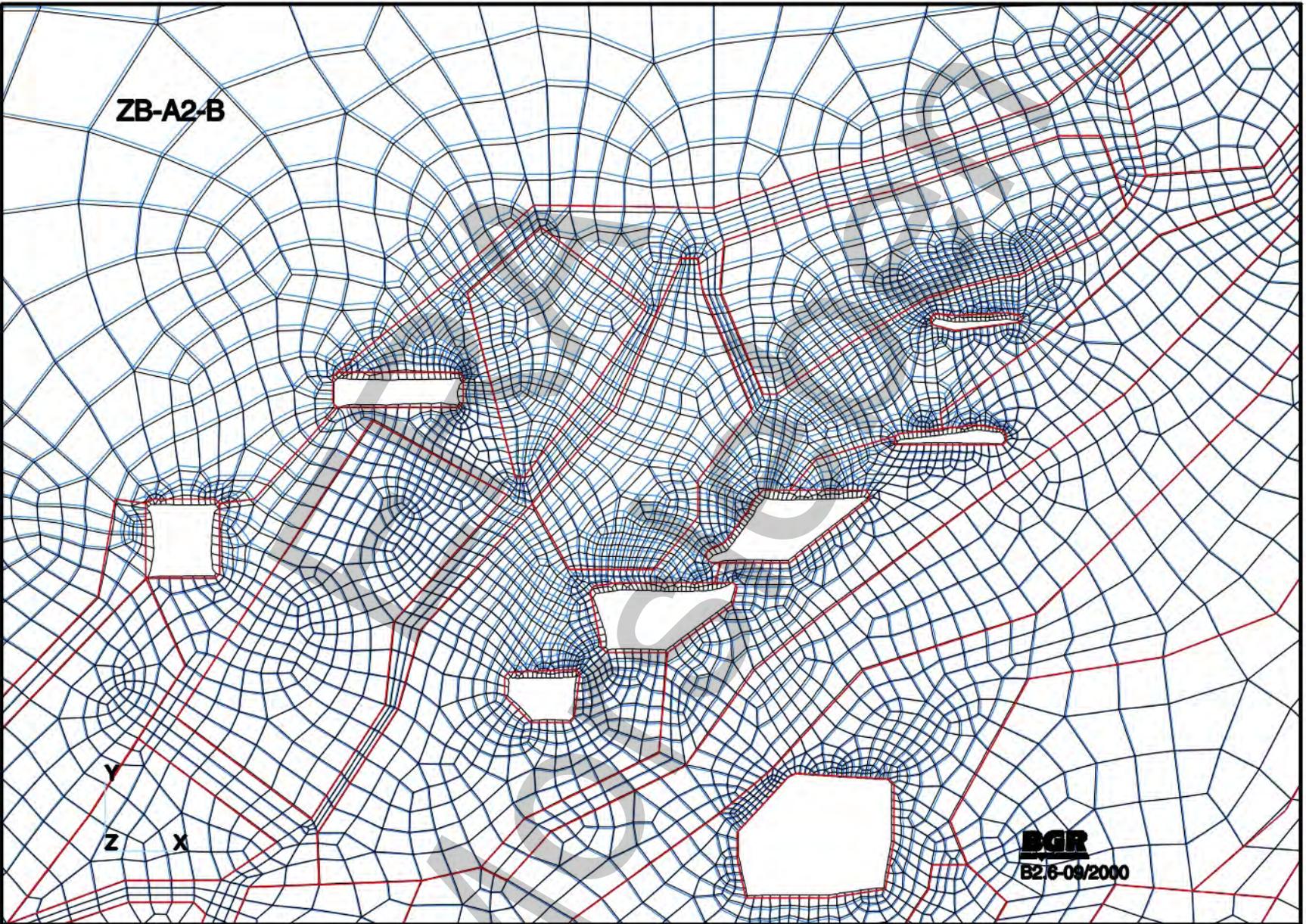


**BGR**  
B2.6-09/2000

WF-H2-C: Ohne Pfeiler zwischen den Abbauen 1n und 1s  
Differenz zwischen Laugendruck und kleinster Hauptdruckspannung nach 72 Jahren



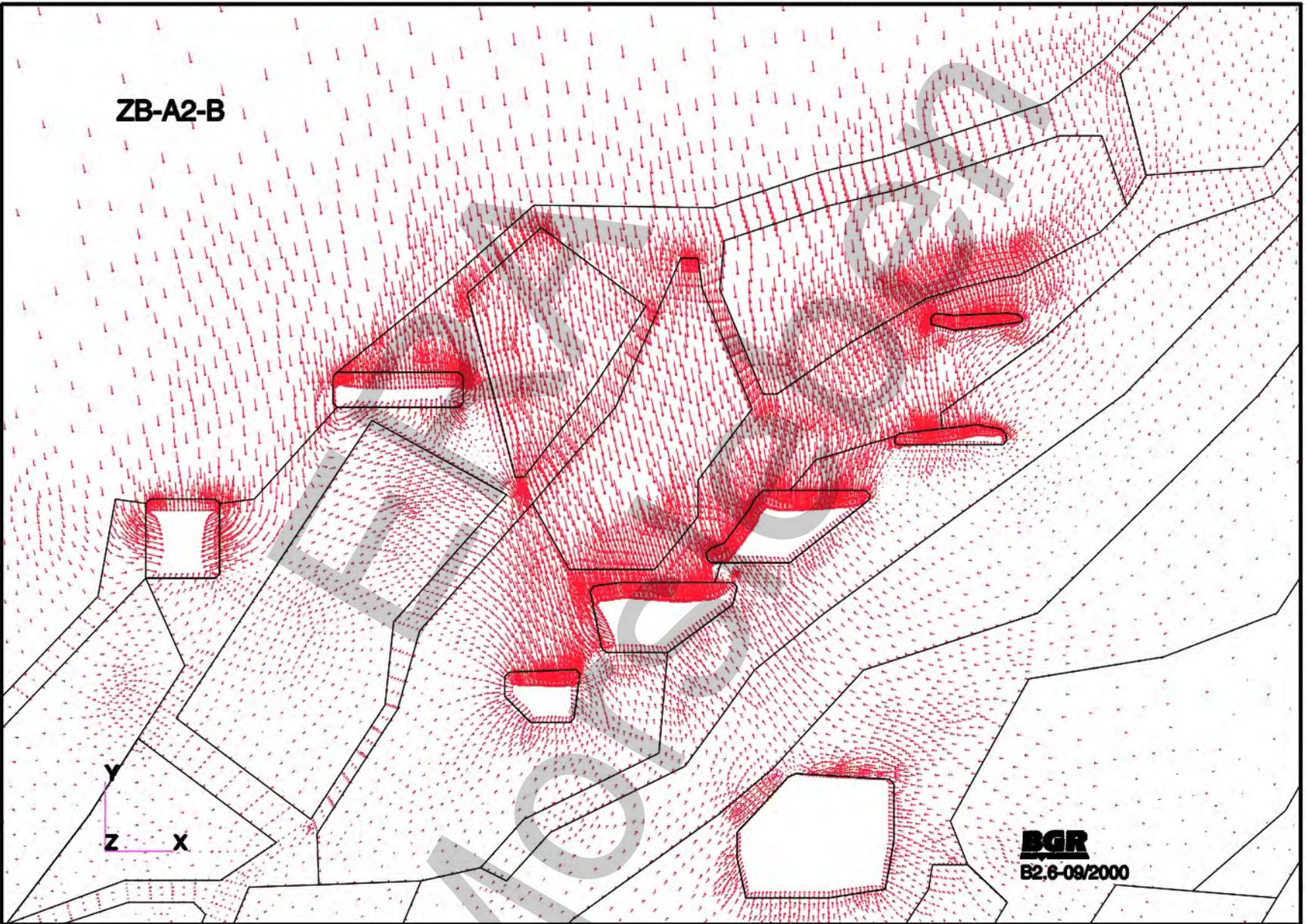
WF-H2-C: Ohne Pfeiler zwischen den Abbauen 1n und 1s  
 Differenz zwischen Laugendruck und kleinster Hauptdruckspannung nach 100 Jahren



**BGR**  
B2.6-09/2000

**ZB-A2-B**

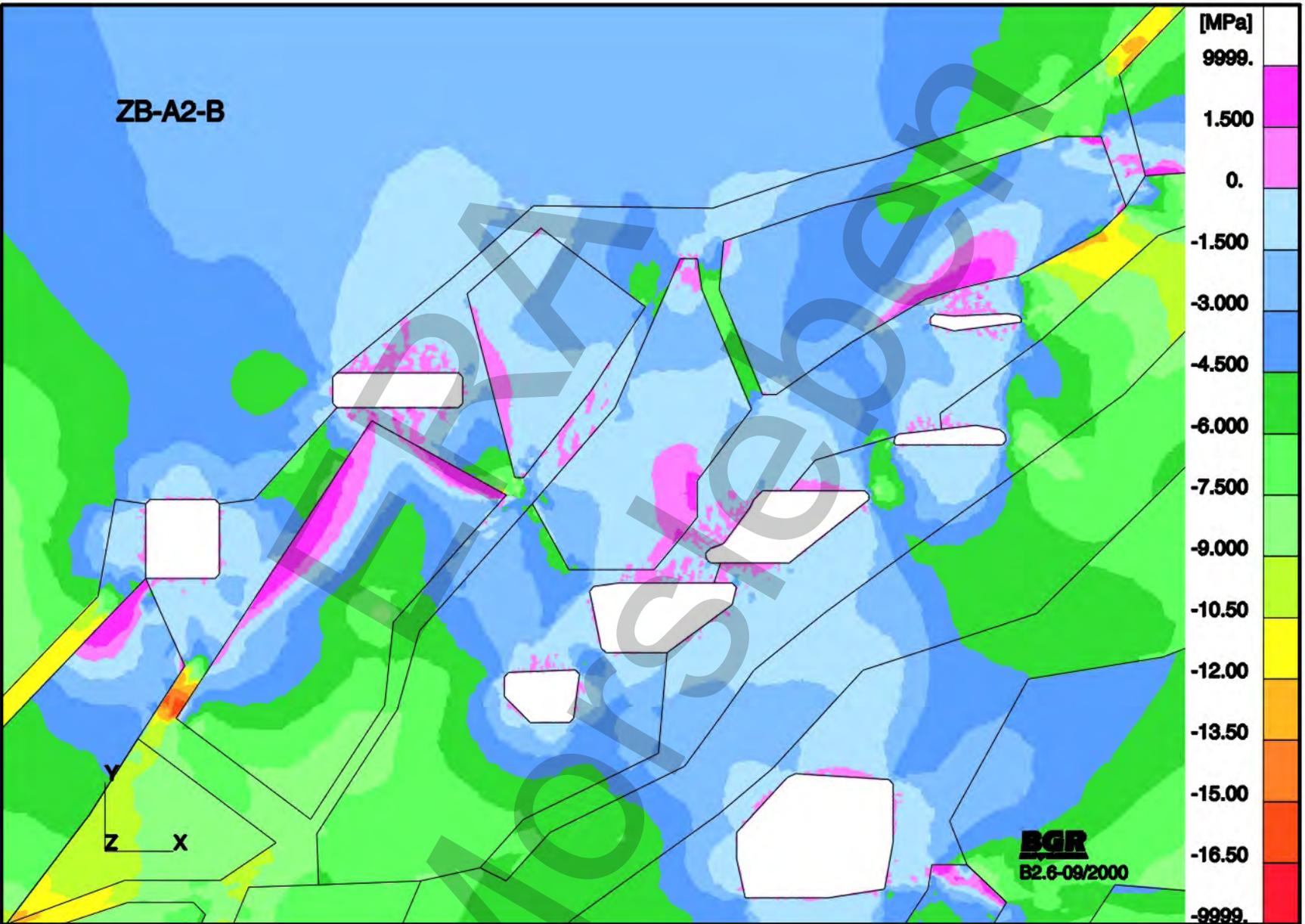
**ZB-A2-B: Basismodell**  
**Verformte Struktur nach 60 Jahren (Ausschnitt)**  
**(Skalierungsfaktor=10, unverformtes Modell=rot/blau, verformtes Modell=schwarz)**



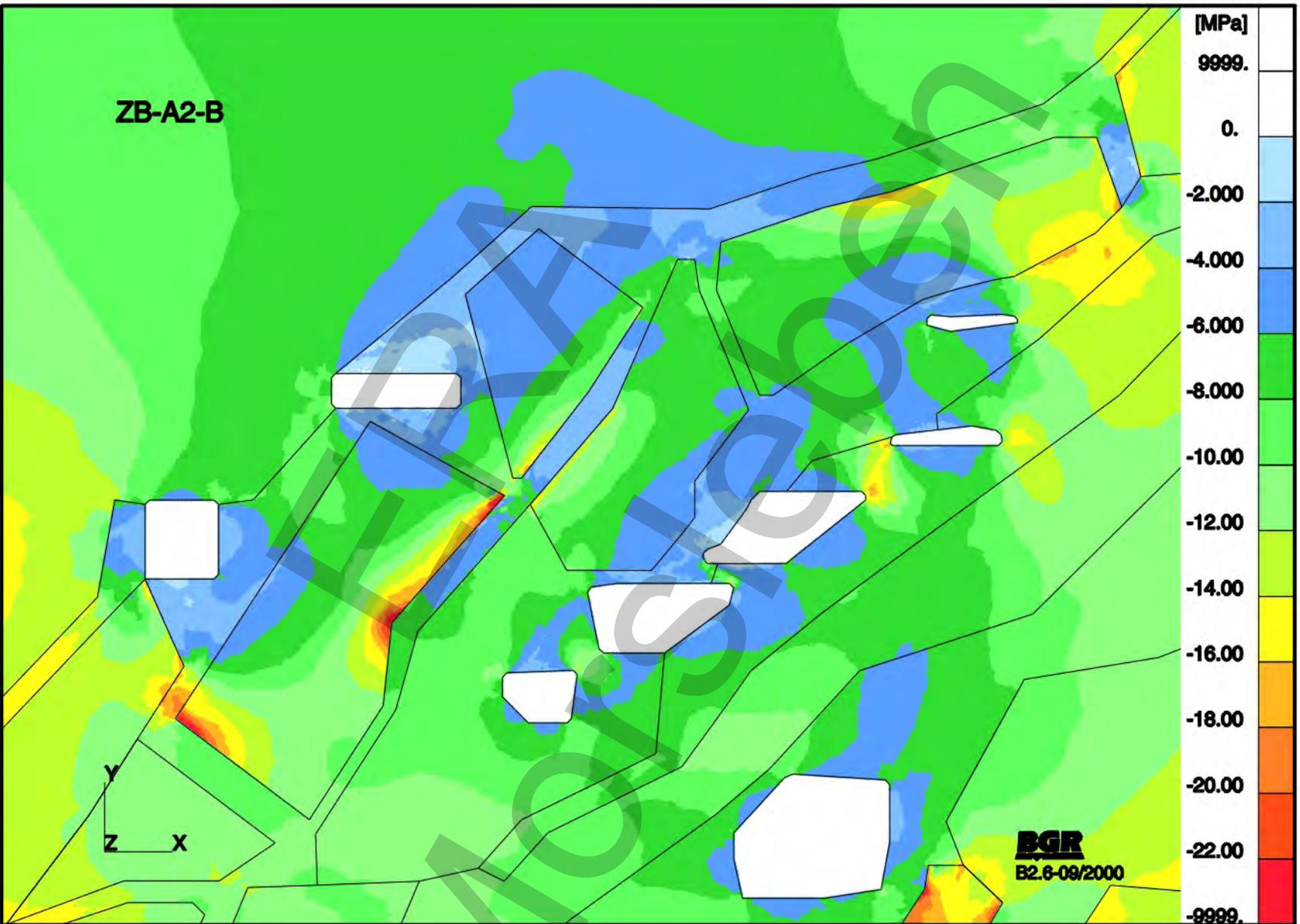
ZB-A2-B

**BGR**  
B2.6-09/2000

ZB-A2-B: Basismodell  
Verschiebungsvektoren nach 60 Jahren (Ausschnitt)



ZB-A2-B: Basismodell  
Kleinste Hauptdruckspannungen S1 nach 100 Jahren (Ausschnitt)



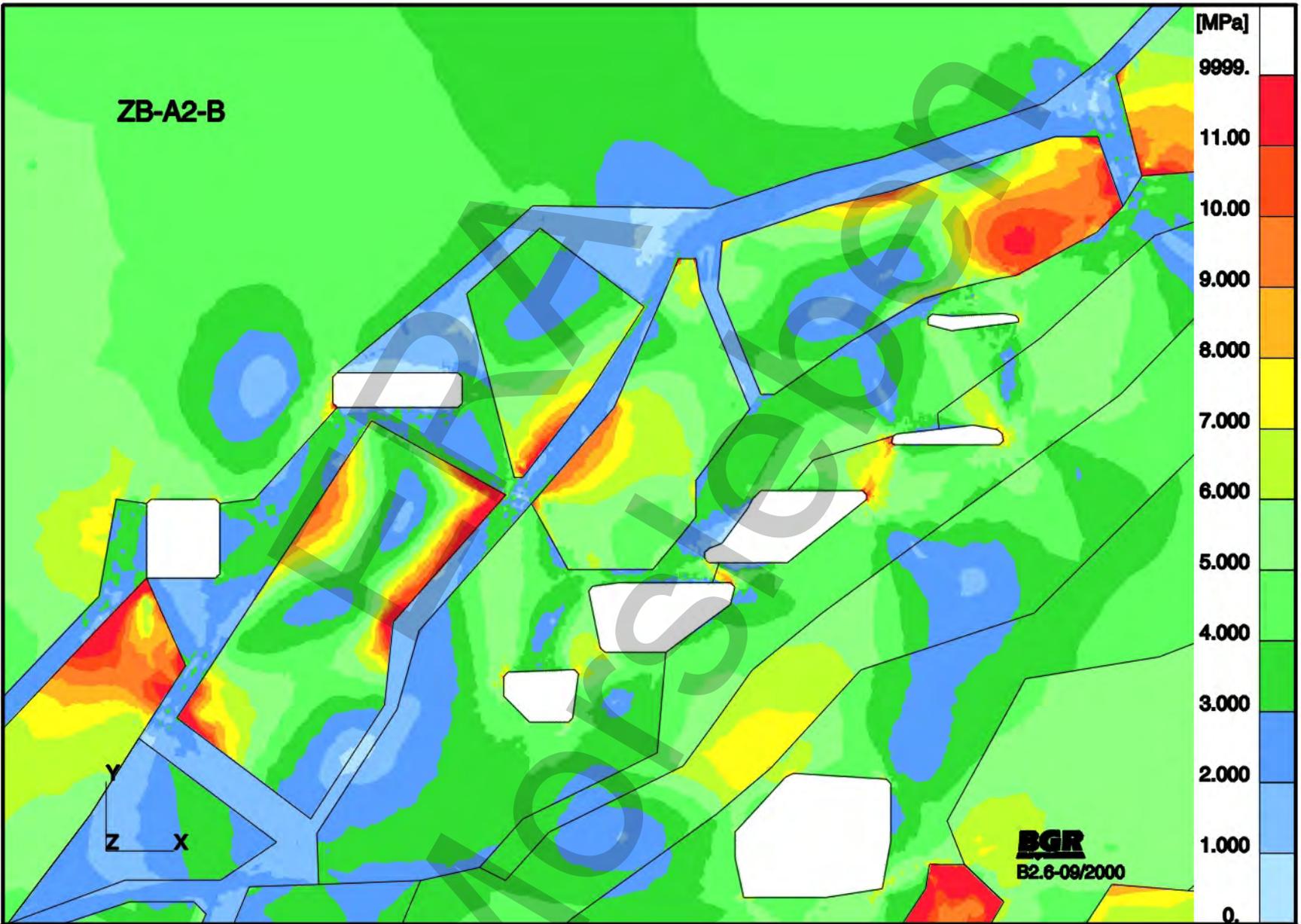
ZB-A2-B

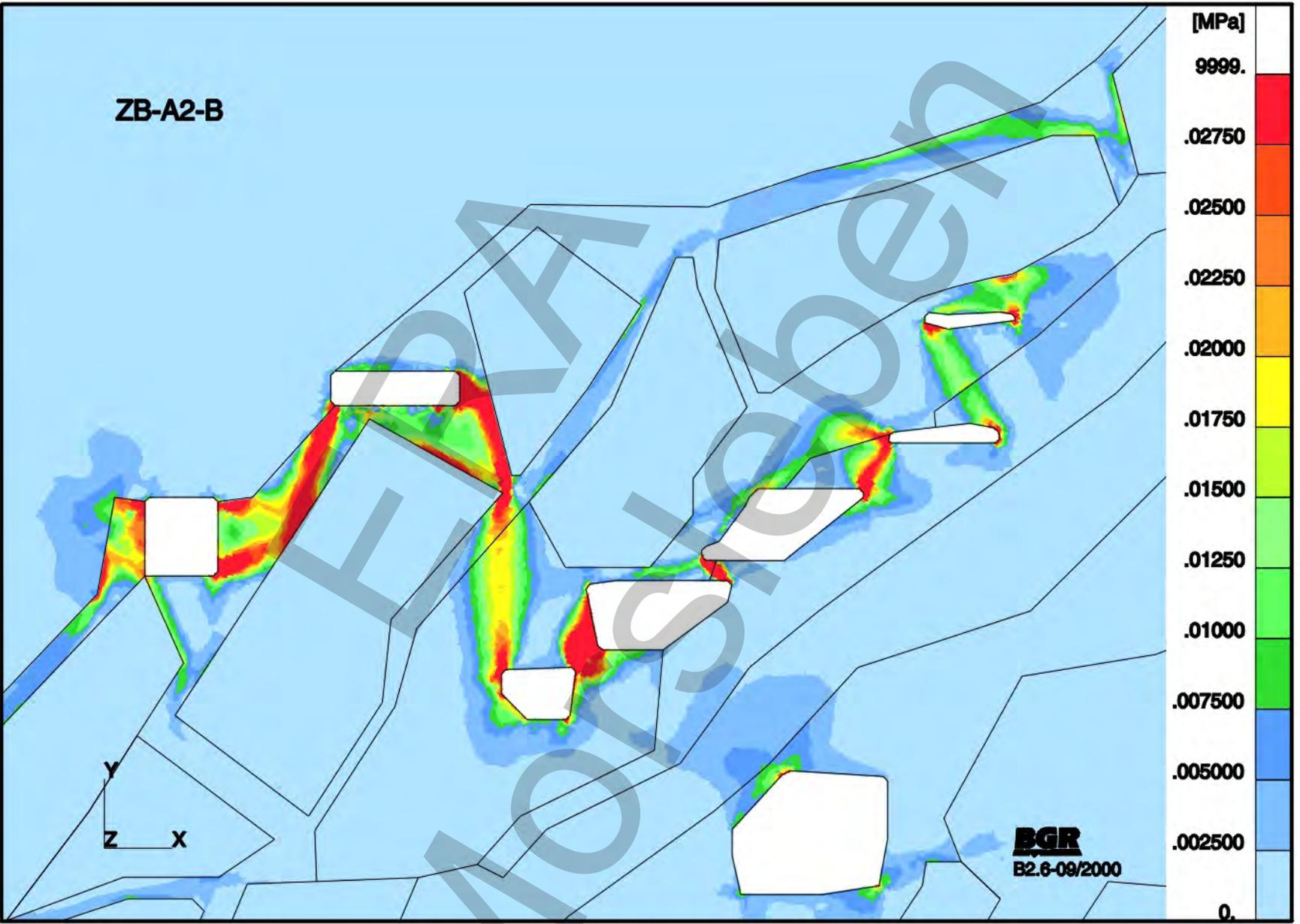
ZB-A2-B: Basismodell  
Grösste Hauptdruckspannungen  $S_2$  nach 100 Jahren (Ausschnitt)

Y  
Z X

**BGR**  
B2.6-09/2000

ZB-A2-B: Basismodell  
Effektivspannungen nach 100 Jahre (Ausschnitt)





ZB-A2-B

ZB-A2-B: Basismodell  
Effektivverzerrungen nach 100 Jahren (Ausschnitt)

Y  
Z X

**BGR**  
B2.6-09/2000

Abbaue:

 unverfüllt

ZB-A2-B

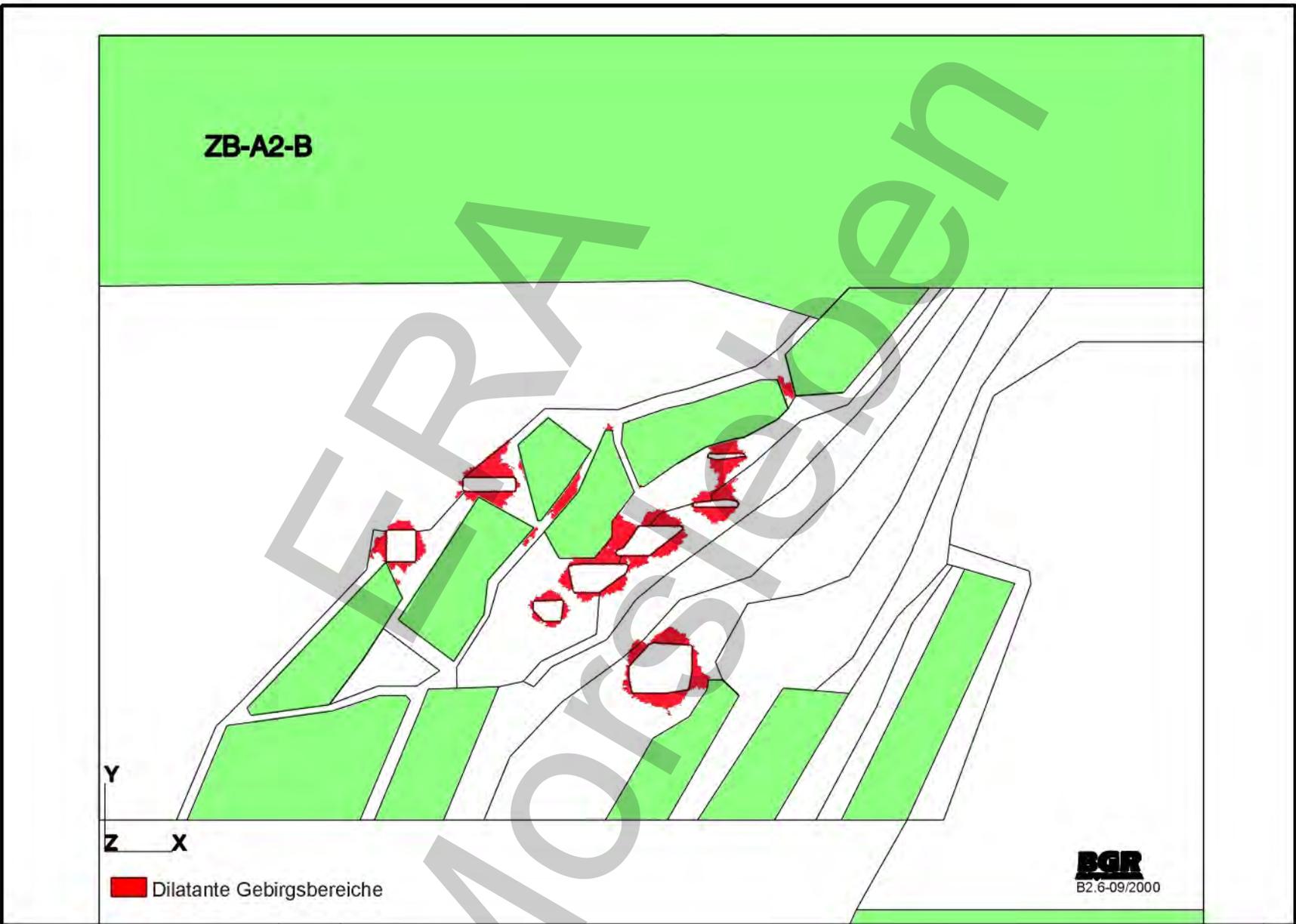
Y  
Z X

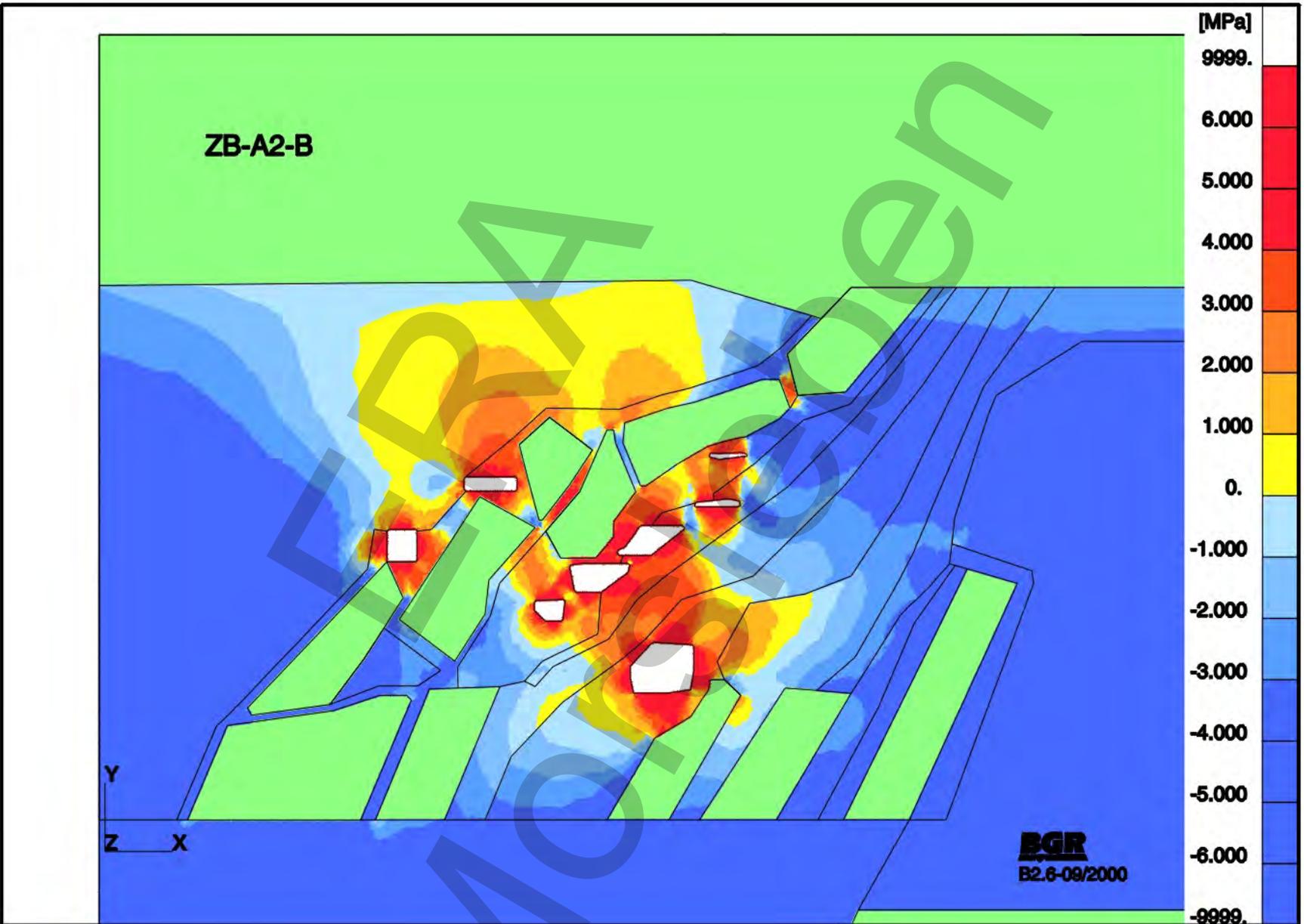
 Dilatante Gebirgsbereiche

**BGR**  
B2.6-09/2000

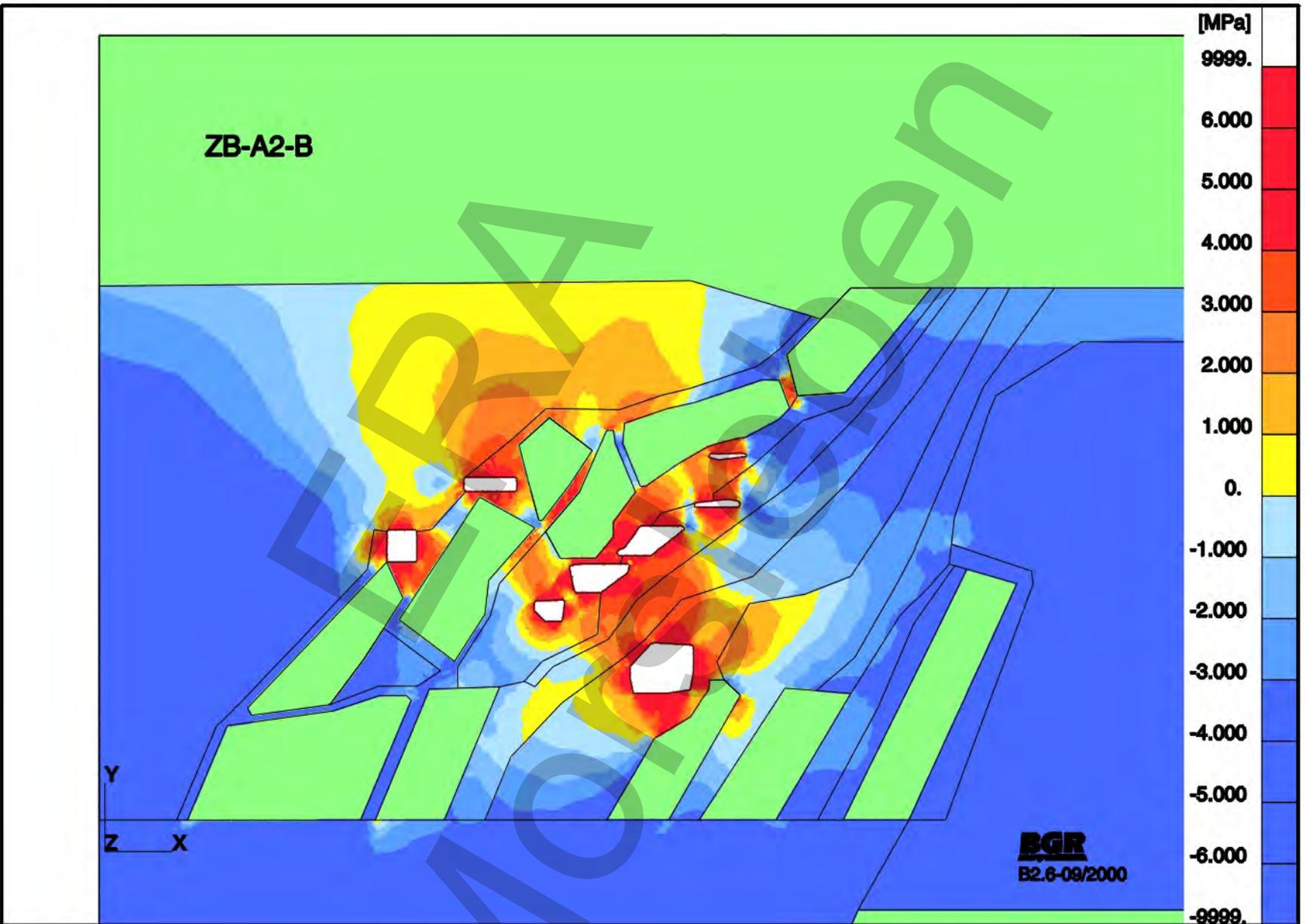
ZB-A2-B: Basismodell  
Dilatante Gebirgsbereiche nach 60 Jahren

**ZB-A2-B: Basismodell  
Dilatante Gebirgsbereiche nach 100 Jahren**



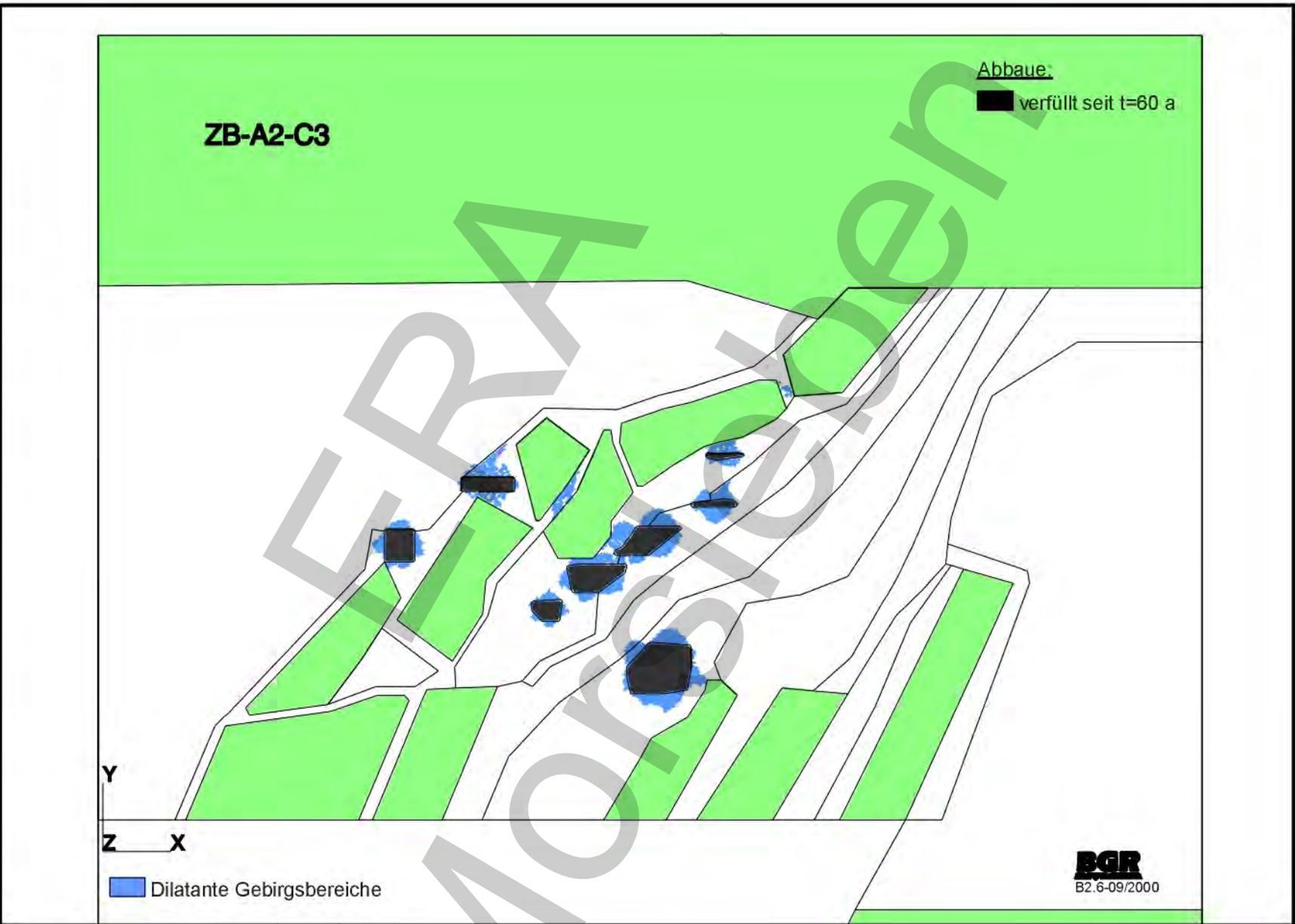


ZB-A2-B: Basismodell  
Differenz zwischen Laugendruck und kleinster Hauptdruckspannung nach 60 Jahren

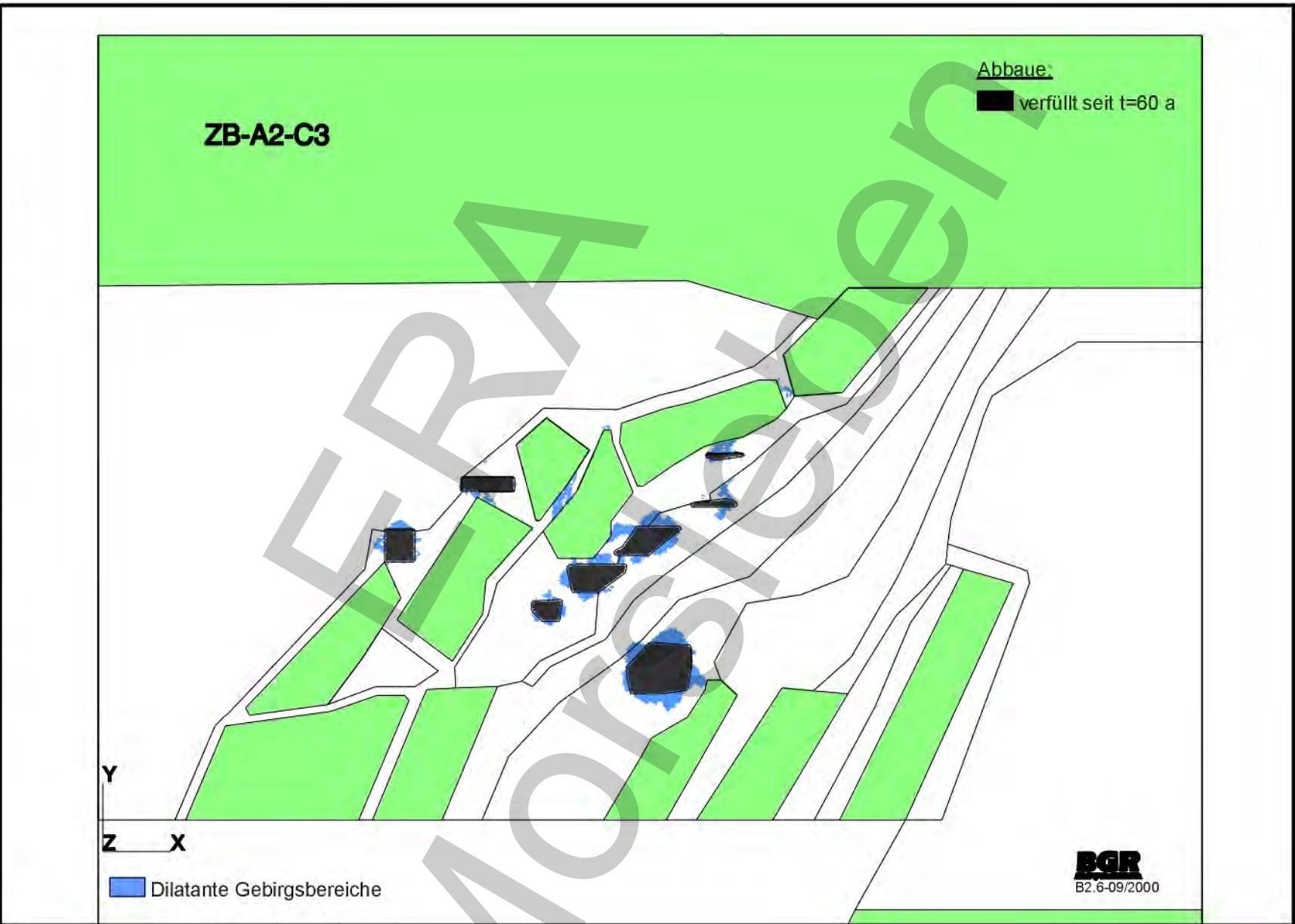


ZB-A2-B: Basismodell  
Differenz zwischen Laugendruck und kleinster Hauptdruckspannung nach 100 Jahren

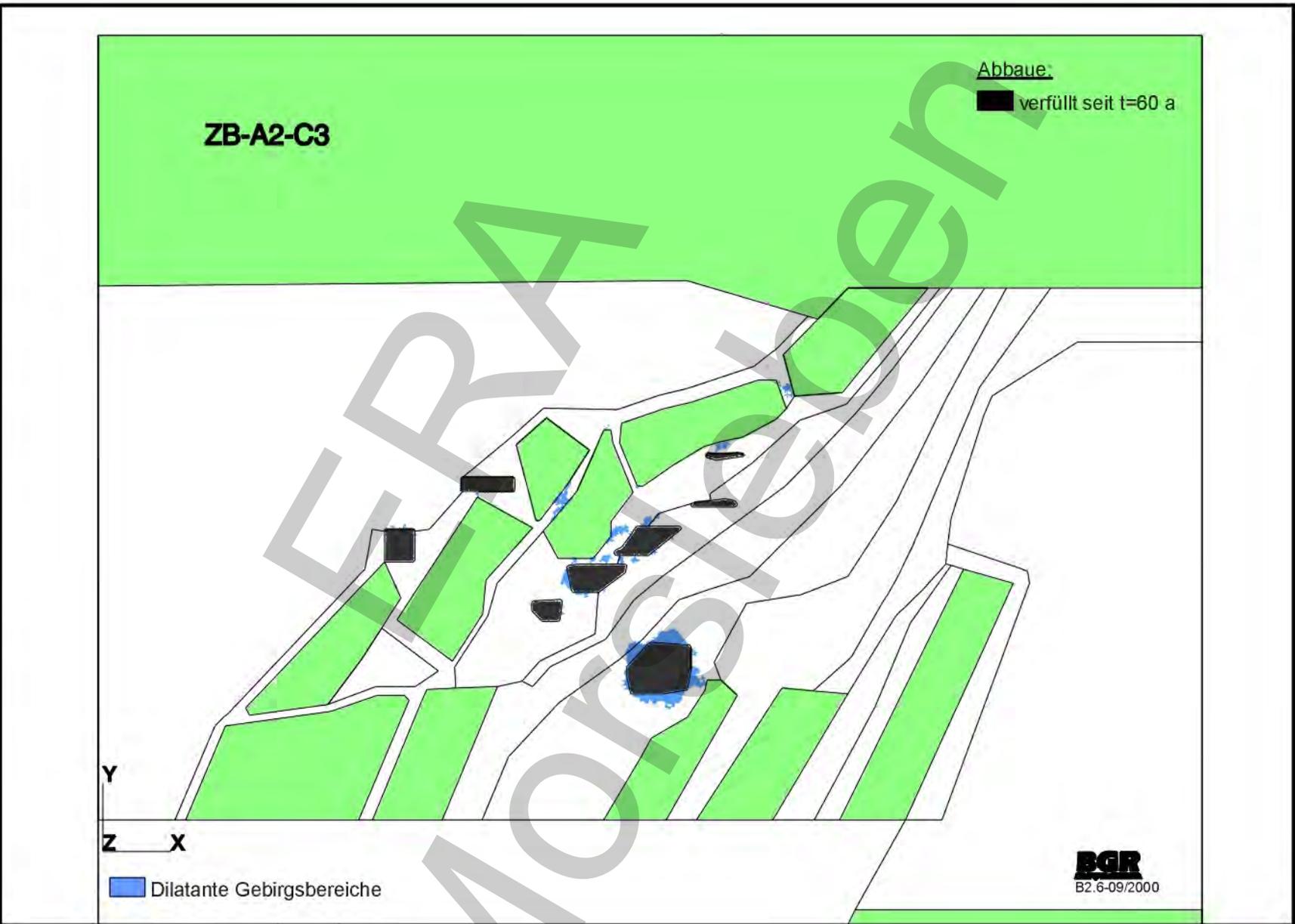
**ZB-A2-C3: Verfüllung aller Abbaue 60 Jahre nach Ausbruch (Versatz: E=17,5 MPa)  
Momentane Ueberschreitung der Dilatanzgrenze zum Zeitpunkt 60 Jahre**

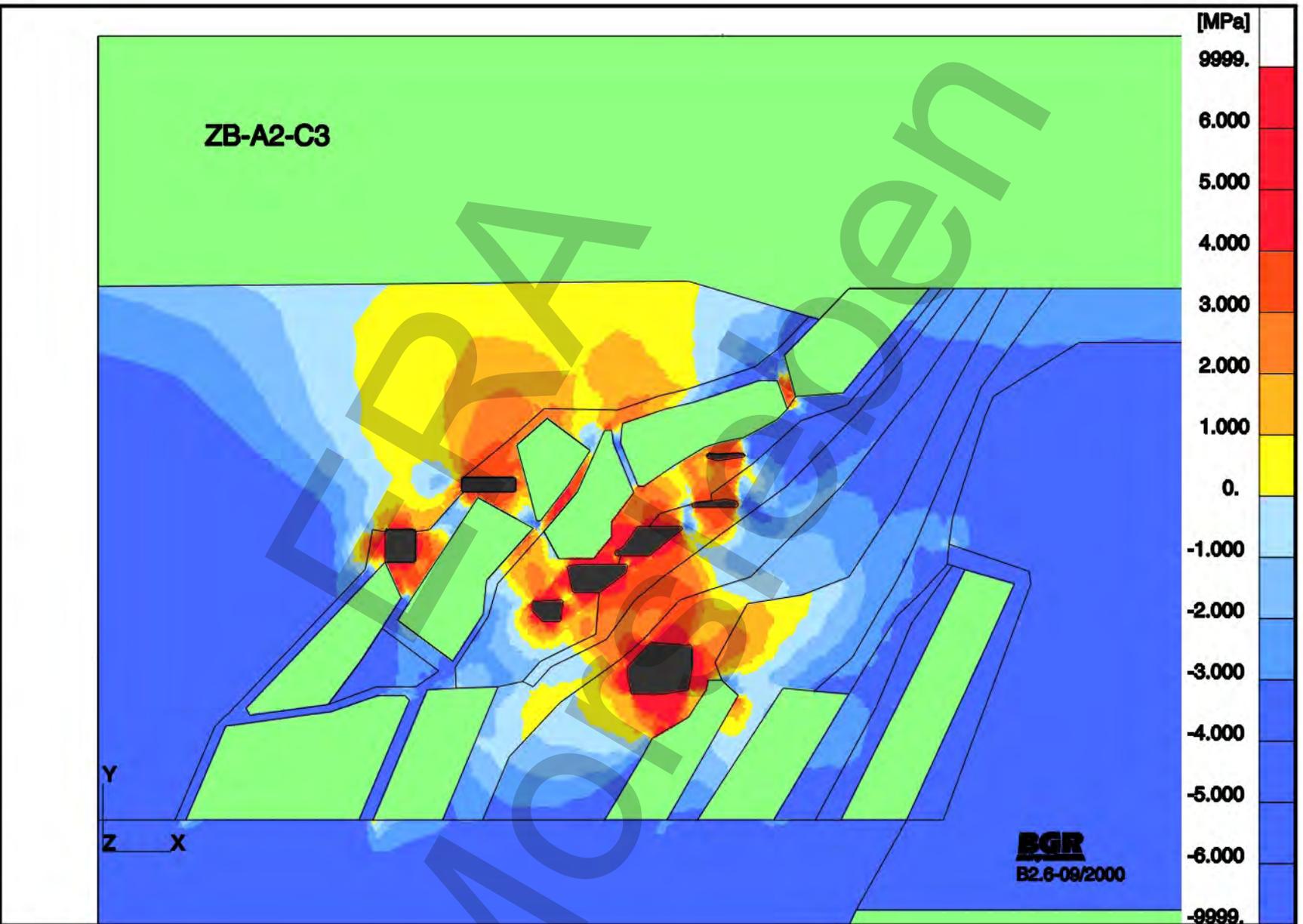


**ZB-A2-C3: Verfüllung aller Abbaue 60 Jahre nach Ausbruch (Versatz: E=17,5 MPa)  
Momentane Ueberschreitung der Dilatanzgrenze zum Zeitpunkt 100 Jahre**

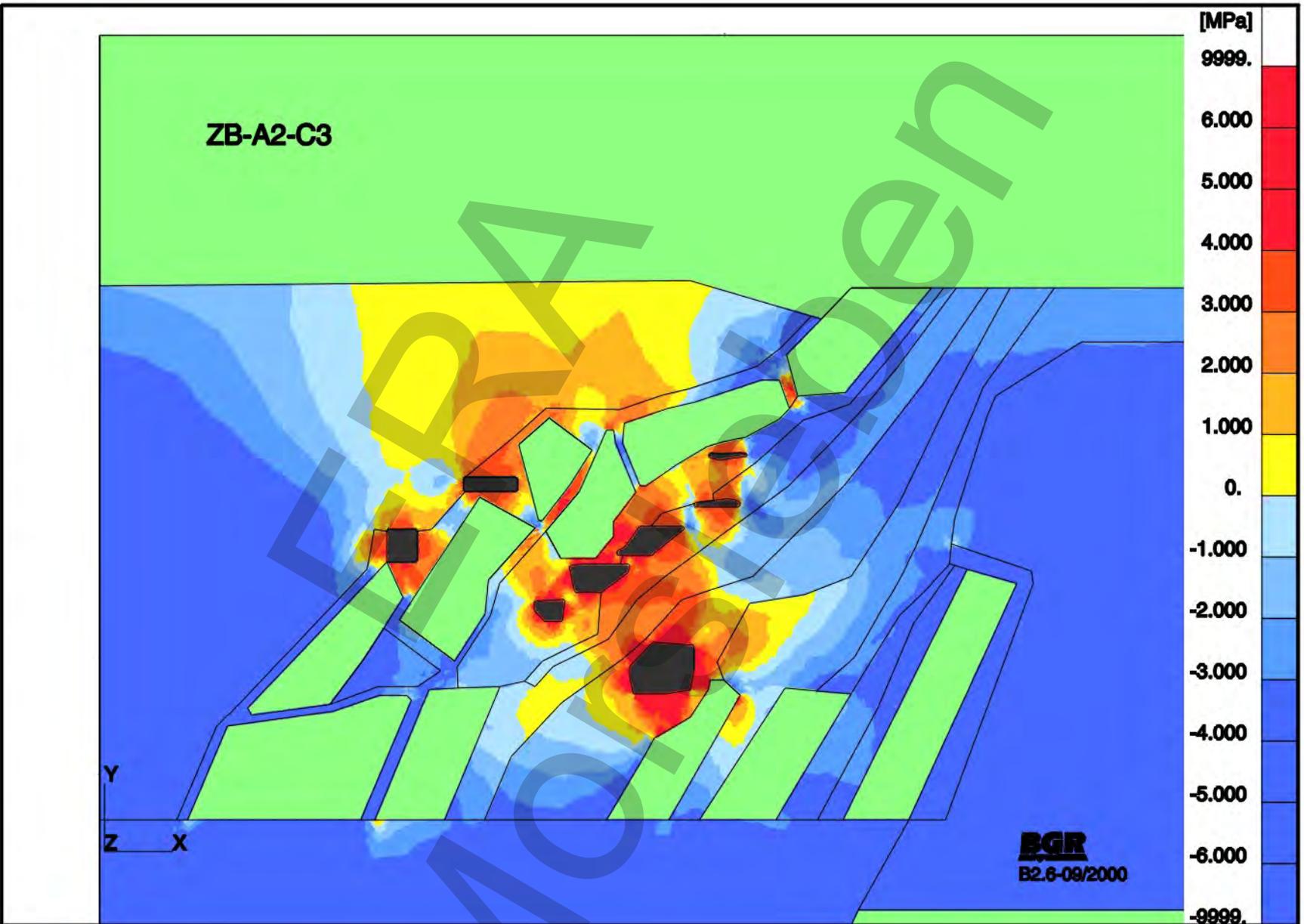


**ZB-A2-C3: Verfüllung aller Abbaue 60 Jahre nach Ausbruch (Versatz: E=17,5 MPa)  
Momentane Ueberschreitung der Dilatanzgrenze zum Zeitpunkt 160 Jahre**



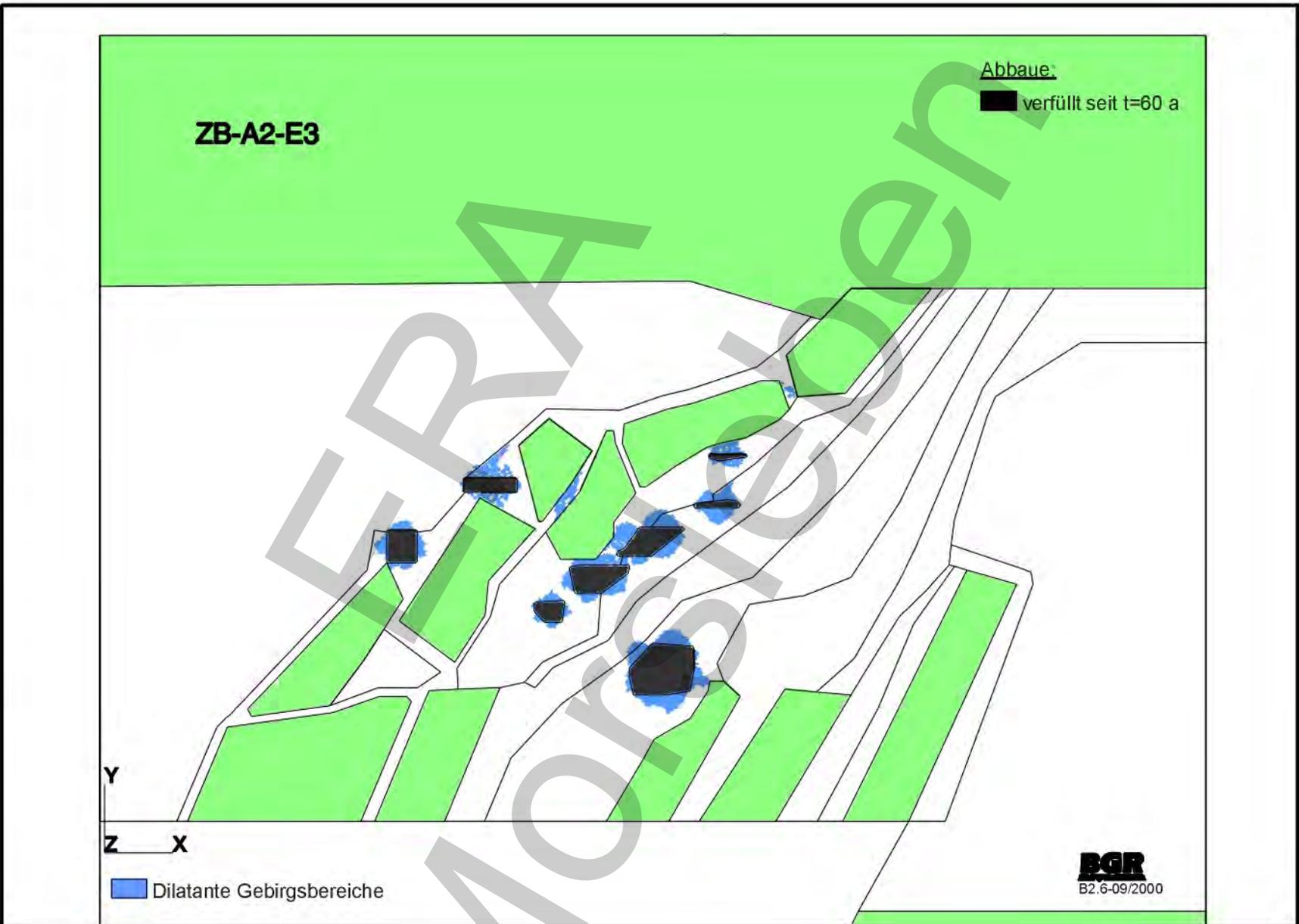


**ZB-A2-C3: Verteilung aller Abbaue 60 Jahre nach Ausbruch (Versatz:  $E=17,5$  MPa)  
Differenz zwischen Laugendruck und kleinster Hauptdruckspannung nach 100 Jahren**

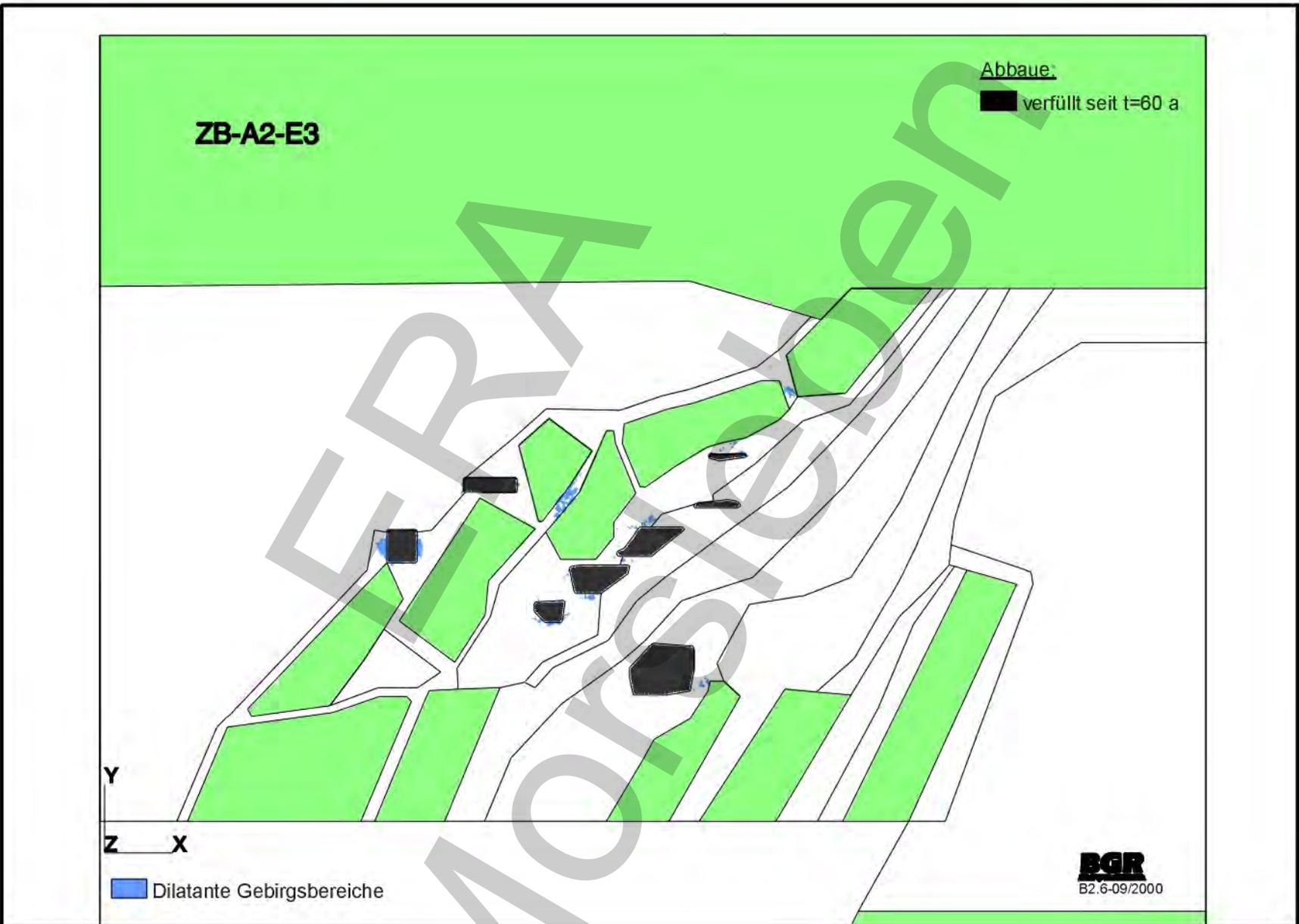


ZB-A2-C3: Verteilung aller Abbaue 60 Jahre nach Ausbruch (Versatz:  $E=17,5$  MPa)  
Differenz zwischen Laugendruck und kleinster Hauptdruckspannung nach 160 Jahren

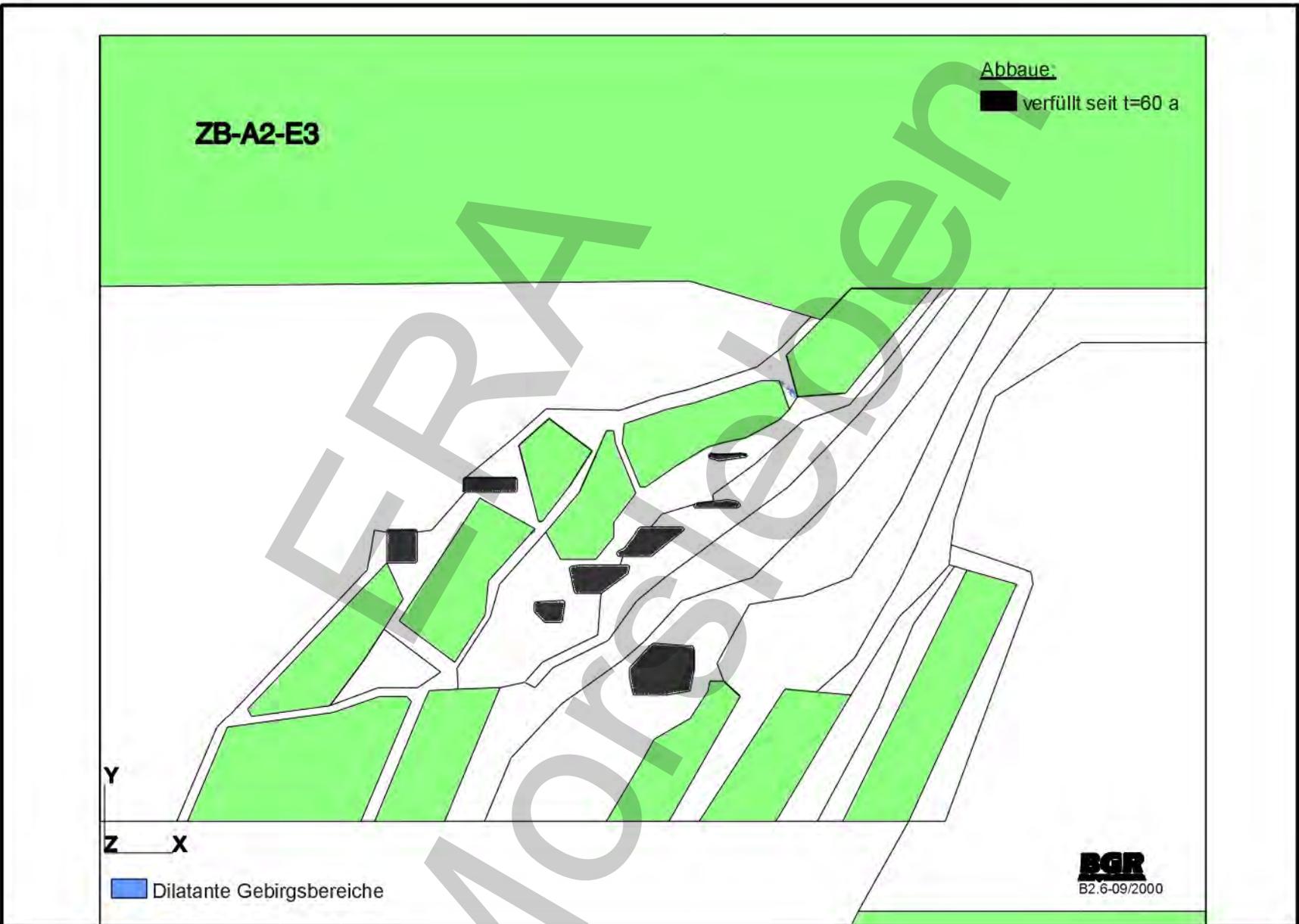
**ZB-A2-E3: Verfüllung aller Abbaue 60 Jahre nach Ausbruch (Versatz: E=3,5 GPa)  
Momentane Ueberschreitung der Dilatanzgrenze zum Zeitpunkt 60 Jahre**

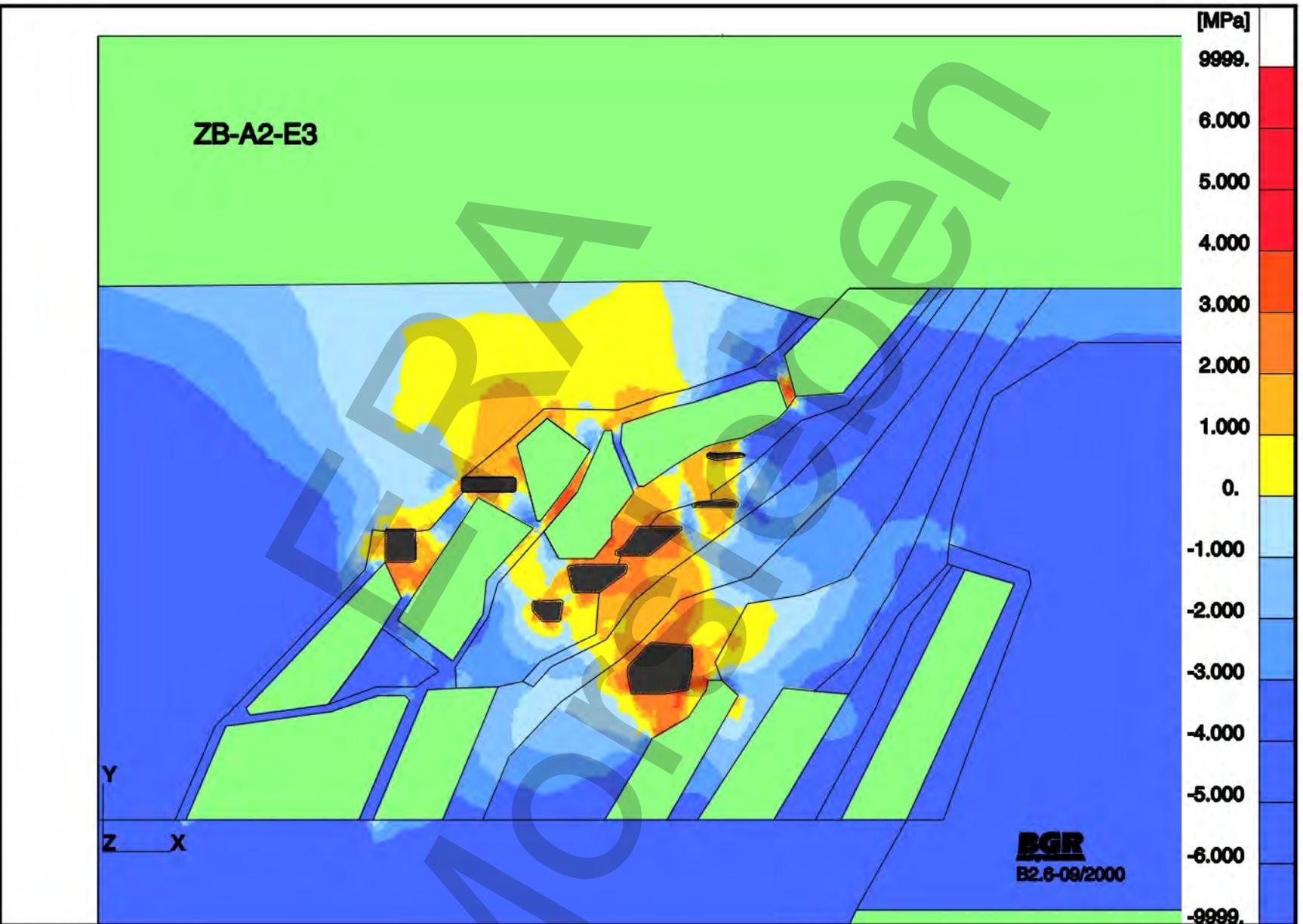


**ZB-A2-E3: Verfüllung aller Abbaue 60 Jahre nach Ausbruch (Versatz: E=3,5 GPa)  
Momentane Ueberschreitung der Dilatanzgrenze zum Zeitpunkt 64 Jahre**

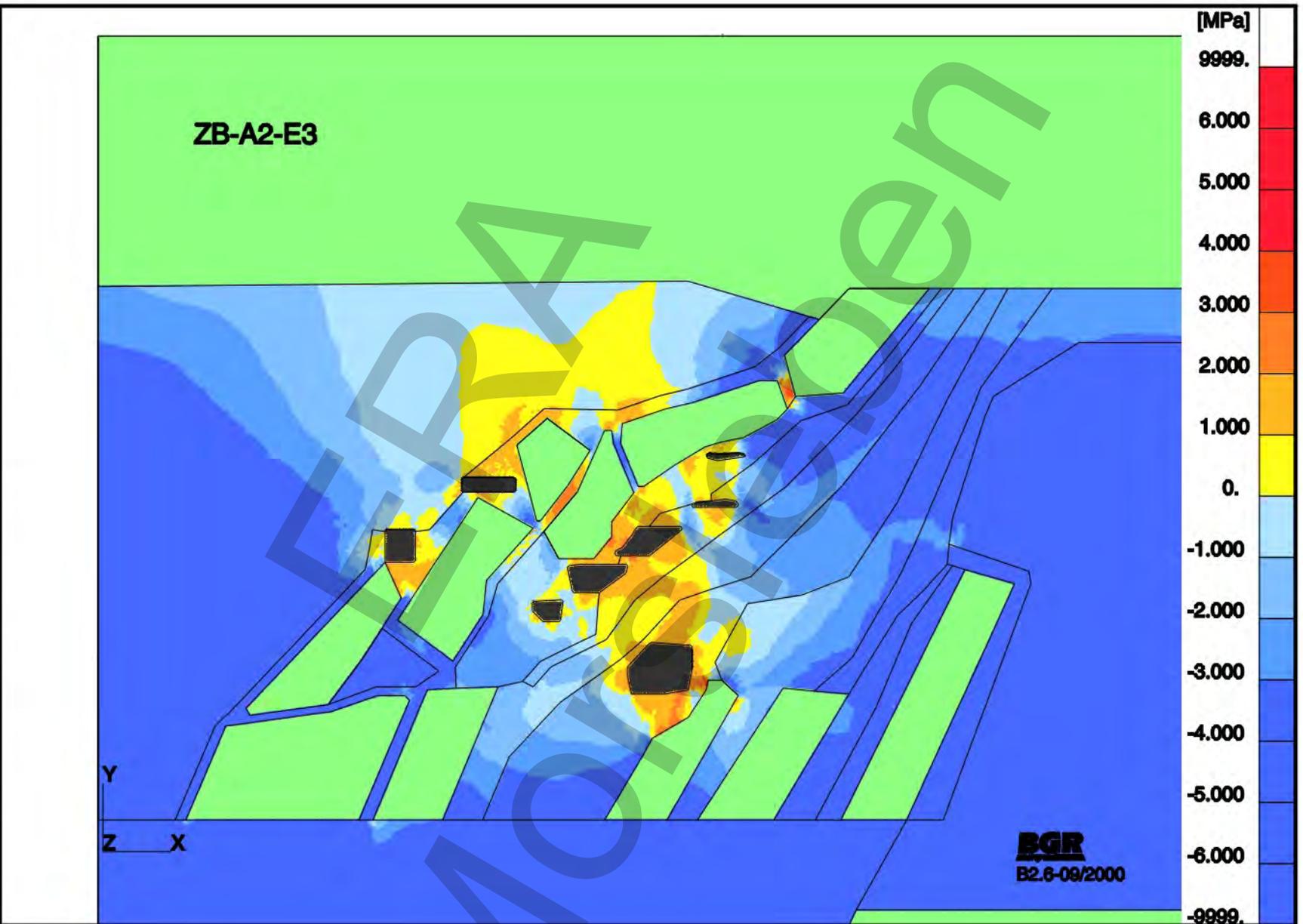


**ZB-A2-E3: Verfüllung aller Abbaue 60 Jahre nach Ausbruch (Versatz: E=3,5 GPa)  
Momentane Ueberschreitung der Dilatanzgrenze zum Zeitpunkt 80 Jahre**

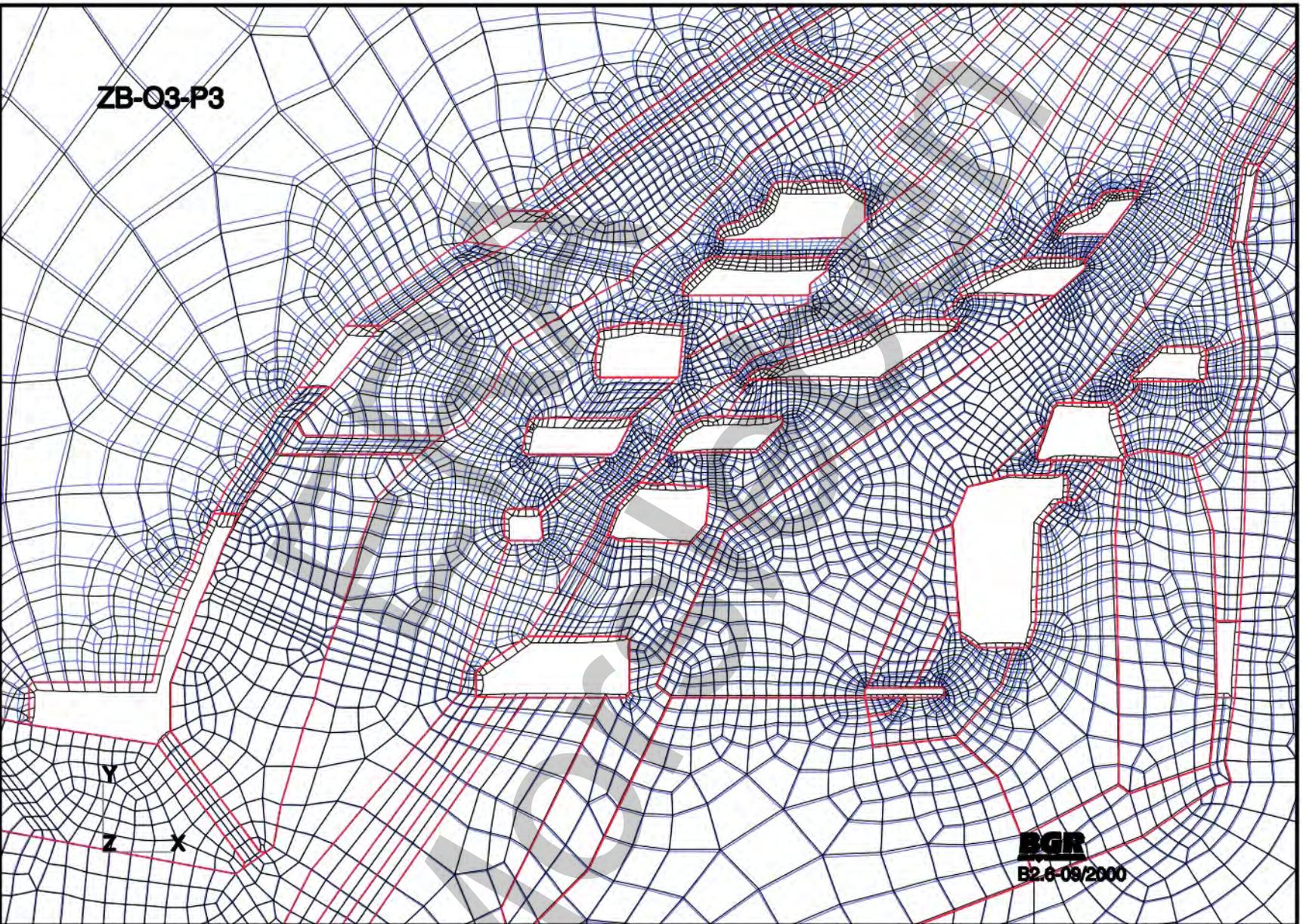




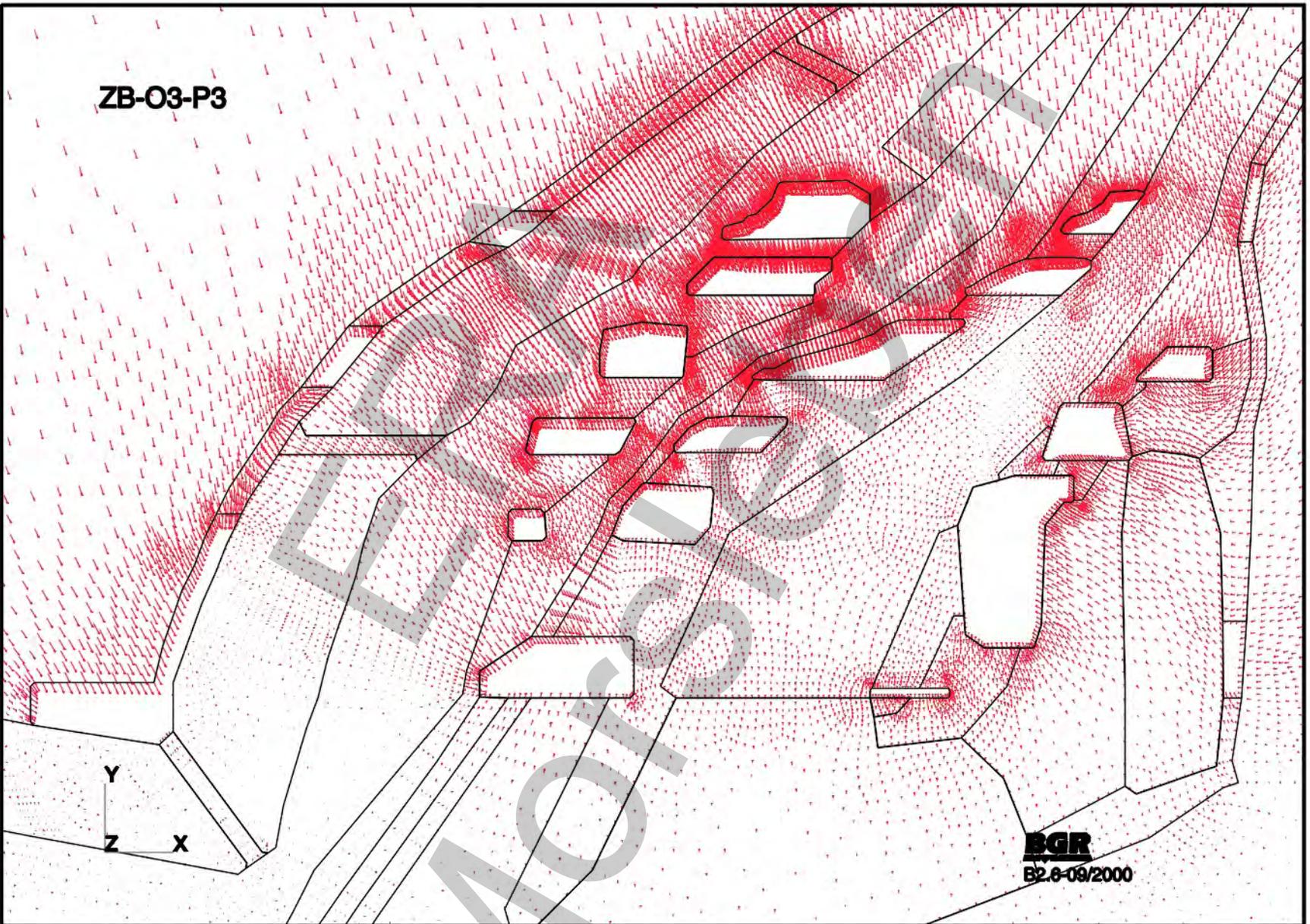
ZB-A2-E3: Verteilung aller Abbaue 60 Jahre nach Ausbruch (Versatz:  $E=3,5 \text{ GPa}$ )  
Differenz zwischen Laugendruck und kleinster Hauptdruckspannung nach 100 Jahren



ZB-A2-E3: Verteilung aller Abbaue 60 Jahre nach Ausbruch (Versatz: E=3,5 GPa)  
 Differenz zwischen Laugendruck und kleinster Hauptdruckspannung nach 160 Jahren



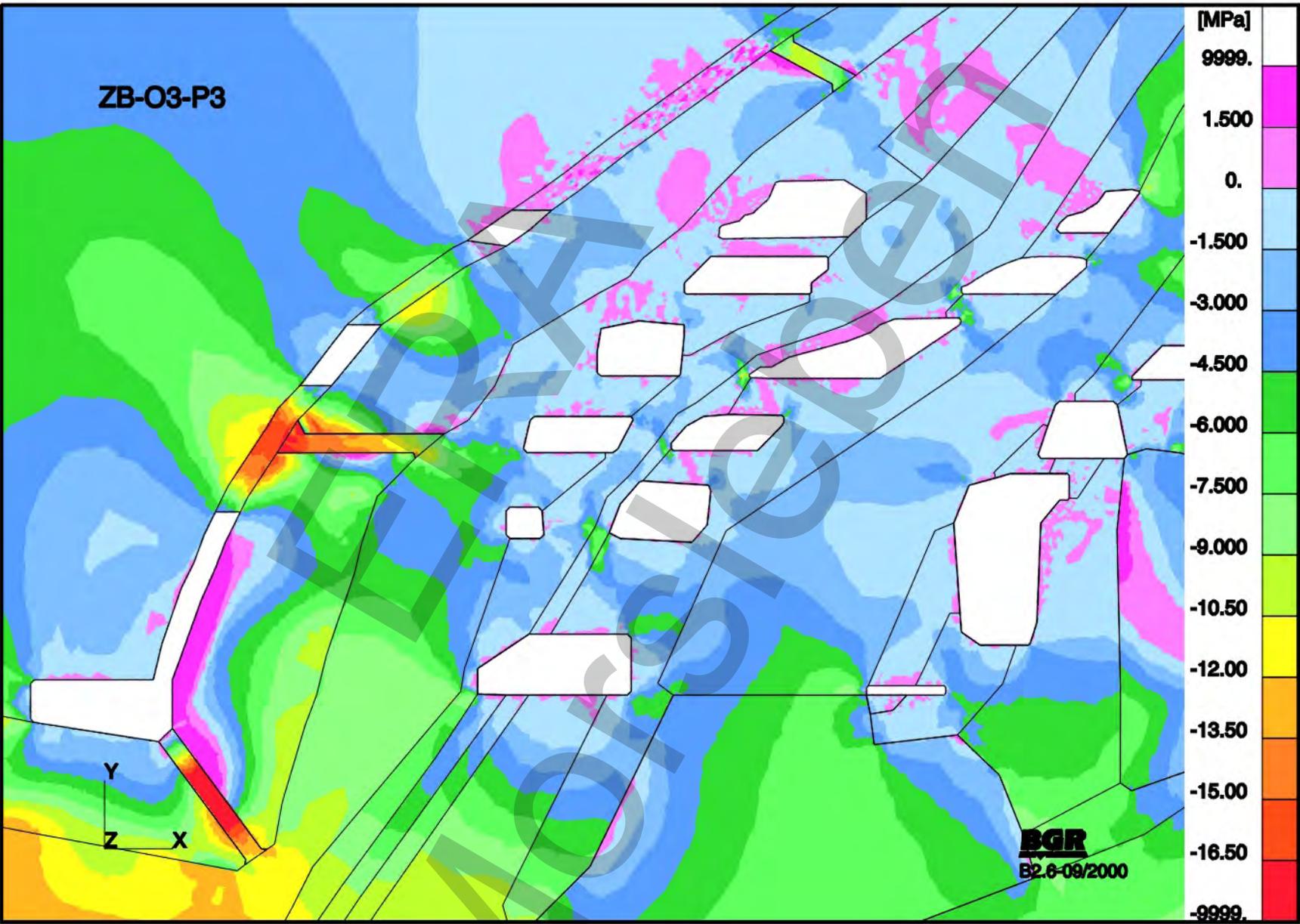
**ZB-O3-P3: Basismodell**  
**Verformte Struktur nach 60 Jahren (Ausschnitt)**  
**(Skalierungsfaktor=10, unverformtes Modell=rot/blau, verformtes Modell=schwarz)**



ZB-O3-P3

**BGR**  
B2.6-09/2000

ZB-O3-P3: Basismodell  
Verschiebungsvektoren nach 60 Jahren (Ausschnitt)



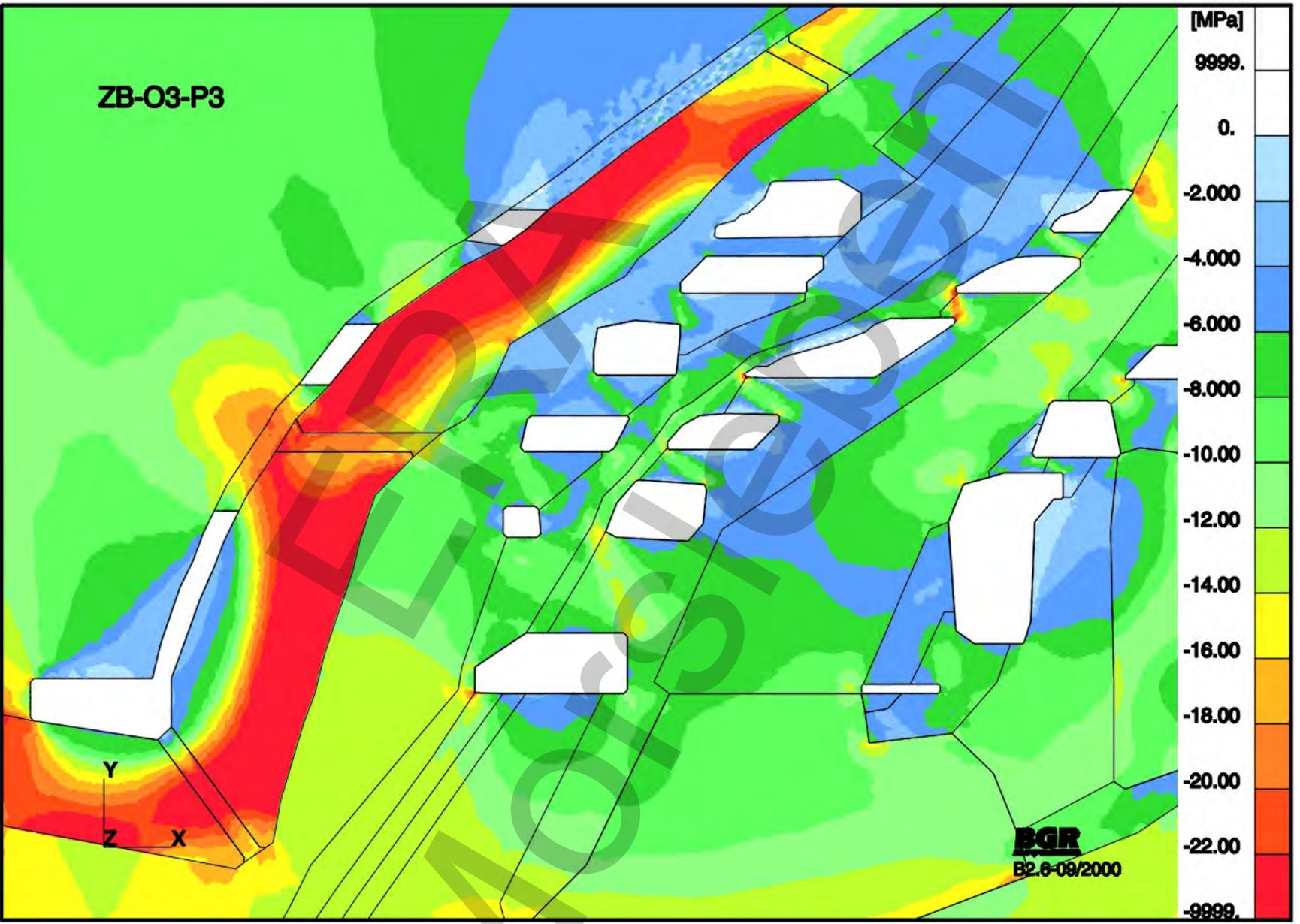
ZB-O3-P3

ZB-O3-P3: Basismodell  
Kleinste Hauptdruckspannungen S1 nach 100 Jahren (Ausschnitt)

Y  
Z X

**BGR**  
B2.6-09/2000

ZB-O3-P3: Basismodell  
Grossste Hauptdruckspannungen S2 nach 100 Jahren (Ausschnitt)

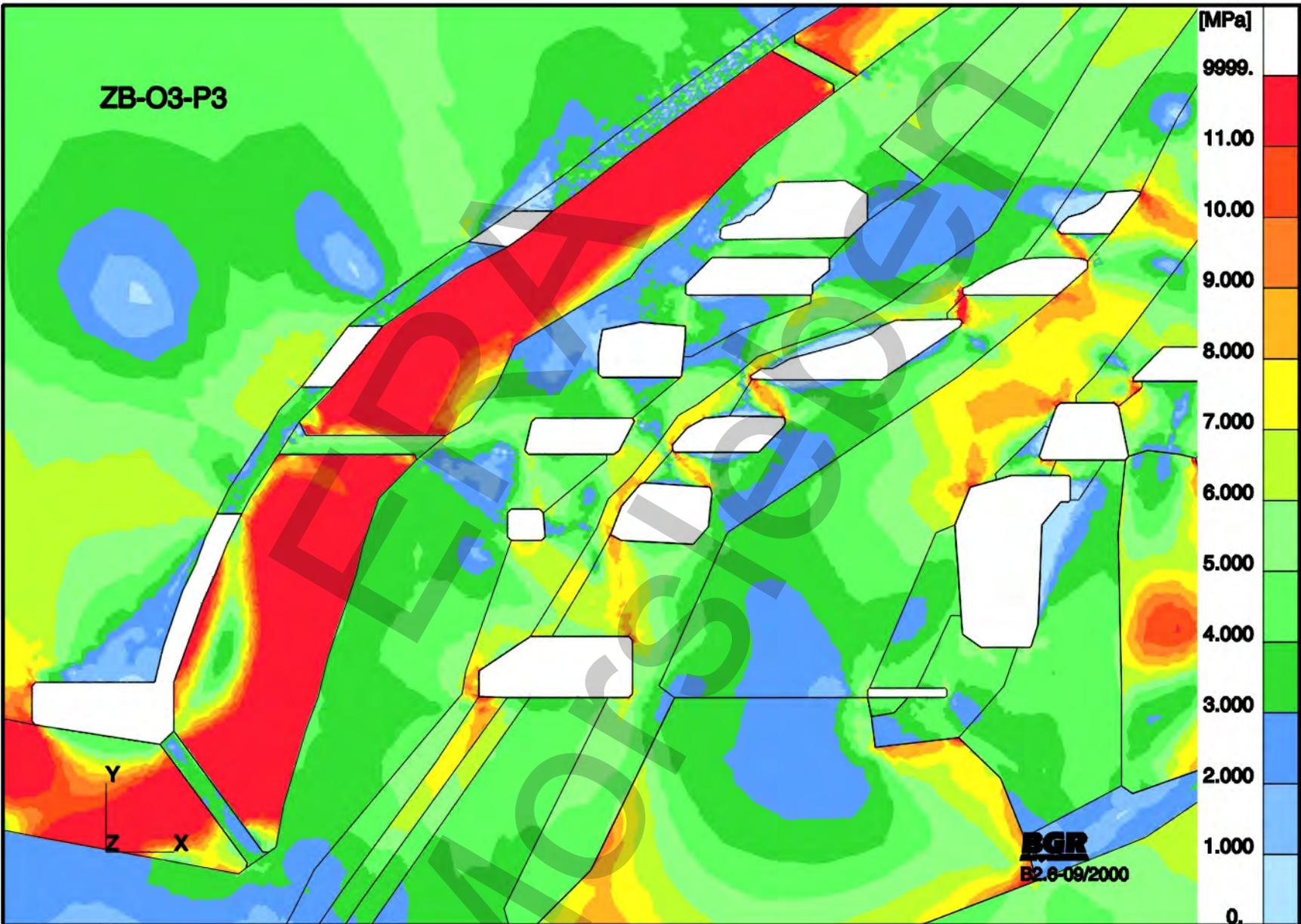


ZB-O3-P3

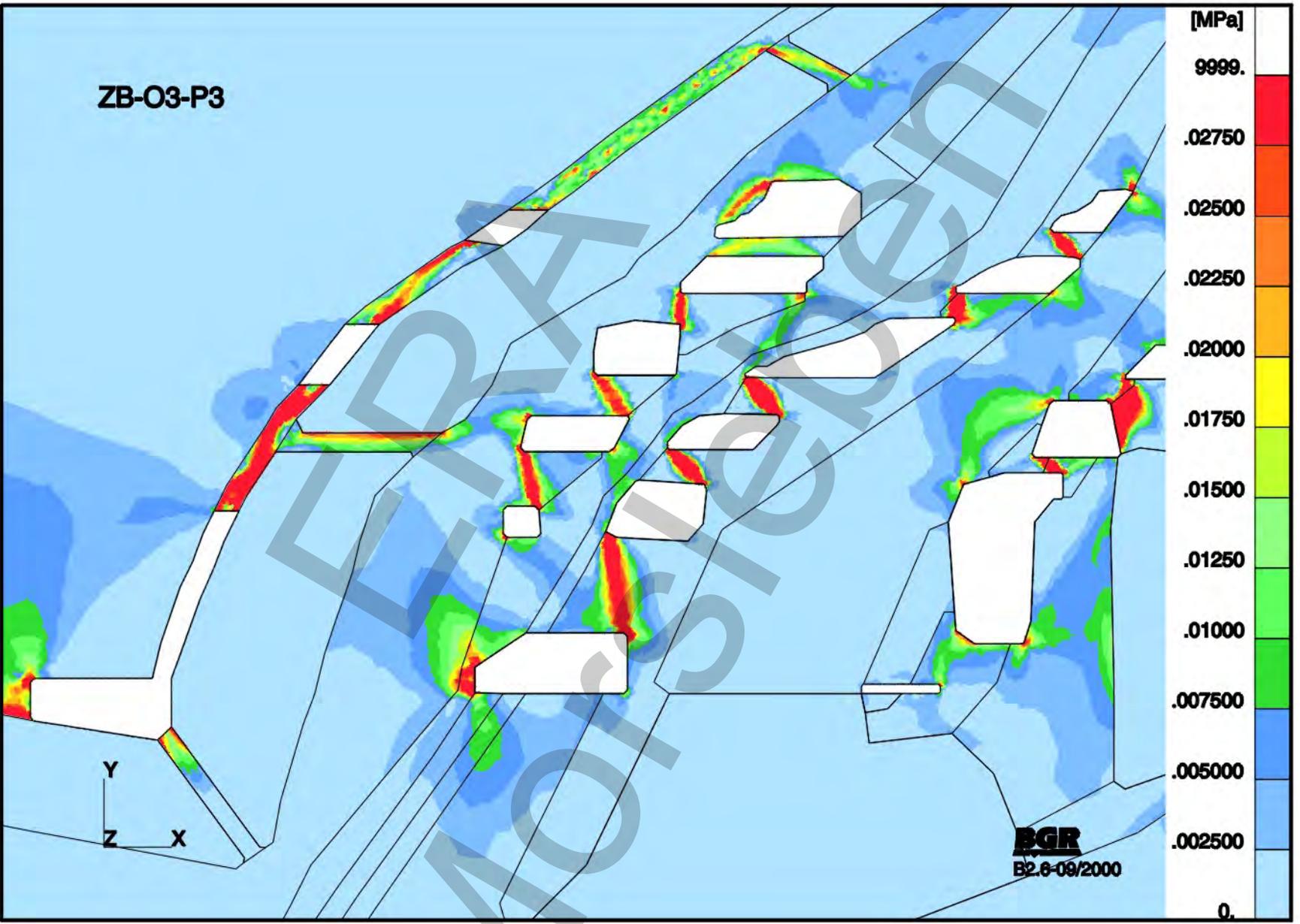
Y  
Z X

**BGR**  
B2.6-09/2000

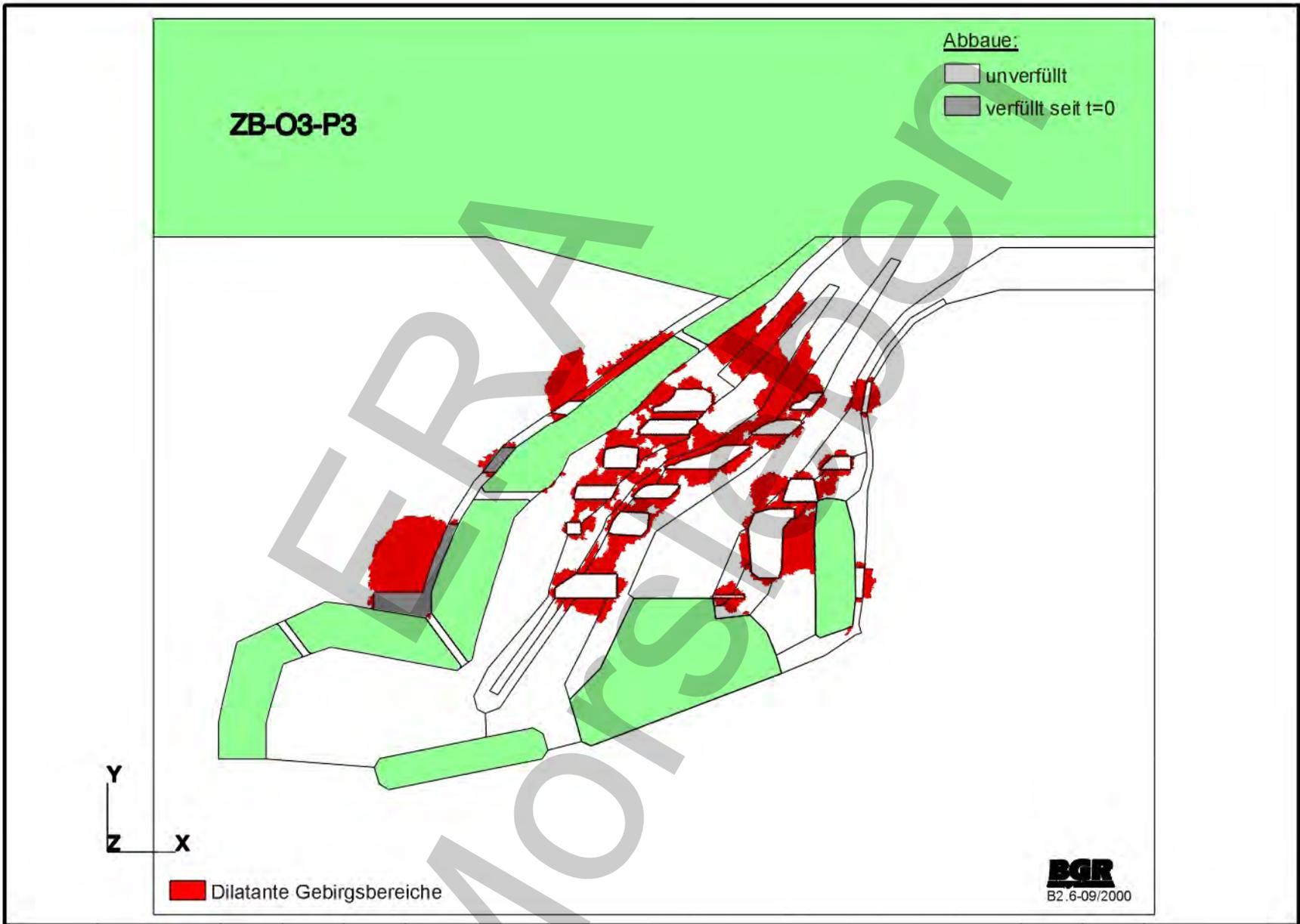
ZB-O3-P3: Basismodell  
Effektivspannungen nach 100 Jahren (Ausschnitt)



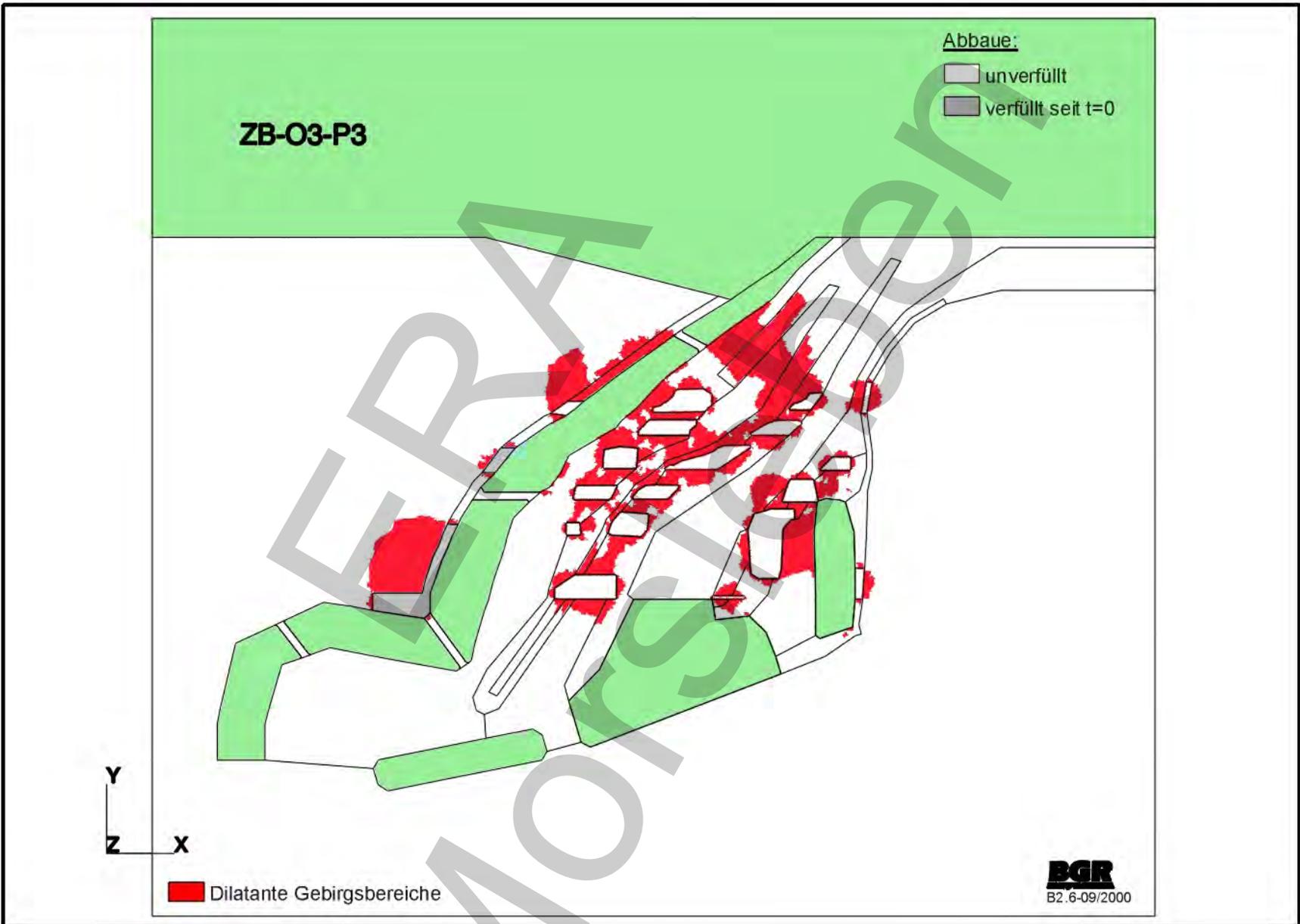
ZB-O3-P3: Basismodell  
Effektivverzerrungen nach 100 Jahren (Ausschnitt)

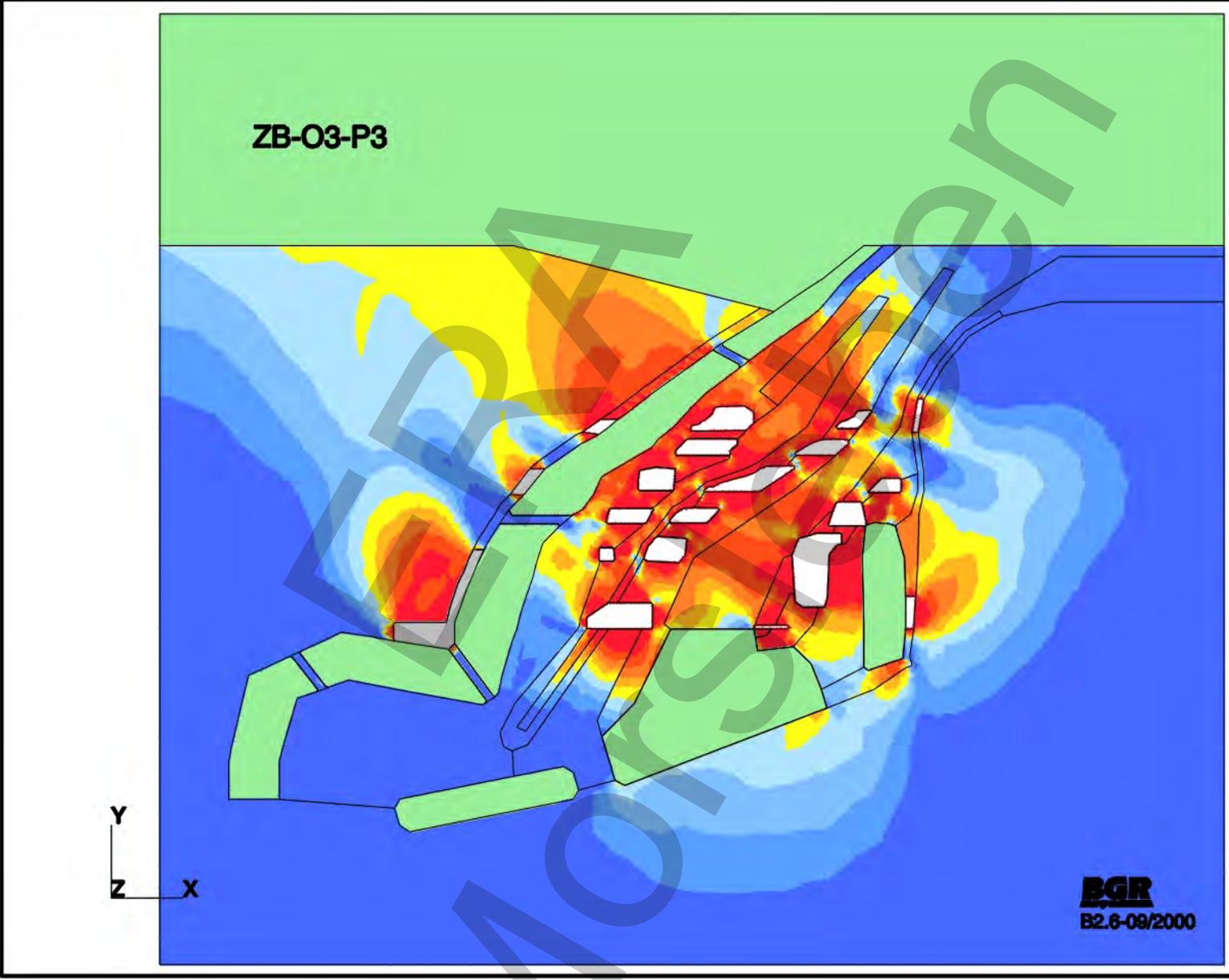
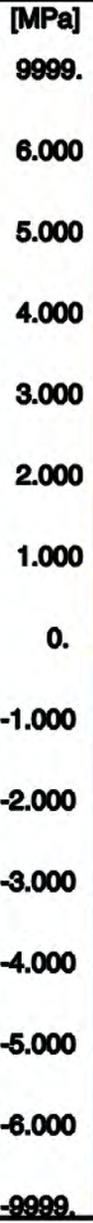


**ZB-O3-P3: Basismodell**  
**Dilatante Gebirgsbereiche nach 60 Jahren**



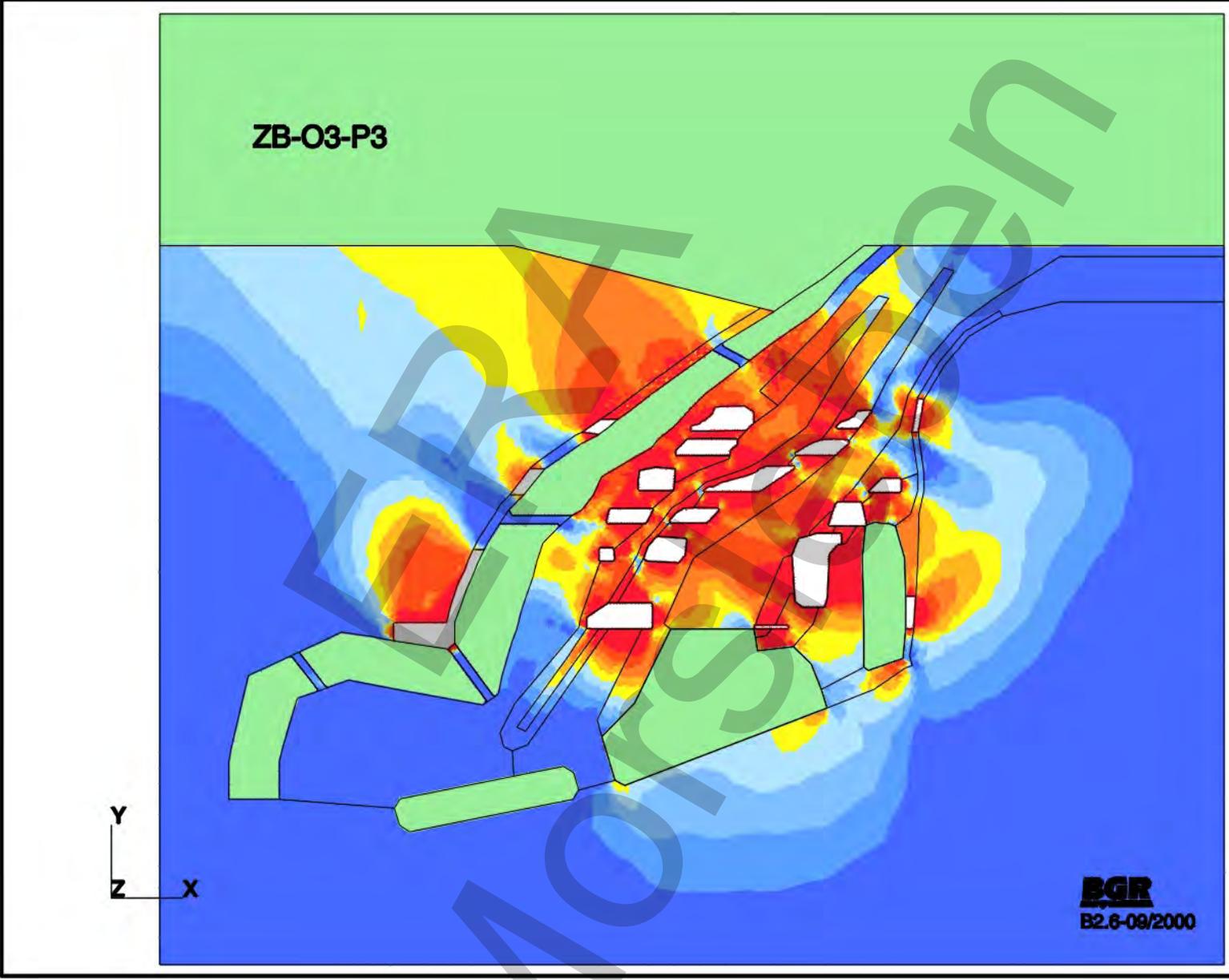
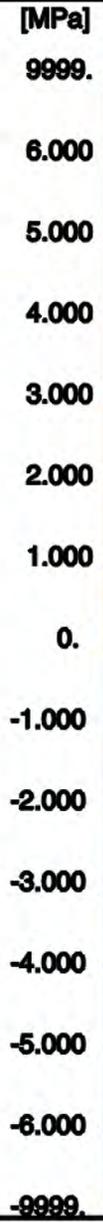
**ZB-O3-P3: Basismodell**  
**Dilatante Gebirgsbereiche nach 100 Jahren**





**BGR**  
B2.6-09/2000

ZB-O3-P3: Basismodell  
Differenz zwischen Laugendruck und kleinster Hauptdruckspannung nach 60 Jahren



**BGR**  
B2.6-09/2000

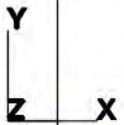
**ZB-O3-P3: Basismodell**  
Differenz zwischen Laugendruck und kleinster Hauptdruckspannung nach 100 Jahren

Abbaue:

verfüllt seit t=0

verfüllt seit t=60 a

ZB-O3-Q3



Dilatante Gebirgsbereiche

**BGR**  
B2.6-09/2000

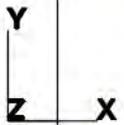
**ZB-O3-Q3: Verteilung aller Abbaue 60 Jahre nach Ausbruch (Versatz: E=17,5 MPa)  
Momentane Überschreitung der Dilatanzgrenze zum Zeitpunkt 60 Jahre**

Abbaue:

verfüllt seit t=0

verfüllt seit t=60 a

ZB-O3-Q3



Dilatante Gebirgsbereiche

**BGR**  
B2.6-09/2000

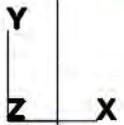
**ZB-O3-Q3: Verteilung aller Abbaue 60 Jahre nach Ausbruch (Versatz: E=17,5 MPa)  
Momentane Überschreitung der Dilatanzgrenze zum Zeitpunkt 100 Jahre**

Abbaue:

verfüllt seit t=0

verfüllt seit t=60 a

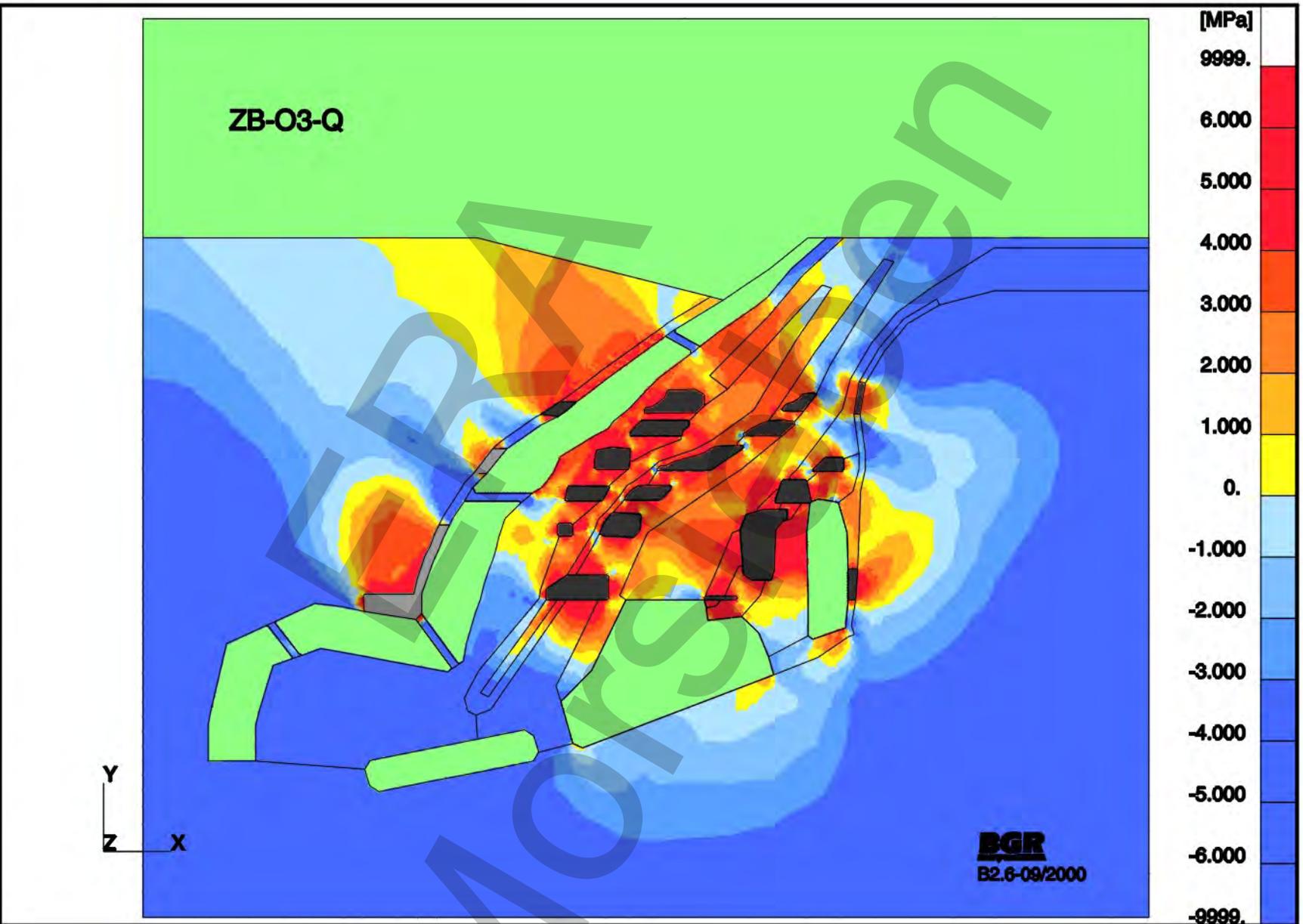
ZB-03-Q3



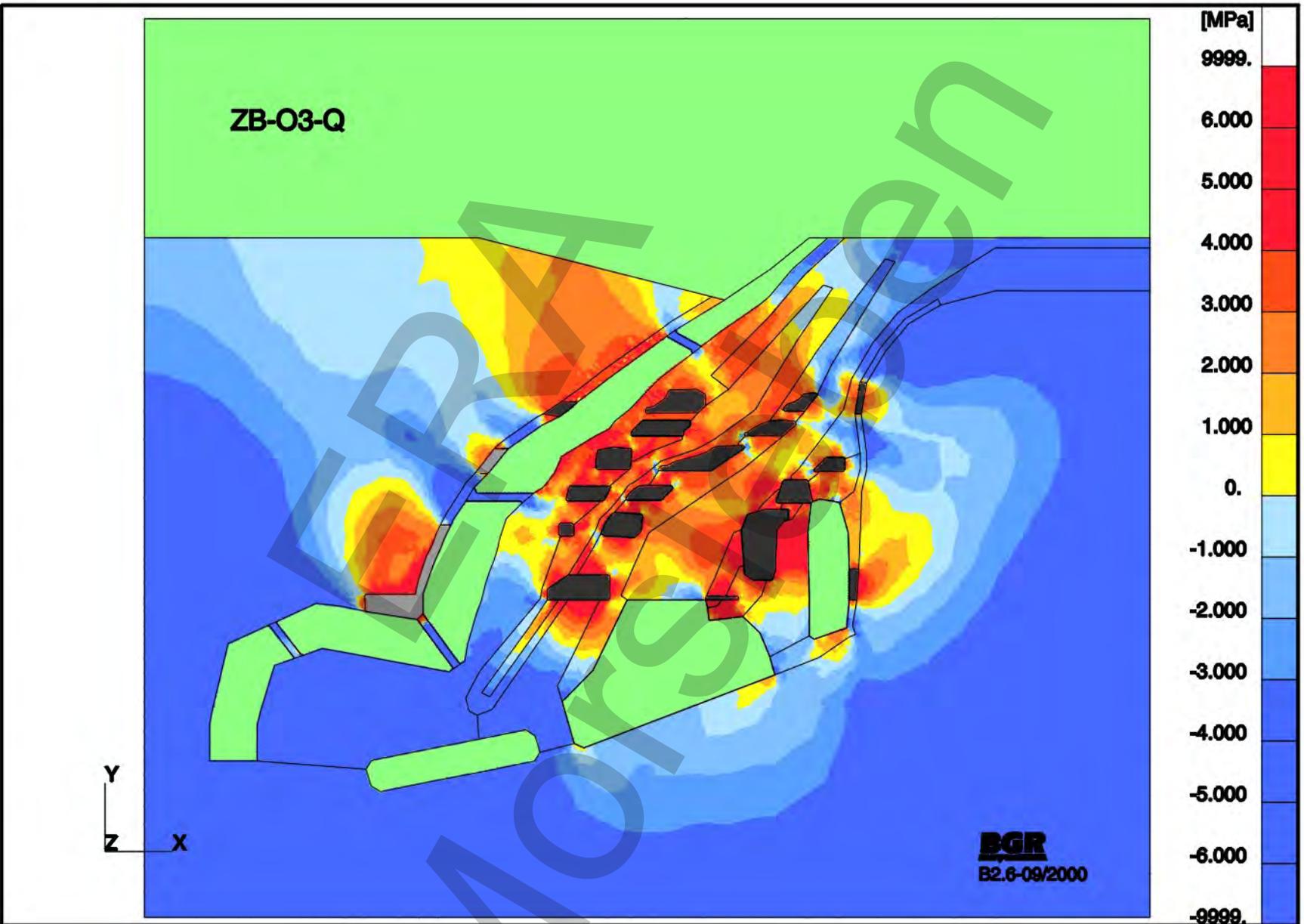
Dilatante Gebirgsbereiche

**BGR**  
B2.6-09/2000

**ZB-03-Q3: Verteilung aller Abbaue 60 Jahre nach Ausbruch (Versatz: E=17,5 MPa)  
Momentane Überschreitung der Dilatanzgrenze zum Zeitpunkt 160 Jahre**



ZB-O3-Q: Verteilung aller Abbaue 60 Jahre nach Ausbruch (Versatz:  $E=17,5$  MPa)  
 Differenz zwischen Laugendruck und kleinster Hauptdruckspannung nach 100 Jahren



ZB-O3-Q: Verteilung aller Abbaue 60 Jahre nach Ausbruch (Versatz:  $E=17,5$  MPa)  
 Differenz zwischen Laugendruck und kleinster Hauptdruckspannung nach 160 Jahren

Abbaue:

verfüllt seit t=0

verfüllt seit t=60 a

ZB-O3-S2



Dilatante Gebirgsbereiche

**BGR**  
B2.6-09/2000

**ZB-O3-S2: Verteilung aller Abbaue 60 Jahre nach Ausbruch (Versatz: E=3,5 GPa)  
Momentane Ueberschreitung der Dilatanzgrenze zum Zeitpunkt 60 Jahre**

Abbaue:

verfüllt seit t=0

verfüllt seit t=60 a

ZB-O3-S2



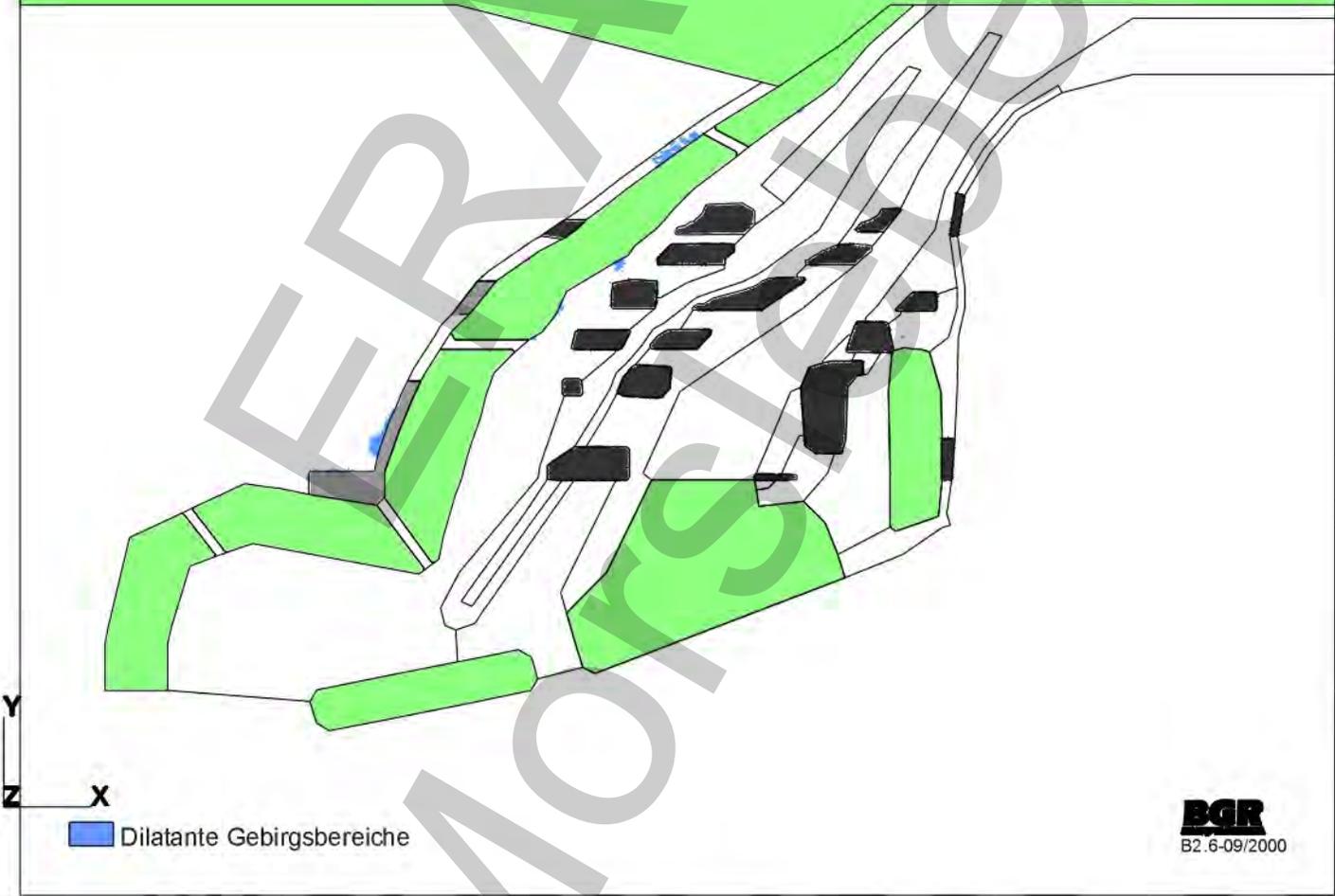
**ZB-O3-S2: Verteilung aller Abbaue 60 Jahre nach Ausbruch (Versatz: E=3,5 GPa)  
Momentane Überschreitung der Dilatanzgrenze zum Zeitpunkt 64 Jahre**

Abbaue:

verfüllt seit t=0

verfüllt seit t=60 a

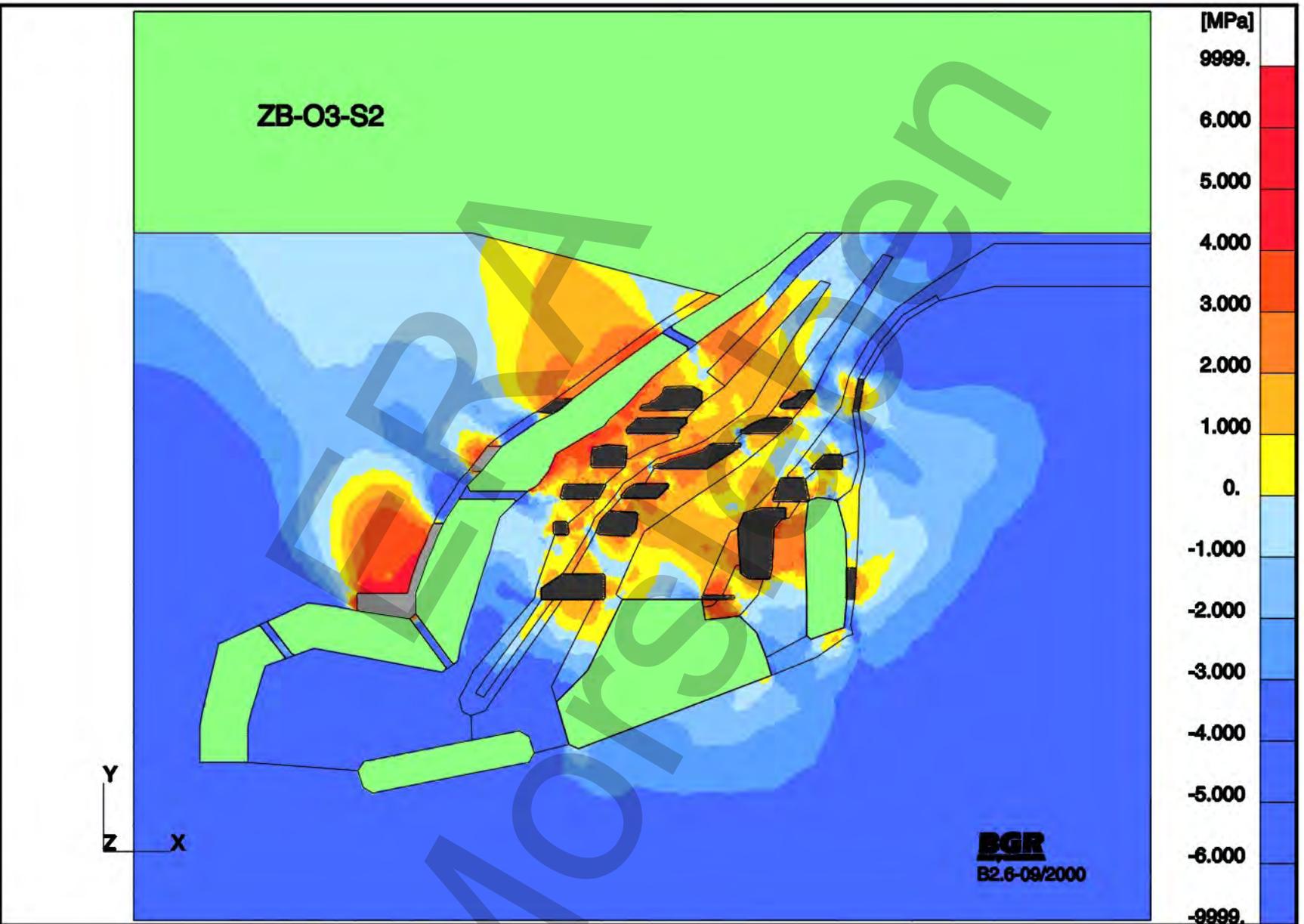
ZB-O3-S2



Dilatante Gebirgsbereiche

**BGR**  
B2.6-09/2000

**ZB-O3-S2: Verteilung aller Abbaue 60 Jahre nach Ausbruch (Versatz: E=3,5 GPa)  
Momentane Ueberschreitung der Dilatanzgrenze zum Zeitpunkt 80 Jahre**

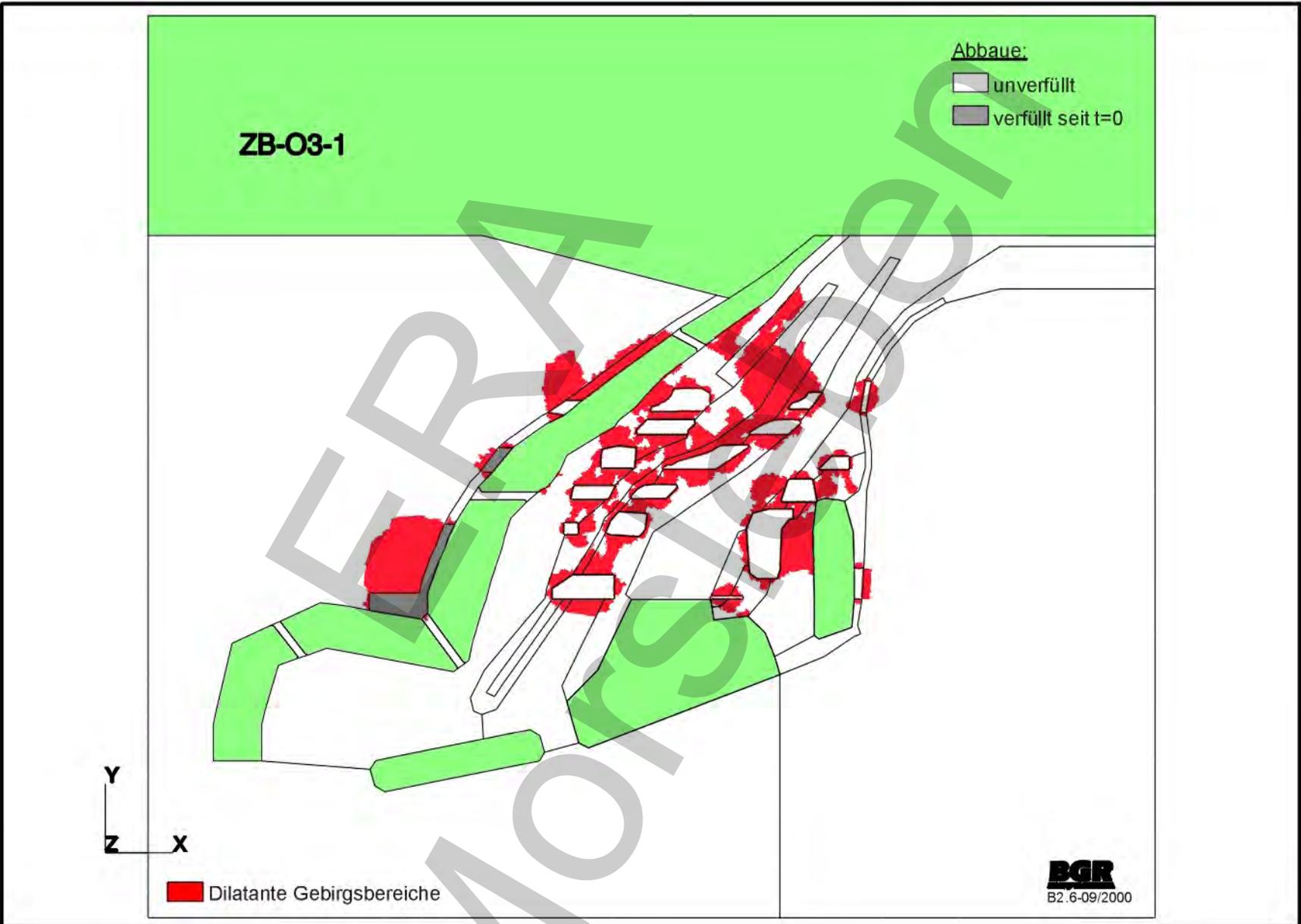


ZB-O3-S2: Verteilung aller Abbaue 60 Jahre nach Ausbruch (Versatz:  $E=3,5$  GPa)  
Differenz zwischen Laugendruck und kleinster Hauptdruckspannung nach 100 Jahren

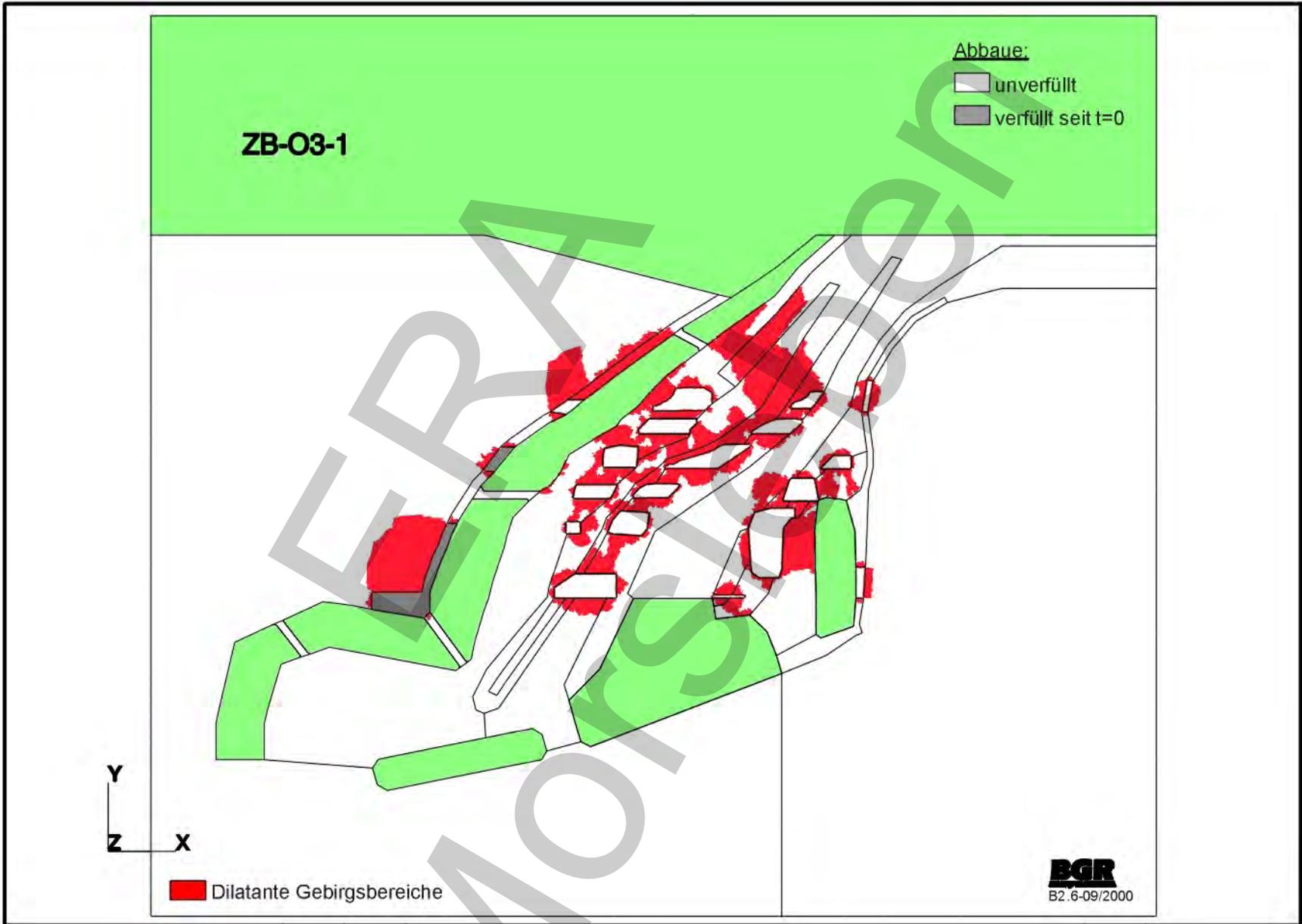
ZB-O3-S2: Verteilung aller Abbaue 60 Jahre nach Ausbruch (Versatz: E=3,5 GPa)  
Differenz zwischen Laugendruck und kleinster Hauptdruckspannung nach 160 Jahren

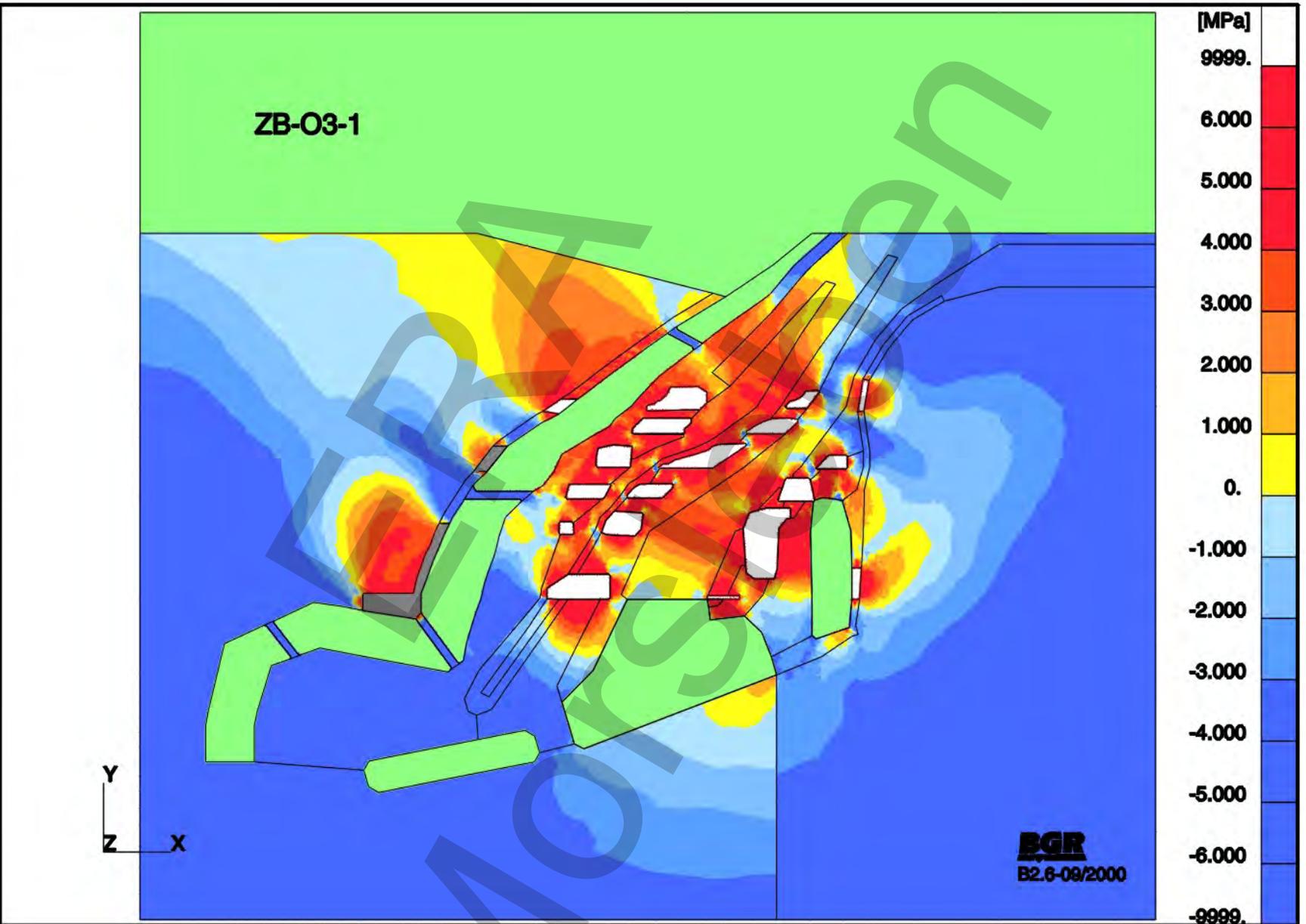


ZB-O3-1: Aufteilung des Homogenbereichs z2HS  
Dilatante Gebirgsbereiche nach 60 Jahren

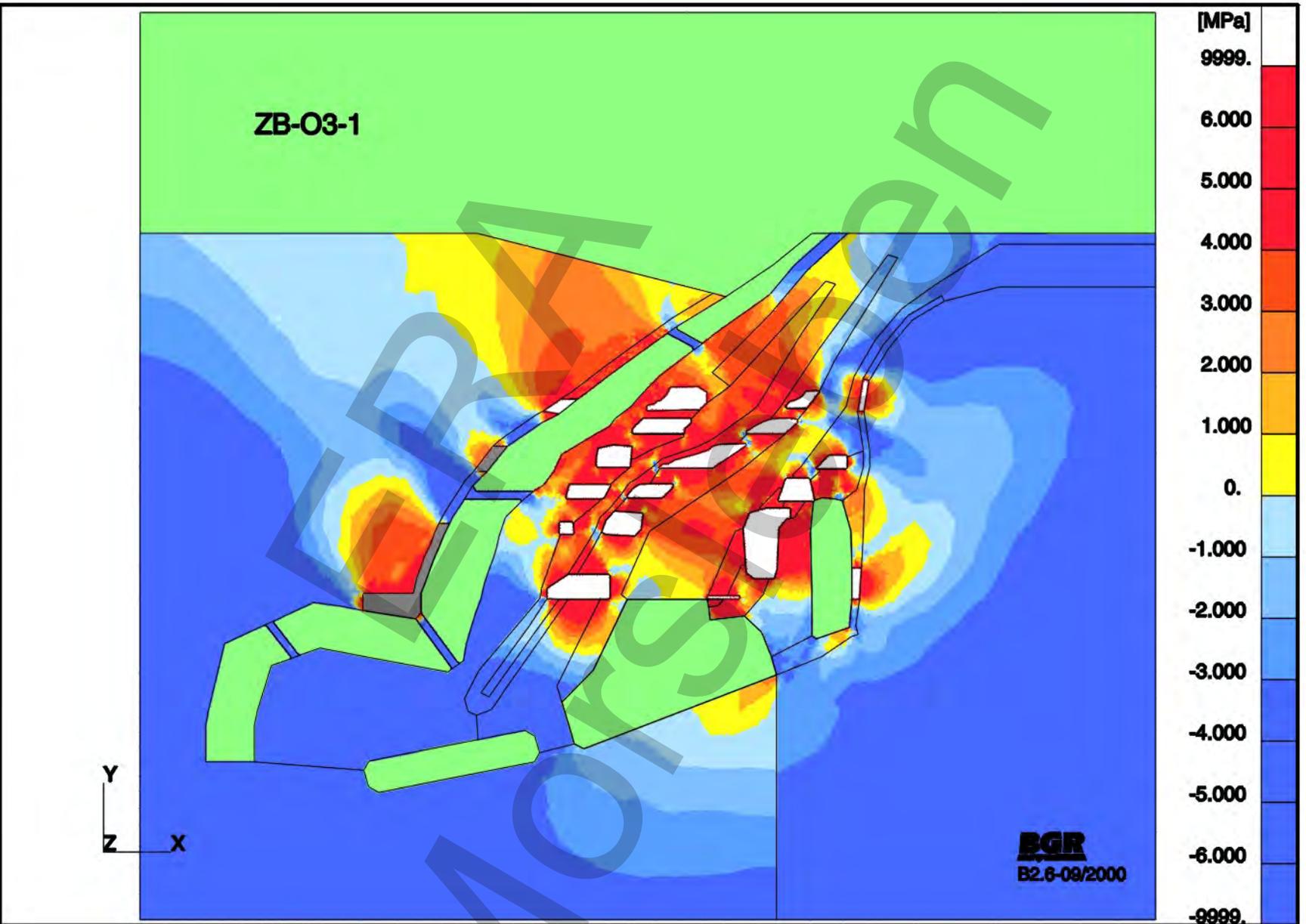


ZB-O3-1: Aufteilung des Homogenbereichs z2HS  
Dilatante Gebirgsbereiche nach 100 Jahren





ZB-03-1: Aufteilung des Homogenbereichs Z1HS  
Differenz zwischen Laugendruck und kleinster Hauptdruckspannung nach 60 Jahren



ZB-O3-1: Aufteilung des Homogenbereichs Z1HS  
 Differenz zwischen Laugendruck und kleinster Hauptdruckspannung nach 100 Jahren

Abbaue:

unverfüllt

ZB-A2-B

Pfad 1

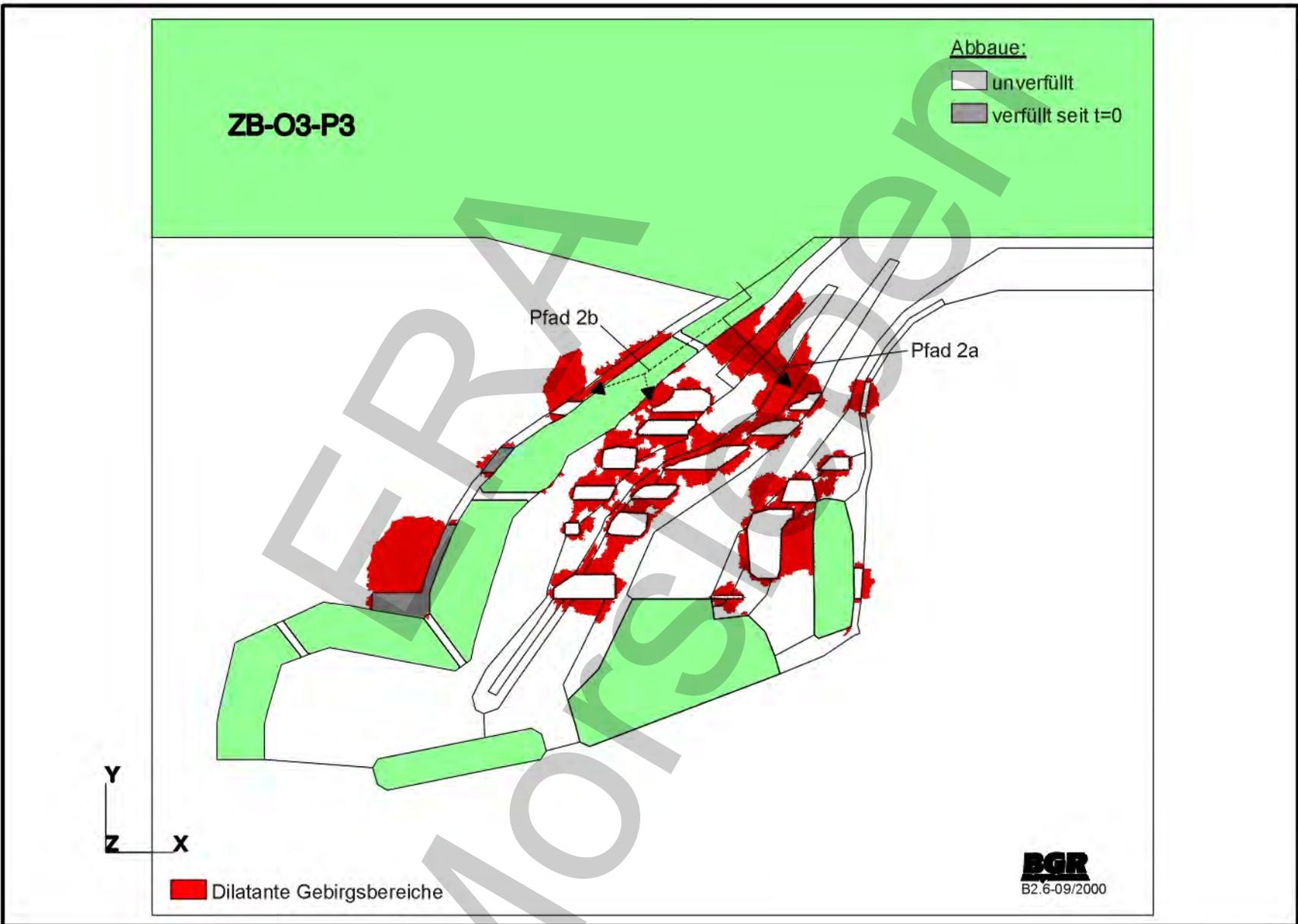
Y  
Z X

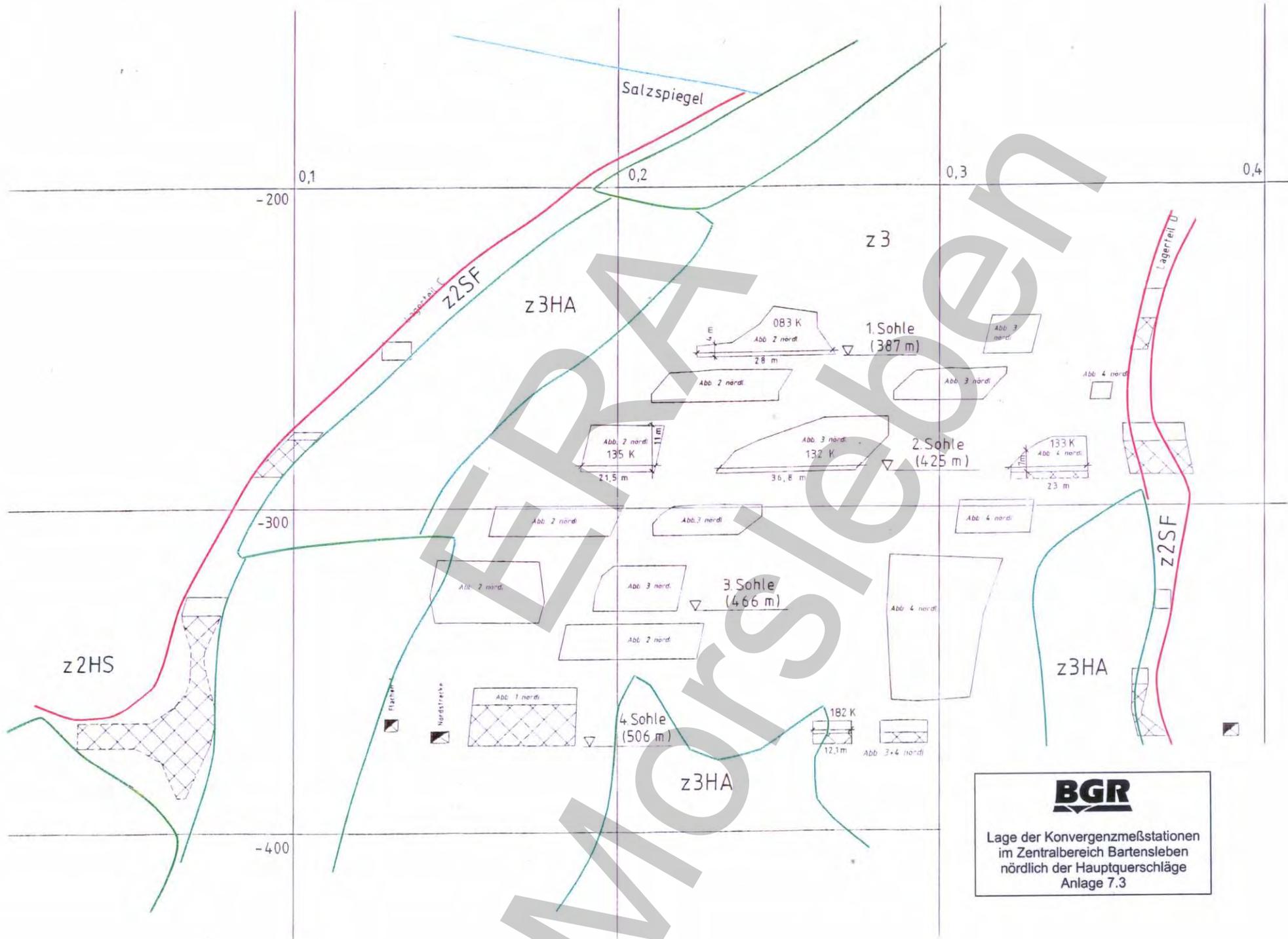
Dilatante Gebirgsbereiche

**BGR**  
B2.6-09/2000

ZB-A2-B: Basismodell  
Pfad eines möglichen Lösungszurtritts im Schnitt ZB-A2

ZB-03-P: Basismodell  
Pfade möglicher Lösungszutritte im Schnitt ZB-03



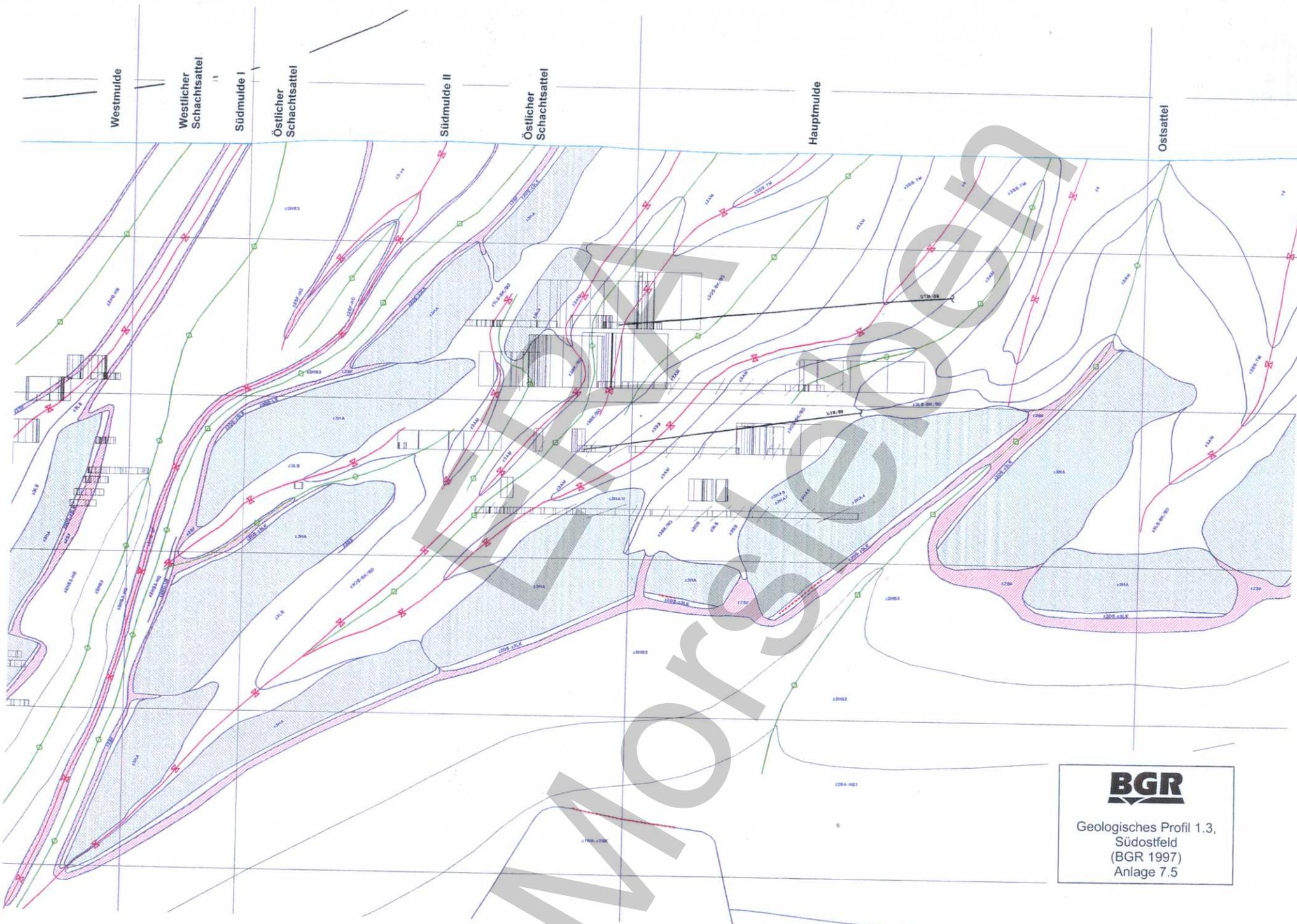


**BGR**  
 Lage der Konvergenzmeßstationen  
 im Zentralbereich Bartensleben  
 nördlich der Hauptquerschläge  
 Anlage 7.3

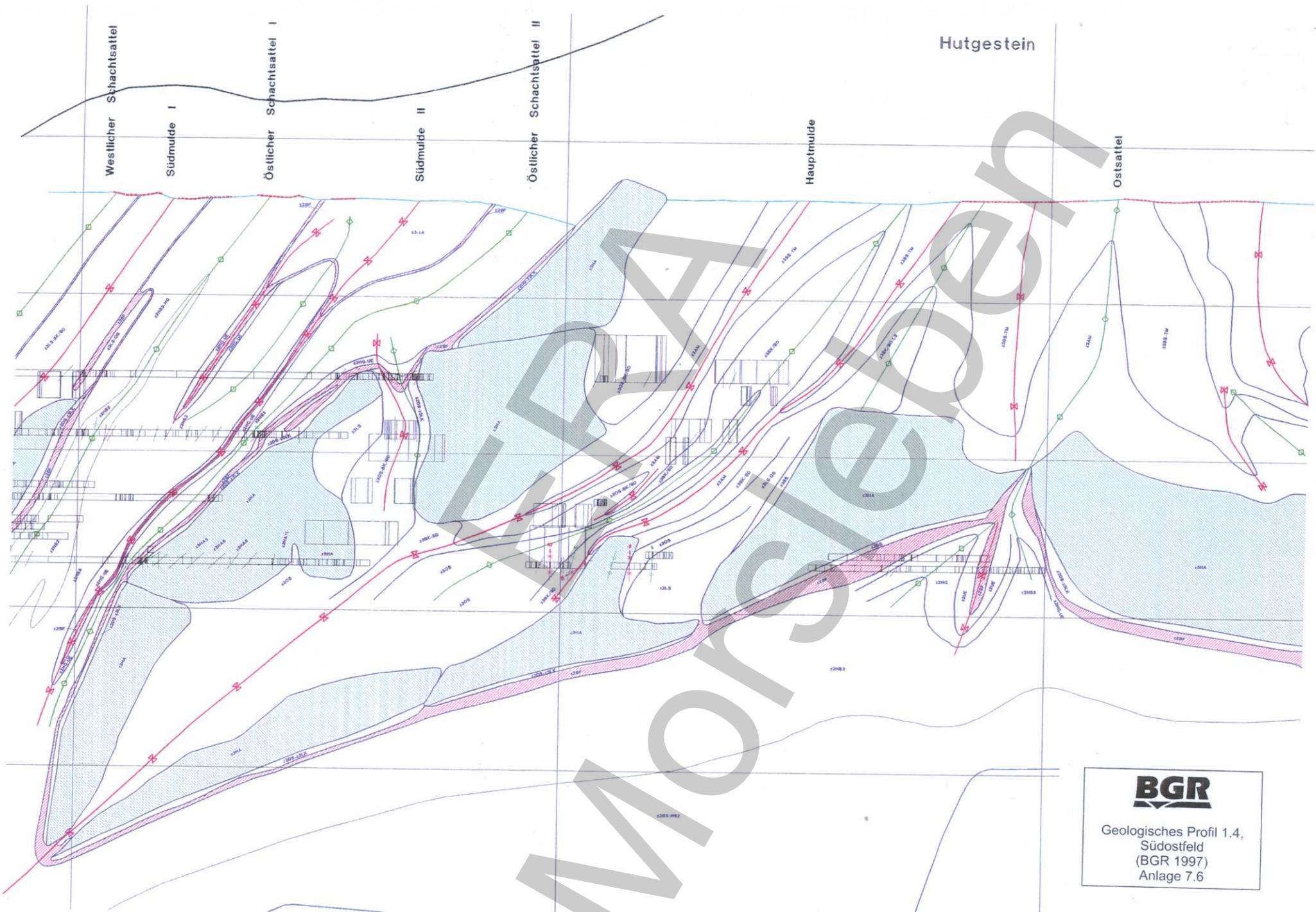


**BGR**

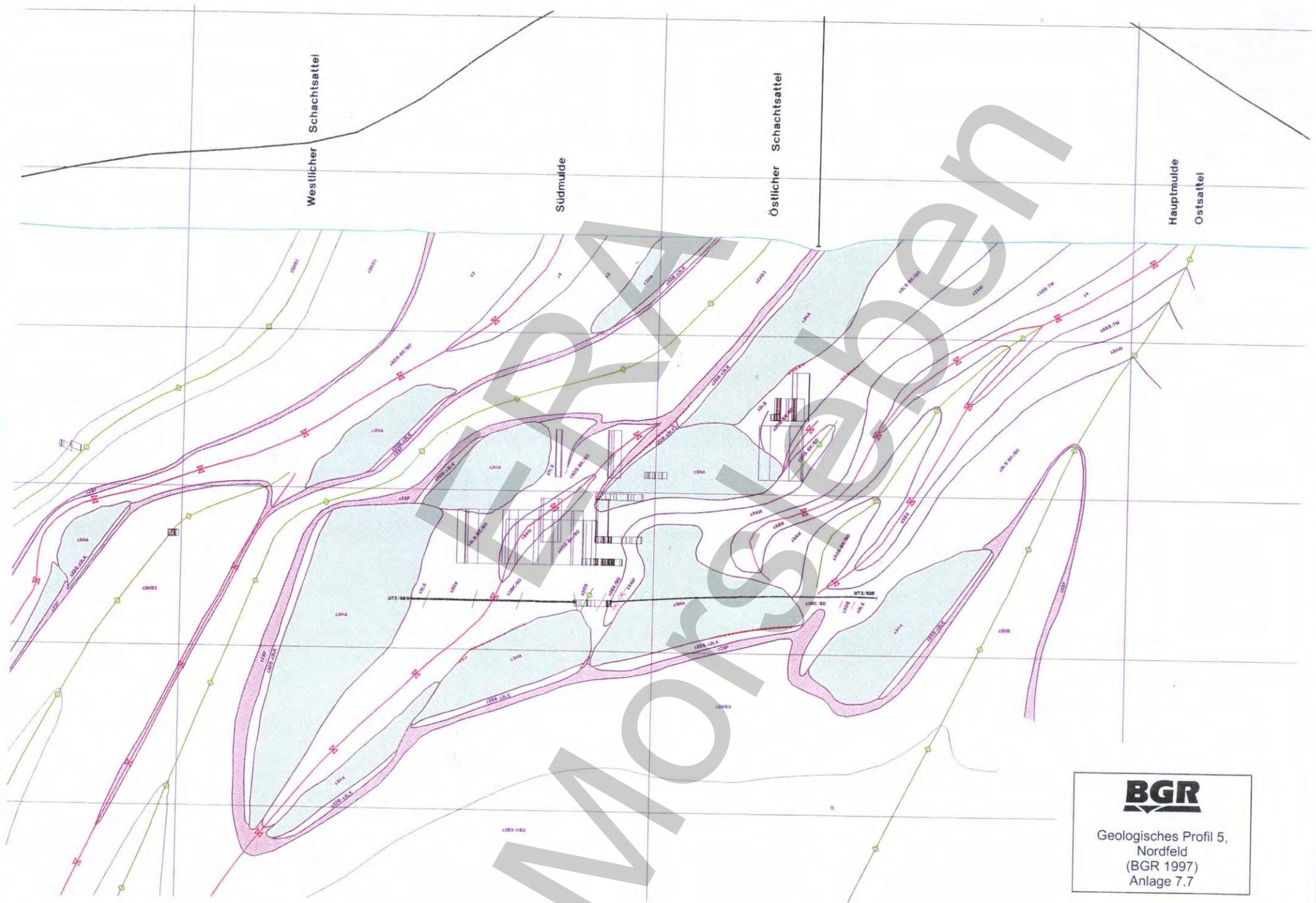
Geologisches Profil 1.2,  
Südostfeld  
(BGR 1997)  
Anlage 7.4



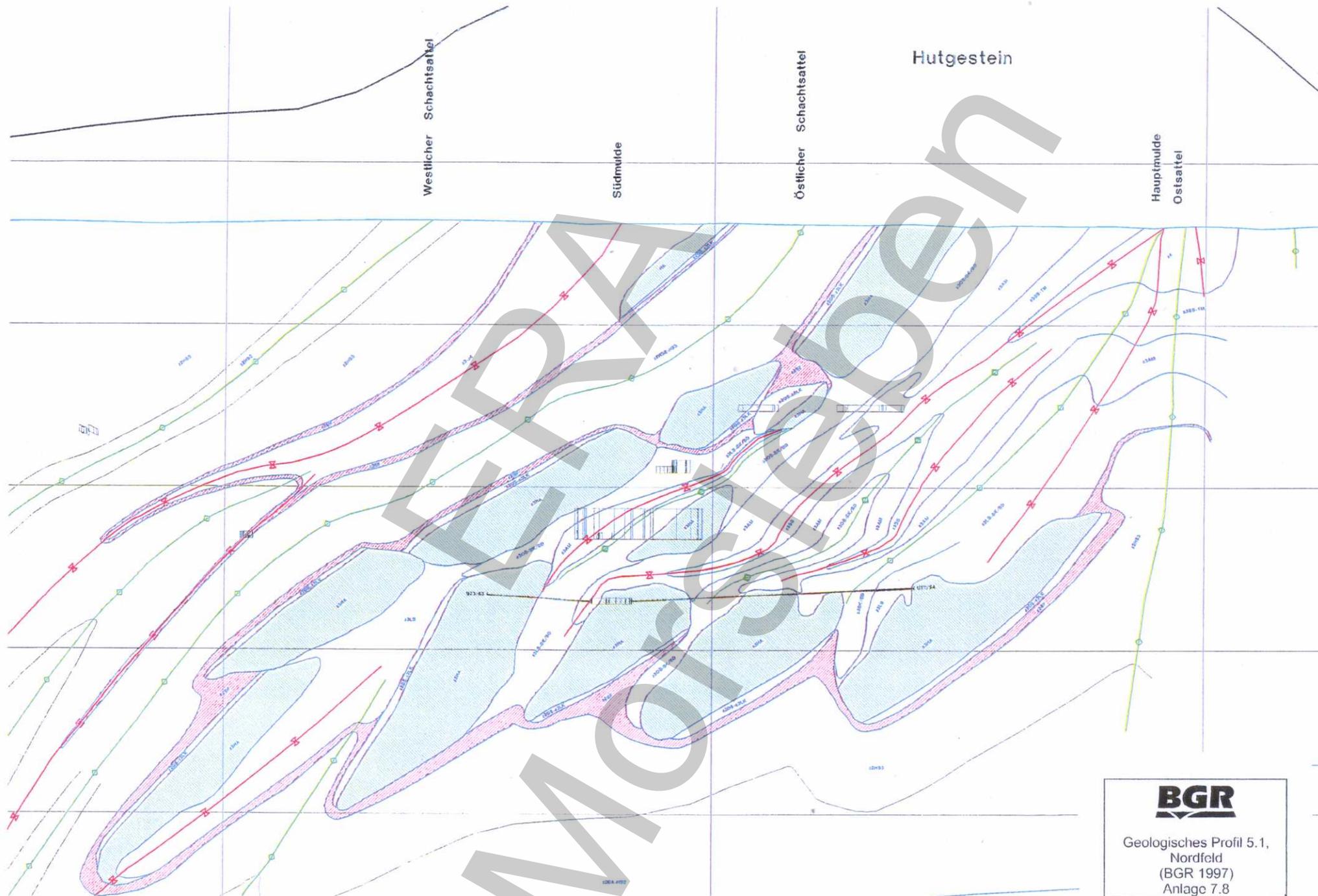
**BGR**  
 Geologisches Profil 1.3,  
 Südostfeld  
 (BGR 1997)  
 Anlage 7.5



**BGR**  
 Geologisches Profil 1.4,  
 Südostfeld  
 (BGR 1997)  
 Anlage 7.6



**BGR**  
 Geologisches Profil 5,  
 Nordfeld  
 (BGR 1997)  
 Anlage 7.7



**BGR**  
 Geologisches Profil 5.1,  
 Nordfeld  
 (BGR 1997)  
 Anlage 7.8