

Planfeststellungsverfahren zur Stilllegung des Endlagers für radioaktive Abfälle Morsleben

Verfahrensunterlage

Titel: Gebirgsmechanische Beurteilung der Integrität der Salzbarriere in der Schachtanlage Marie

Autor: Heusermann, S., Göbel, I. & Heemann, U.

Erscheinungsjahr: 2001

Unterlagen-Nr.: P 113

Revision: 00

Unterlagenteil:



Inhaltsverzeichnis	Seite
Verkürzte Zusammenfassung	4
1 Vorgang	5
2 Zielsetzung und Vorgehensweise	5
3 Geologische Verhältnisse	6
3.1 Geologische Verhältnisse im Bereich „Lager H“	7
3.2 Geologische Verhältnisse im Zentralbereich Marie	8
3.3 Geologische Verhältnisse im Bereich „Bunte First“	8
4 Gebirgsmechanische Modellierung	10
4.1 Homogenbereiche	10
4.1.1 Homogenbereiche „Lager H“	11
4.1.2 Homogenbereiche im Zentralbereich	11
4.1.3 Homogenbereiche „Bunte First“	12
4.2 Hohlräume	13
4.2.1 Hohlräume im Bereich „Lager H“	13
4.2.2 Hohlräume im Zentralbereich	14
4.2.3 Hohlräume im Bereich „Bunte First“	16
4.3 Primärer Gebirgsspannungszustand	17
4.4 Gebirgstemperatur	17
4.5 Materialmodelle und -parameter	18
5 Modellberechnungen	23
5.1 Modellberechnungen zu „Lager H“	23
5.1.1 Geometrische Idealisierung und Diskretisierung des FE-Modells GMLH-S1	23
5.1.2 Modellvarianten zu „Lager H“	24
5.2 Modellberechnungen zum Zentralbereich	26
5.2.1 Geometrische Idealisierung und Diskretisierung des FE-Modells GMZB-S2	26
5.2.2 Modellvarianten zum Zentralbereich Marie	26
5.3 Modellberechnungen zu „Bunte First“	28
5.3.1 Geometrische Idealisierung und Diskretisierung des FE-Modells	28
5.3.2 Modellvarianten zu „Bunte First“	29

6	Darstellung der Berechnungsergebnisse	31
6.1	Berechnungsergebnisse zu „Lager H“	32
6.1.1	Referenzmodell GMLH-S1-L	32
6.1.2	Modellvarianten GMLH-S1-M und GMLH-S1-N	33
6.2	Berechnungsergebnisse zum Zentralbereich	33
6.2.1	Referenzmodell GMZB-S2-A	33
6.2.2	Modellvarianten GMZB-S2-B, GMZB-S2-C und GMZB-S2-D	35
6.3	Berechnungsergebnisse zu „Bunte First“	36
6.3.1	Referenzmodell GMBF-S2-A	36
6.3.2	Modellvarianten GMBF-S2-B, GMBF-S2-C und GMBF-S2-D	38
7	Beurteilung der Integrität der Salzstockbarriere in der Schachtanlage Marie	39
7.1	Bewertungskriterien	39
7.2	Bewertung der Ergebnisse der Modellberechnungen	40
7.2.1	Bewertung der Integrität im Bereich „Lager H“	40
7.2.2	Bewertung der Integrität des Zentralbereichs	41
7.2.3	Bewertung der Integrität im Bereich „Bunte First“	42
8	Zusammenfassung und Schlussbetrachtung	44
	Literatur- und Unterlagenverzeichnis	48
	Abkürzungsverzeichnis	50
	Tabellenverzeichnis	52
	Anlagenverzeichnis	53
	Anlagen	
	Blattanzahl (Textteil):	56 Seiten
	Blattanzahl (Anlagen):	89 Seiten
	Gesamtblattzahl:	145 Seiten

Verkürzte Zusammenfassung

Autoren: Dr. Stefan Heusermann, Dr. Ingeborg Göbel & Dr. Ulrich Heemann
Titel: Gebirgsmechanische Beurteilung der Integrität der Salzbarriere in der Schachtanlage Marie
Stichwörter: Dilatanz, Finite-Elemente-Berechnungen, Integritätsnachweis, Laugendruck, Salzbarriere, Schachtanlage Marie

Im Zuge des Erkundungs- und Beweissicherungsprogramms für das ERA Morsleben ist die Integrität des Salzgebirges in der Schachtanlage Marie zu beurteilen. Die Bewertung erfolgt auf der Grundlage eines Dilatanz- und eines Laugendruckkriteriums. Die hydraulische Dichtigkeit kluffreien Salzgesteins als Barriere gegen das Eindringen von Lösungen aus dem Salzspiegelbereich in die Abbaue ist nachgewiesen, wenn mindestens eines dieser Integritätskriterien erfüllt ist. Für den rechnerischen Nachweis wurden Finite-Elemente-Berechnungen mit zweidimensionalen Modellen für repräsentative Bereiche der Schachtanlage Marie (Lager H, Zentralbereich, Bunte First) durchgeführt.

Die Berechnungen weisen oberhalb der Abbaue im Bereich „Lager H“ eine gebirgsmechanisch ausreichend mächtige intakte Salzbarriere aus. Die im Berechnungsmodell nicht berücksichtigten, aber tatsächlich vorhandenen Klüfte und damit auch die beobachteten Lösungszutritte sind nicht abbaubedingt, sondern offensichtlich geogenen Ursprungs.

Die Salzbarriere über dem stark durchbauten Zentralbereich Marie ist aus geomechanischer Sicht in ausreichender Mächtigkeit intakt, so dass Lösungszutritte vom Salzspiegel über die Salzbarriere auszuschließen sind. Allerdings kann aus geohydraulischer Sicht für einige Kaliabbaue der Lagerteile F und M ein Lösungszutritt über Hauptanhydritschollen, die bis zum Salzspiegel reichen, nicht mit Sicherheit ausgeschlossen werden.

Die Mächtigkeit der intakten Salzbarriere im Bereich „Bunte First“ wird als ausreichend bewertet. Die in der „Bunten First“ beobachteten Lösungszutritte sind nicht abbaubedingt. Für einige Kaliabbaue des Lagerteiles F ist ein Lösungszutritt über mehrere Hauptanhydritschollen, die bis zum Salzspiegel reichen, nicht mit Sicherheit auszuschließen, jedoch sehr unwahrscheinlich.

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 ist die Integrität der Salzstockbarriere zu beurteilen und rechnerisch nachzuweisen. Dabei ist neben der Untersuchung der Salzbarriere im Bereich der Schachtanlage Bartensleben (HEUSERMANN & NIPP 2000) auch die durch die frühere Bergbautätigkeit verursachte mechanische Gebirgsbeanspruchung der Salzbarriere im Bereich der Schachtanlage Marie zu analysieren. Die Beurteilung erfolgt auf der Grundlage geomechanischer Modellberechnungen. Die Auswirkungen geochemischer Vorgänge auf die Barrierenintegrität sind nicht Gegenstand der vorliegenden Untersuchungen.

Aufgrund der großräumigen und sehr komplexen Struktur des Grubengebäudes Marie ist die Untersuchung verschiedener repräsentativer Teilbereiche zweckmäßig. Daher wurden für den rechnerischen Nachweis der Integrität drei charakteristische Bereiche der Schachtanlage Marie ausgewählt:

- Lager H mit Lösungszutritt (BfS 1999, KÄBEL 1998, HERRMANN 2001),
- Zentralbereich mit hohem Durchbauungsgrad,
- Bunte First mit Lösungszutritt (BfS 1999, KÄBEL 1998).

Die Auswahl der zu untersuchenden Teilbereiche erfolgte nach verschiedenen Kriterien unter Berücksichtigung des Durchbauungsgrades, ggf. vorhandener Laugenzutritte sowie des Abstandes der oberen Abbaue zum Salzspiegel.

Dieser Bericht stellt die für die o.g. Bereiche erzielten Ergebnisse der Modellberechnungen und die daraus abgeleitete Beurteilung der Integrität der Salzbarriere dar.

3 Geologische Verhältnisse

Grundlage für die gebirgsmechanische Modellierung der geologischen Schichten in den Grubenfeldern der Schachtanlage Marie sind die Ergebnisse des geologischen Untersuchungsprogramms zur Erstellung eines geologisch-tektonischen Modells des ERA Morsleben (BEHLAU, MINGERZAHN & BORNEMANN 1997; STORK 1998). Diese Ergebnisse sind exemplarisch für die Sohle -231 m NN in einem Grundriss in Anlage 3.1[#] dargestellt.

Die Salzstruktur im Bereich von Morsleben kann als salzgefüllte Spalte mit ungefähr trapezförmigem Querschnitt aufgefasst werden, am NE-Rand begrenzt von einer Störungszone aus zerrüttetem Muschelkalk und Buntsandstein, während sich am SW-Rand eine Störungszone anschließt, die aus nach NE ansteigenden Schichtenfolgen der Trias besteht. Die Entstehung der Salzstruktur erfolgte hauptsächlich aus tektonischen Gründen. Es gibt praktisch keine Diapirbildung. Der Zufluss des Salinars kam vorwiegend von SW her, und zwar zuerst, als im Keuper während einer Expansionsphase der Erdkruste die Lappwaldscholle von der Triasplatte abglitt, und dann in der Oberkreide während einer Kompressionsphase, die Anlass zur Bildung von Ostsattel, Kalilager K und Ostmulde im Grubenfeld Marie gab.

Die Salzstruktur ist in sich gegliedert durch einen vorwiegend isoklinalen Faltenbau, der in Richtung des Allertales streicht (NNW-SSE). Die Sättel bestehen hauptsächlich aus salinaren Einheiten der Staßfurt-Folge (z2), während die Mulden mit Einheiten von der Leine-Folge (z3) bis zur Aller-Folge (z4) gefüllt sind. Die Leine-Folge ist im Grubengebäude am stärksten verbreitet, während die Staßfurt-Folge vornehmlich im Liegenden auftritt. Die Gesamtmächtigkeit des Salinars beträgt am Westrand etwa 580 m und nimmt nach Osten hin auf etwa 380 m ab.

Im Grubenfeld Marie ist der in Schollen zerlegte Hauptanhydrit weit verbreitet, und zwar als spröder Körper in der Salzstruktur, der auf die Faltung der übrigen salinaren Gesteine bruchhaft reagiert hat. Der Grad der Zerblockung steigt mit dem Grad der salinaren Verformung und ist daher in den westlichen Randfalten und der Hauptmulde am größten. Die einzelnen Hauptanhydritschollen werden von den kriechfähigen Salzen umflossen.

[#] Die Anlagen sind kapitelweise numeriert. Die erste Ziffer bezieht sich auf das betreffende Hauptkapitel. Danach folgt, durch einen Punkt getrennt, die fortlaufende Anlagenummer in dem jeweiligen Hauptkapitel.

3.1 Geologische Verhältnisse im Bereich „Lager H“

Für die gebirgsmechanische Modellierung wurden insbesondere der geologische Sohlenriss, die geologischen Profile 17 und 19 sowie die Darstellung der Tiefenlinien des Salzspiegels herangezogen (Anlagen 3.2 bis 3.5). Die Modellierung der geologischen Schichten basiert nahezu vollständig auf dem Profil 17. Die Absenkung des Salzspiegels im Bereich des Lagerteils H (Anlage 3.5) wurde aus Gründen der Konservativität berücksichtigt, obwohl sie nicht direkt im Profil 17 liegt. Der Modellschnitt „Lager H“ umfasst nach Anlage 3.3 von W nach E die Bereiche Westsattel, Westmulde und Schachtsattel, den Bereich der Hauptmulde mit dem Lagerteil H und dem Lagerteil M(II) sowie den Bereich des Randsattels I und der Randmulde mit dem Lagerteil M(I).

In der dargestellten Salzstruktur sind die Zechsteinfoolgen z1 bis z4 vertreten. Die Werra-Folge (z1) bildet mit dem Werra-Anhydrit (z1WA) in Verbindung mit dem Staßfurt-Karbonat (z2SK) und dem Basalanhydrit (z2BA) das Basisgestein des Salinars. Das aufliegende Hauptsalz der Staßfurt-Folge (z2HS2 und z2HS3) stellt die mächtigste Formation des Salinars dar, das im West-, Schacht- und Randsattel bis an das Hutgestein heranreicht. Die schmalen Bänder des carnallitisch ausgebildeten Kaliflozes Staßfurt (z2SF, z2HG-SF), die das Staßfurt-Salinar abschließen, waren bergbaulicher Abbautätigkeit unterworfen und stellen auch das namensgebende Lagerteil H. In der an das Lagerteil H angrenzenden, tief eingefalteten Hauptmulde ist die Leine-Folge mit dem Orange-Bank/Bändersalz (z3OS-BK/BD), dem Anhydritmittelsalz (z3AM) und dem Schwadensalz (z3SS) vertreten. Die Aller-Folge wird dort nicht angetroffen. In der kleineren Westmulde sowie in der Randmulde sind z3 und z4 nicht unterschieden. Der Hauptanhydrit (z3HA) kommt im Profil 17 nicht vor.

Unterhalb von ca. -300 m NN sowie westlich des Westsattels und östlich der Randmulde ist die Geologie im Profil 17 weitgehend unbekannt. Für die gebirgsmechanische Modellierung wurden daher entsprechende geologische Angaben aus anderen, z. T. weiter entfernten Profilen entnommen und angepasst.

Im Lagerteil H auf der Sohle -318 m NN sind makroskopisch anscheinend geschlossene Klüfte angetroffen. Seit Auffahrung dieses Lagerteils sind dort lokal Lösungszutritte zu verzeichnen (BfS 1999, KÄBEL 1998, HERRMANN 2001). Die Salzbarriere zum ca. 35 m entfernten Salzspiegel ist damit als nicht unversehrt zu beurteilen.

3.2 Geologische Verhältnisse im Zentralbereich Marie

Für die geomechanische Modellierung wurden insbesondere der Sohlenriss der Sohle -231 m NN mit Angabe der gewählten Modellschnittlinie (Anlage 3.6) sowie die beiden geologischen Profile 11 und 11.2 (Anlagen 3.7 und 3.8) verwendet. Diese Profile erfassen repräsentative Bereiche hinsichtlich Durchörterungsgrad des Gebirges und Größe der Hauptanhydritschollen. Ein Ausschnitt aus der Strukturkarte am Salzspiegel (Anlage 3.9) veranschaulicht den geologischen Bau der Salzstruktur im Zentralbereich der Grube Marie.

Das Liegende der Salzstruktur, der Sockel, hatte starken Einfluss auf den inneren Aufbau der Salzstruktur: Im Westteil befinden sich die Hauptabbrüche des Sockels, so dass dort stärkere Faltungen der Salzstruktur auftreten als im ruhiger gebauten Ostteil. Die westlichen Randfalten gelten als die tektonisch am höchsten deformierten Bereiche des Salinar. Die Halokinese wird von der Staßfurt-Folge bestimmt, allein schon wegen ihrer großen Mächtigkeit. Besondere Bedeutung als Verformungsmedium hat dabei das Kaliflöz Staßfurt. Die Abfolge der Großfalten ist im Grubenfeld von SSW nach NNE wie folgt (Anlage 3.9):

- Westsattel
 - Westmulde
 - Schachtsattel, der sich vor Profil 11.2 teilt in
 - Westlicher Schachtsattel
 - Südmulde I
 - Östlicher Schachtsattel
 - Hauptmulde
 - Störung Lager K
 - Ostmulde
 - Randsattel I
- } NE – vergenter Faltenbau
- } steiler Faltenbau, kaum Vergenz

Die Grubenräume des Zentralbereichs der Schachtanlage Marie liegen in der Hauptmulde zwischen Schachtsattel und Ostmulde.

3.3 Geologische Verhältnisse im Bereich „Bunte First“

Für die gebirgsmechanische Modellierung wurden insbesondere der geologische Sohlenriss sowie die geologischen Profile 7.1 und 9 herangezogen (Anlagen 3.10 bis 3.12).

In der dargestellten Salzstruktur sind die Zechsteinfoolgen z1 bis z4 vertreten. Die geologische Situation des Profils 7.1 ist charakterisiert durch die in das z2 eingefaltete Haupt- und die Ostmulde des z3, begrenzt durch den in z.T. mächtige Schollen zerbrochenen Haupt-

anhydrit (z3HA), die im Westen bis an den Salzspiegel heranreichen. Die Bereiche zwischen den Hauptanhydritschollen sind meistens durch Carnallitit verfüllt. Das Kalilager (z2SF) unterhalb des Hauptanhydrits ist als Hartsalz ausgebildet. Im Bereich des Ostsattels zwischen Haupt- und Ostmulde kommt es zu einer lokalen Anstauchung des Carnallitits, begleitet von kleineren Hauptanhydritschollen. Im oberen Bereich der beiden Mulden ist auch die Aller-Folge (z4) in vergleichsweise kleinen Restbeständen vertreten. Seitlich begleitet werden die Haupt- und Ostmulde östlich durch den Randsattel I und die Randmulde sowie westlich durch den Östlichen Schachtsattel und die Südmulde, die keine Hauptanhydritschollen mehr aufweist. Im Liegenden des Hauptsalzes (z2HS) treten noch Werra-Anhydrit (z1WA) und Staßfurt-Karbonat (z2SK) auf.

Der weiter nördlich gelegene Bereich des Profils 9 befindet sich im direkten Einflussbereich einer Störung (Anlage 3.12), die zur Anstauchung des Kalilagers führte. Die namensgebende „Bunte First“ befindet sich in zwei carnallitisch gefüllten Störungszonen im Hauptanhydrit. Die Hauptanhydritschollen haben – abweichend zu der Situation in den benachbarten Profilen – keinen Kontakt zum Salzspiegel.

Das Lösungsvorkommen im Bereich „Bunte First“ tritt auf insgesamt 5 Sohlen auf. Die Tropfstellen liegen innerhalb von Schollen des halokinetisch intensiv beanspruchten Hauptanhydrits im Umfeld eines markanten Quersattels im Salinar in der Nähe des geologischen Profils 9 (BEHLAU, MINGERZAHN & BORNEMANN 1997, KÄBEL 1998, BfS 1999). Dieser Bereich entzieht sich aufgrund der komplexen räumlichen geologischen und bergbaulichen Struktur einer zweidimensionalen geomechanischen Modellierung. Daher wird vereinfachend die geologische und bergbauliche Situation des südlich anschließenden Profils 7.1 für die Modellierung herangezogen.

4 Gebirgsmechanische Modellierung

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

Für die in den einzelnen Teilbereichen betrachteten Modellschnitte werden folgende Kürzel verwendet:

- Lager H, Modellschnitt in der Nähe des Profils 17: GMLH-S1,
- Zentralbereich Marie, Modellschnitt in der Nähe der Profile 11.2 und 11: GMZB-S2,
- Bunte First, Modellschnitt in der Nähe des Profils 7.1: GMBF-S1.

4.1 Homogenbereiche

Zwischen dem westlichen und dem östlichen Rand der Salzstruktur erstreckt sich eine Folge mehrerer Sättel und Mulden mit einer Vielzahl von teilweise sehr dünnen Salzschieben. Da eine detaillierte gebirgsmechanische Modellierung aller Schichten nicht notwendig ist, wurden geologische Strukturen mit annähernd gleichem mechanischen Verhalten zu Homogenbereichen zusammengefasst. Die Homogenbereiche sind also mit den in den geologischen Profilen dargestellten stratigraphischen Einheiten nicht zwangsläufig identisch.

In den nachfolgenden Kapiteln sind zur Benennung der Homogenbereiche die im gebirgsmechanischen Modell verwendeten Kurzbezeichnungen (in Klammern) angegeben, die sich an die stratigraphischen Kürzel anlehnen.

In den Anlagen 4.1 bis 4.3 sind die im gebirgsmechanischen Modell unterschiedenen Bereiche farblich gekennzeichnet. Dabei sind die ausschließlich elastisch reagierenden Schichten je nach Steifigkeit in verschiedenen Farbabstufungen grün, die kriechfähigen Schichten (einschließlich der Kalilager) je nach Duktilität in verschiedenen Farbabstufungen rot, orange, gelb oder blau, versetzte Abbaue grau und Hohlräume weiß dargestellt.

4.1.1 Homogenbereiche „Lager H“

Im Modellschnitt GMLH-S1 wurden die Homogenbereiche auf der Grundlage des geologischen Profils 17 festgelegt. Zusätzlich wurde auch das Profil 19 hinzugezogen. Für die Gebirgsschichten mit ausschließlich elastischen Materialeigenschaften wurden folgende Homogenbereiche unterschieden (Anlage 4.1 und Tabelle 4.1):

- Keuper (K),
- Hutgestein (CR),
- Werra-Anhydrit und Staßfurt-Karbonat (Z1WA).

Für die kriechfähigen Salzschieben wurden folgende Homogenbereiche berücksichtigt (Anlage 4.1 und Tabelle 4.2):

- Leine- und Aller-Folge (Z3Z4) der Westmulde,
- Salz der inneren Hauptmulde (Z3AMSS) mit Anhydritmittelsalz und Schwadensalz,
- Orange- und Bank-/Bändersalz (Z3OSBKBD),
- Kaliflöz Staßfurt in der Westmulde (Z2SFW),
- Kaliflöz Staßfurt im Lagerteil H (Z2SFH),
- Kaliflöz Staßfurt in Lagerteil M in Haupt- und Randmulde (Z2SFM),
- Hauptsalz 2 und Leine- und Aller-Folge in der Randmulde östlich von Lagerteil M (Z2Z3Z4),
- Hauptsalz 3 im Westsattel (Z2HS3W),
- Hauptsalz 3 in Hauptmulde und Randsattel I (Z2HS3),
- Hauptsalz 2 westlich des Westsattels (Z2HS2W),
- Hauptsalz 2 im Schachtsattel und im Randsattel I (Z2HS2).

4.1.2 Homogenbereiche im Zentralbereich

Im Modellschnitt GMZB-S2 wurden die Homogenbereiche auf der Grundlage des geologischen Profils 11 unter Hinzuziehung des Profils 11.2 festgelegt. Für die Gebirgsschichten mit ausschließlich elastischen Materialeigenschaften wurden folgende Homogenbereiche unterschieden (Anlage 4.2 und Tabelle 4.1):

- Keuper (K),
- Hutgestein (CR),
- Hauptanhydrit (Z3HA),
- Werra-Anhydrit und Staßfurt-Karbonat (Z1WA).

Für die kriechfähigen Salzsichten wurden die folgenden Homogenbereiche berücksichtigt (Anlage 4.2 und Tabelle 4.3):

- Anhydritmittelsalz (Z3AM) der Haupt- und der Ostmulde,
- Orangesalz und Bank-/Bändersalz (Z3OSBKBD) der Haupt- und der Ostmulde,
- Kaliflöz Staßfurt im Lagerteil F (Z2SFLF),
- Kaliflöz Staßfurt im Lagerteil K (Z2SFLK),
- Kaliflöz Staßfurt im Lagerteil M (Z2SFLM),
- Trennschichten zwischen den Hauptanhydritschollen (Z2SFST),
- Hauptsalz in der Westmulde (Z2HS3WM),
- Hauptsalz im Südlichen Randsattel (Z2HS3SR),
- Hauptsalz im Westlichen Sattel (Z2HS2WS).

4.1.3 Homogenbereiche „Bunte First“

Der Bereich „Bunte First“ ist im Süden durch das geologische Profil 7.1 begrenzt und reicht in nördlicher Richtung über das Profil 9 hinaus bis fast an das Profil 11, das dem Profil 7.1 sehr ähnelt. Die "Bunte First" selbst ist ein komplexes Hohlräumssystem auf der Höhe des Profils 9 und wurde direkt in mit Carnallit gefüllten Klüften erstellt. Aufgrund dieser geologischen Besonderheit und der damit verbundenen komplizierten räumlichen Anordnung der Abbaue in diesem Bereich ist für die genaue Beschreibung eine äußerst aufwendige und in der Durchführung sehr schwierige dreidimensionale Modellierung erforderlich. Wegen des sehr hohen Aufwandes wurde vereinfachend nur ein Modellschnitt in der Nähe des Profils 7.1 untersucht, dessen geologische und bergbauliche Situation eine zweidimensionale geomechanische Modellierung zulässt. Die Situation im Bereich „Bunte First“ (Profil 9) wurde auf der Grundlage geomechanischer Erfahrung ausschließlich qualitativ beurteilt.

Im Modellschnitt GMBF-S1 wurden vier Homogenbereiche mit ausschließlich elastischen Materialeigenschaften unterschieden (Anlage 4.3 und Tabelle 4.1):

- Keuper (K),
- Hutgestein (CR),
- Hauptanhydrit (Z3HA),
- Werra-Anhydrit mit Staßfurt-Karbonat (Z1WA).

Für die kriechfähigen Salzschieben wurden folgende Homogenbereiche berücksichtigt (Anlage 4.3 und Tabelle 4.4):

- Schichten der Aller-Folge sowie Tonmittel- und Schwadensalz der Leine-Folge in der Haupt- und der Ostmulde (Z4),
- Anhydritmittelsalz in der Haupt-, der Ost- und der Südmulde (Z3AM),
- Linien-, Orange- und Bank-/Bändersalz in der Hauptmulde (Z3LSBKBD),
- carnallitisch ausgeprägtes Kaliflöz Staßfurt in der Südmulde, im Lagerteil F und in der Hauptmulde (Z2SFC),
- als Hartsalz ausgebildetes Kaliflöz Staßfurt im Lagerteil I unterhalb der Sohle -332 m NN (Z2SFH),
- Hauptsalz der Staßfurt-Folge mit Hangendsalz und Übergangsschichten (Z2HS3).

4.2 Hohlräume

Die Hohlraumangaben (Bezeichnung, Art, Teufe, Querschnittsabmessungen, Auffahrtzeitpunkt) sind dem bergmännischen Risswerk (BfS/DBE 1997) und der Unterlage „Hohlraumangaben Endlager Morsleben“ (DBE 1998) entnommen.

4.2.1 Hohlräume im Bereich „Lager H“

Die Kaliabbau im Bereich des Profils 17 wurden zwischen ca. 1903 und 1921 aufgeföhren. Im Jahre 1923 wurde dann der Kaliabbau generell eingestellt. Einige Kaliabbau im Lagerteil H wurden infolge von Lösungszutritten bereits im Jahre 1910 nahezu vollständig verfüllt und mit zwei Dammbauwerken abgeschlossen (KÄBEL 1998).

Zwischen den geologischen Profilen 17 und 19 liegen auf der Sohle -231 m NN im Steinsalz entlang der Nordstrecke B die Kammern 138 bis 143, entlang der Nordstrecke die Kammern 102 bis 108, entlang des 3. Nordquerschlag und westlich von Lagerteil H die Kammern 86 bis 91 sowie westlich von Lagerteil M die Kammern 76 bis 81. Davon wurden die Kammern 78, 89 und 103 bereits zwischen 1903 und 1910 aufgeföhren. Der Großteil der Kammern wurde Ende der 30er bis Anfang der 40er Jahre aufgeföhren. Östlich des Lagerteils H liegen zwischen dem 2. und 3. Nordquerschlag zwei langgestreckte größere Steinsalzabbau 31 und 32, die ca. 1911 aufgeföhren wurden. Ein Teil der o. g. Hohlräume wurde erst nach 1990 verfüllt.

Für die gebirgsmechanische Modellierung der Hohlräume wurde der im Sohlenriss (Anlage 3.2) dargestellte repräsentative Modellschnitt GMLH-S1 gewählt, der durch folgende Abbaue, Kammern und Strecken verläuft (Anlagen 4.4 bis 4.7):

- Kammern 103 und 142 auf der Sohle -231 m NN im Bereich des Westsattels,
- Nordstrecke auf der Sohle -231 m NN im Bereich der Westmulde,
- Nordstrecke B auf der Sohle -231 m NN im Bereich des Westsattels,
- Steinsalzabbau 32 und Kammer 89 auf der Sohle -231 m NN im Bereich der Hauptmulde,
- Nordstrecke F auf der Sohle -231 m NN im Bereich der Hauptmulde,
- teilweise versetzte Kaliabbaue im Lagerteil H auf den Sohlen -225 m NN, -253 m NN und -315 m NN,
- Kammer 78 auf der Sohle -231 m NN westlich von Lagerteil M,
- 4. Nordstrecke auf der Sohle -231 m NN westlich von Lagerteil M,
- Kaliabbau im Lagerteil M auf der Sohle -231 m NN.

Die für die Modellierung ausgewählten Abbaue und Kammern repräsentieren die vorwiegend im Streichen der geologischen Schichten ausgerichteten Abbaureihen. Hohlräume, die nicht orthogonal zur Modellebene orientiert sind, wurden gedreht und in die Modellebene projiziert. Die Abbaureihen weisen größtenteils Kammern mit annähernd quadratischem Grundriss auf, die in N-S-Richtung durch ebenfalls quadratische Pfeiler voneinander getrennt sind. Diese Pfeiler wurden nicht berücksichtigt, so dass eine konservative Modellierung der Abbaureihen vorliegt.

Bis auf die zwei oberen Kaliabbaue im Lagerteil H wurden alle Hohlräume konservativ als unverfüllt angenommen. Der Auffahrzeitpunkt der im Modell berücksichtigten Hohlräume liegt im Mittel etwa im Jahr 1920.

4.2.2 Hohlräume im Zentralbereich

Die ersten Abbaue und Kammern im Zentralbereich Marie wurden nach Fertigstellung der nach Süden gerichteten Strecken ca. 1910 bis 1930 aufgefahren. Einige der im Modell dargestellten Langabbaue wurden in den darauf folgenden Jahren aufgefahren. Als Auffahrzeitpunkt wurde in den Modellberechnungen für alle Abbaue und Kammern das Jahr 1920 angesetzt.

Für die gebirgsmechanische Modellierung der Hohlräume wurde der im Sohlenriss (Anlage 3.6) dargestellte repräsentative Modellschnitt GMZB-S2 gewählt, der durch folgende Abbaue, Kammern und Strecken verläuft (Anlagen 4.8 bis 4.11):

- Kammern 1, 10 und 29 sowie Südstrecke, Südstrecke A und 1. Südstrecke auf der Sohle -231 m NN im Bereich des Westlichen und des Östlichen Schachtsattels,
- teilweise versetzter Kaliabbau im Lagerteil F auf der Sohle -231 m NN,
- Abbaue 2, 3, 17, 18, 19 und Abbau 2 Steinsalz sowie 2. und 3. Südstrecke auf der Sohle -231 m NN im Bereich der Hauptmulde,
- Steinsalzabbaue 2, 3, 4, 13 und 14 sowie Strecke zu Abbauen auf der Sohle -267 m NN im Bereich der Hauptmulde,
- Abbaukammer mit Strecke auf der Sohle -332 m NN,
- Südliche Richtstrecke auf der Sohle -372 m NN,
- teilweise versetzte Kaliabbaue im Lagerteil K auf verschiedenen Sohlen,
- Begleitstrecke zum Lagerteil K,
- Kammern 49, 50 und 51 auf der Sohle -231 m NN im Bereich der Ostmulde,
- Abbau und Strecke zu den Steinsalzabbauen auf der Sohle -267 m NN im Bereich der Ostmulde,
- versetzter Kaliabbau im Lagerteil M,
- Kammer 54 und 4. Südstrecke auf der Sohle -231 m NN östlich von Lagerteil M.

Anlage 4.8 zeigt eine Gesamtdarstellung aller Abbaue, Kammern und Strecken. Um die Hohlräume übersichtlich darstellen und benennen zu können, sind in den Anlagen 4.9 bis 4.11 zusätzlich drei Ausschnitte erstellt.

In Ausschnitt 1 (Anlage 4.9) ist der westliche Teil des Grubenfeldes dargestellt, der dem Abschnitt A bis B auf der Schnittlinie in Anlage 3.6 entspricht. Die Schnittführung ist so gelegt worden, dass alle relevanten Hohlräume auf der Sohle -231 m NN erfasst werden. Der Schnitt verläuft im Abschnitt AB hauptsächlich parallel zum geologischen Profil 11.2 und zwar von der Westmulde bis zum Schachtsattel*. Die Südstrecken erschließen jeweils Gruppen von hintereinander angeordneten Kammern, die im zweidimensionalen Modell als unendlich ausgedehnte Kammern erscheinen.

In Ausschnitt 2 (Anlage 4.10) ist der zentrale Teil des Grubenfeldes dargestellt, der dem Abschnitt B bis F auf der Schnittlinie in Anlage 3.6 entspricht, und zwar vom Lagerteil F durch die Hauptmulde hindurch bis zur Störung Lager K (auch als Lagerteil K bezeichnet).

* In Anlage 3.9 muss die Aufteilung der Westmulde in Westlichen Schachtsattel, Südmulde und Östlichen Schachtsattel etwas weiter im Norden erfolgen, so dass sie auf Höhe von Profil 11.2 schon existiert.

Der Schnitt verläuft zum Teil nicht rechtwinklig zu den Abbauachsen bzw. zum Streichen der geologischen Struktur, sondern schräg zwischen den Profilen 11 und 11.2, um alle relevanten Abbaue zu erfassen. Im Modell werden die Abbaukammern dazu in die Modellebene gedreht: Abbau 2 und Abbau 3 in Anlage 4.10 entsprechen dem großräumig angelegten Abbaufeld der Steinsalzabbau 1 bis 10 auf der Sohle -231 m NN. Der im Modell längsgerichtete Pfeiler zwischen Abbau 2 und 3 berücksichtigt die in diesem Abbaufeld parallel zur Schnittrichtung des Modells angelegten Pfeilerreihen. Die Schnittlinie verläuft im südlichen Bereich des Abbaufeldes, um das zweidimensionale Modell nicht übermäßig konservativ werden zu lassen. Die im Modell gewählte Breite der Abbaue 2 und 3 ist daher geringer als die maximale Breite des Abbaufeldes mit den Steinsalzabbauen 1 bis 10.

Ausschnitt 3 (Anlage 4.11) zeigt das Grubengebäude im östlichen Teil des geomechanischen Modells, von der Störung Lager K bis zur Randmulde und von Punkt E bis G auf der Schnittlinie in Anlage 3.6. Die Schnittlinie folgt in diesem Abschnitt dem geologischen Profil 11. Die Kammern 50 und 51 liegen nicht auf der Schnittlinie, sondern sind in diese hineingeschoben worden, um sie im Modell zu berücksichtigen. Die Schnittlinie schneidet, abweichend vom Verlauf des Profils 11, den Hauptanhydrit senkrecht, um seine geomechanische Wirkung adäquat in das Modell einzubringen.

Einige Abbaue und Kammern sind kurze Zeit nach ihrer Auffahrung versetzt worden. Für den Integritätsnachweis sind jedoch alle Hohlräume (mit Ausnahme der in den Anlagen 4.9 bis 4.11 als verfüllt gekennzeichneten Kaliabbau) unversetzt gerechnet worden.

4.2.3 Hohlräume im Bereich „Bunte First“

Die Abbaue im Bereich des betrachteten Modellschnittes wurden vorwiegend zwischen ca. 1910 und 1920 aufgefahren. Im Jahre 1923 wurde dann der Kaliabbau generell eingestellt. Der Auffahrzeitpunkt der im Modell berücksichtigten Hohlräume liegt im Mittel annähernd im Jahr 1920.

Für die gebirgsmechanische Modellierung der Hohlräume wurde der im Sohlenriss (Anlage 3.10) dargestellte repräsentative Modellschnitt GMBF-S1 gewählt, der durch folgende Abbaue, Kammern und Strecken verläuft (Anlagen 4.12 bis 4.15)[#]:

- Kammern 21, 23, 24 und 35 sowie Südstrecke und 1. Südstrecke auf der Sohle -231 m NN im Bereich der Südmulde mit Lagerteil E,
- Abbaue im Lagerteil E,

[#] Die Bezeichnungen für die Lagerteile F und I sind in den verwendeten Unterlagen nicht einheitlich. Vereinfachend werden hier nur die in Anlage 4.15 dargestellten Abbaue dem Lagerteil I zugeordnet.

- Strecke östlich von Lagerteil E auf der Sohle -210 m NN,
- Abbau im Lagerteil F auf der Sohle -231 m NN,
- Strecken im Lagerteil F auf den Sohlen -280 m NN und -291 m NN,
- teilweise versetzte Kaliabbau im Lagerteil F auf den Sohlen -296 m NN, -332 m NN und -346 m NN,
- Strecken westlich von Lagerteil F auf den Sohlen -296 m NN, -315 m NN, -332 m NN und -346 m NN,
- südliche Richtstrecke im Lagerteil I auf der Sohle -372 m NN,
- teilweise versetzte Kaliabbau im Lagerteil I auf den Sohlen -291 m NN, -315 m NN und -346 m NN,
- Strecke im Lagerteil I auf der Sohle -332 m NN.

Die für die Modellierung ausgewählten Abbaue und Kammern repräsentieren z.T. die vorwiegend im Streichen der geologischen Schichten ausgerichteten Abbaureihen. Hohlräume, die nicht orthogonal zur Modellebene orientiert sind, wurden gedreht und in die Modellebene projiziert. Die Abbaureihen in der Südmulde weisen größtenteils Kammern mit annähernd quadratischem Grundriss auf, die in N-S-Richtung durch ebenfalls quadratische Pfeiler voneinander getrennt sind. Diese Pfeiler wurden nicht berücksichtigt, so dass eine konservative Modellierung dieser Abbaureihen vorliegt.

Einige Abbaue wurden nach Auffahrung verfüllt (Anlagen 4.13 bis 4.15). Für den Integritätsnachweis wurden sie jedoch konservativ als nicht versetzt angenommen.

4.3 Primärer Gebirgsspannungszustand

Als primärer Gebirgsspannungszustand wird ein mit der Teufe linear zunehmender isotroper lithostatischer Gebirgsdruck angenommen. Dabei wird sowohl für das Salzgebirge als auch für das Deckgebirge eine Dichte von $\rho = 2,2 \text{ g/cm}^3$ angesetzt.

4.4 Gebirgstemperatur

Die Gebirgstemperatur wird in Abhängigkeit von der Teufe angesetzt. Dabei wird der für Salzgebirge übliche Temperaturgradient (2 K/100m) auch für das Deckgebirge gewählt. Die Temperatur an der Geländeoberkante wird mit 15°C als Jahresmittelwert angesetzt. Damit ergibt sich für das Modell GMLH-S1 am oberen Modellrand (ca. 130 m unter Geländeoberkante) eine Temperatur von 290,6 K und für die Modelle GMZB-S2 und GMBF-S1 am oberen Modellrand (ca. 30 m unter Geländeoberkante) eine Temperatur von 288,8 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. Die Auflockerung infolge Dilatanz wird mittels viskoplastischer Formänderungen berücksichtigt. Diese drei Anteile werden additiv zur Gesamtverzerrungsrate $\dot{\varepsilon}_{ij}$ zusammengefasst:

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

mit

$$\dot{\varepsilon}_{ij}^{el} = \text{elastische Verzerrungsrate [1/d],}$$

$$\dot{\varepsilon}_{ij}^{cr} = \text{stationäre Kriechrate [1/d],}$$

$$\dot{\varepsilon}_{ij}^{vp} = \text{viskoplastische Verzerrungsrate [1/d].}$$

Elastische Formänderungen

Die elastische Verzerrungsrate ist bestimmt durch das erweiterte Hooke'sche Gesetz:

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

mit

$$\sigma_{ij} = \text{Komponenten des Spannungstensors [MPa],}$$

$$\sigma_{kk} = \text{Spur des Spannungstensors [MPa],}$$

$$\delta_{ij} = \text{Kroneckersymbol [-]}$$

und den Materialkennwerten

$$E = \text{Elastizitätsmodul [MPa],}$$

$$\nu = \text{Querdehnungszahl [-].}$$

Die gewählten Werte für die elastischen Materialkonstanten sind Tabelle 4.1 zu entnehmen. Der Elastizitätsmodul für das Hutgestein wurde im Labor ermittelt. Da der Hauptanhydrit im Berechnungsmodell als kompaktes homogenes Gestein modelliert wird, jedoch tatsächlich geklüftet sein kann, kann nur ein erheblich reduzierter Wert der an ungeklüfteten Gesteinsproben ermittelten Steifigkeit das geomechanische Verhalten des Anhydrits wiedergeben. Daher wird konservativ die experimentell für den Nachbruchbereich ermittelte Steifigkeit von Hauptanhydrit, näherungsweise auch für Werra-Anhydrit und Staßfurt-Karbonat, verwendet. Die übrigen Kennwerte sind aus Erfahrungswerten abgeschätzt. Die Dichte der geologischen Schichten beträgt einheitlich $\rho = 2,2 \text{ g/cm}^3$.

Tab. 4.1: Elastische Kennwerte der geologischen Schichten

Geologische Einheit	stratigraph. Bezeichnung	Kurzbezeichnung im Modell	Elastizitätsmodul [MPa]	Querdehnungszahl [-]
Keuper	k	K	2000	0,27
Hutgestein	cr	CR	10000	0,27
Hauptanhydrit	z3HA	Z3HA	30000	0,27
Werra-Anhydrit und Staßfurt-Karbonat	z1WA-z2SK	Z1WA	30000	0,27
alle kriechfähigen Salze	z2, z3, z4	(div.)	25000	0,27

Der in den Modellberechnungen ggf. berücksichtigte Versatz wurde vereinfachend als elastisches Material mit einem Elastizitätsmodul von 17,5 MPa und einer Querdehnungszahl von 0,45 angenommen.

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],
- σ_{eff} = Effektivspannung [MPa],
- σ^* = Normierungsspannung [1,0 MPa]

und den Materialkennwerten

- A_{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 berücksichtigten Salzgesteine weisen für den Spannungsexponenten alle den gleichen Wert $n = 5$ auf und unterscheiden sich hinsichtlich der Kriecheigenschaften nur durch den Strukturfaktor A_{cr} . Daher kann ihre Duktilität durch die dimensionslose relative Kriechfähigkeit A^* , bezogen auf den Referenzwert $A_0 = 0,18 \text{ 1/d}$, angegeben werden:

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

Stratigraphische Einheiten mit gleichem mechanischem Materialverhalten sind zu Homogenbereichen zusammengefasst (HUNSCHKE, PLISCHKE & SCHULZE 1998). Die für die Salze der Homogenbereiche gewählten Werte für A^* sind für die untersuchten Feldesteile in den Tabellen 4.2 bis 4.4 zusammengestellt.

Tab. 4.2: Relative Kriechfähigkeit A^* der duktilen Salzschichten („Lager H“)

Homogenbereich	stratigraph. Bezeichnung	Kurzbezeichn. im Modell	A^*	Anmerkung
Leine- und Aller-Folge	z3-z4	Z3Z4	1/32	westliche Mulde
Anhydritmittel- und Schwadensalz, Hauptmulde	z3AM, z3SS	Z3AMSS	1/32	z3AM und z3SS sind zusammengefasst
Orange- und Bank-/Bändersalz	z3OS-BK/BD	Z3OSBKBD	1/16	
Kaliflöz Staßfurt	z2SF	Z2SFW	10	westliche Mulde
Kaliflöz Staßfurt, Lagerteil H	z2SF	Z2SFH	1/2	sylvinitisches Hartsalz, Mischfazies
Kaliflöz Staßfurt, Lagerteil M	z2SF	Z2SFM	1/32	kieseritisches Hartsalz
Staßfurt-Hauptsalz 2 sowie Leine- und Aller-Folge	z2HS2, z3-z4	Z2Z3Z4	1/2	Bereich östlich von Lagerteil M I; z2HS2 und z3-z4 sind zusammengefasst
westliches Hauptsalz 3	z2HS3	Z2HS3W	1	westlicher Bereich
Hauptsalz 3	z2HS3	Z2HS3	1/4	ohne westlichen Bereich, z2HG ist enthalten
westliches Hauptsalz 2	z2HS2	Z2HS2W	1/4	westlicher Bereich
Hauptsalz 2	z2HS2	Z2HS2	1/2	Bereich der Hauptmulde

Tab. 4.3: Relative Kriechfähigkeit A* der duktilen Salzschiechten (Zentralbereich)

Homogenbereich	stratigraph. Bezeichnung	Kurzbezeichn. im Modell	A*	Anmerkung
Anhydritmittel- und Schwadensalz	z3AM, z3SS	Z3AM	1/32	z3AM und z3SS sind zusammengefasst (Hauptmulde)
Orange- und Bank-/Bändersalz	z3OS-BK/BD	Z3OSBKBD	1/16	umfasst z3LS und z3BS-LS sowie in der Ostmulde z3TM und z3SS
Kaliflöz Staßfurt, carnallitisch, Lagerteil F	z2SF	Z2SFLF	10	
Kaliflöz Staßfurt, carnallitisch, Lagerteil K	z2SF	Z2SFLK	10	
Kaliflöz Staßfurt, carnallitisch, Lagerteil M	z2SF	Z2SFLM	10	
Trennschichten zwischen Hauptanhydritschollen	z2SF	Z2SFTS	10	
Staßfurt-Hauptsalz, Westmulde	z2HS3	Z2HS3WM	1/4	
Staßfurt-Hauptsalz, Südlicher Randsattel	z2HS3	Z2HS3SR	1/4	
Staßfurt-Hauptsalz, Westlicher Sattel	z2HS2	Z2HS2WS	1/4	

Tab. 4.4: Relative Kriechfähigkeit A* der duktilen Salzschiechten („Bunte First“)

Homogenbereich	stratigraph. Bezeichnung	Kurzbezeichn. im Modell	A*	Anmerkung
Aller-Folge	z4	Z4	1/8	z3SS-TM ist enthalten
Anhydritmittelsalz	z3AM	Z3AM	1/32	umfasst in Süd- und Ostmulde auch z3BK/BD, z3OS und z3LS
Linien- und Bank-/Bändersalz	z3LS-BK/BD	Z3LSBKBD	1/16	z3OS ist enthalten
Kaliflöz Staßfurt	z2SF	SFC	10	carnallitisch; im Bereich Ostmulde und Randsattel I nicht modelliert
Kaliflöz Staßfurt	z2SF	SFH	1/2	Hartsalz
Staßfurt-Hauptsalz	z2HS3	Z2HS3	1/4	umfasst auch z2HG-UE, z2HS2 und z2BA-HS2

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 α und k :

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

mit

$$\begin{aligned} J_1 &= 1. \text{ Invariante des Spannungstensors [MPa]}, \\ J_2^D &= 2. \text{ Invariante des Spannungsdeviators [MPa}^2\text{]}, \\ \alpha &= \text{fiktiver Reibungswinkel [-]}, \\ k &= \text{fiktive Kohäsion [MPa]}. \end{aligned}$$

Für die viskoplastische Verzerrung wird eine assoziierte Fließregel verwendet:

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

mit

$$\begin{aligned} \eta &= \text{Viskosität [MPa} \cdot \text{d]}, \\ \tilde{Q} &= \text{Spannungspotential [MPa]}, \\ \langle F \rangle &= \begin{cases} 0, & \text{wenn } F < 0 \\ F, & \text{wenn } F \geq 0 \end{cases} \text{ [MPa]}. \end{aligned}$$

Um die Dilatanzgrenze nach CRISTESCU & HUNSCHE (1998) im Bereich relevanter Spannungszustände anzunähern, werden für die Fließgrenze folgende Parameter verwendet:

$$\begin{aligned} \alpha &= \frac{1}{2\sqrt{3}} \approx 0,2887, \\ k &= 0,0. \end{aligned}$$

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 Gebirgsbereich, 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 beschränkt und so im Sinne einer konservativen Aussage die maximal mögliche Größe der Auflockerungszone bestimmt. Die Viskosität η im viskoplastischen Modell wird so gewählt, dass eine möglichst schnelle Umlagerung der Spannungen oberhalb der Dilatanzgrenze erreicht wird.

5 Modellberechnungen

Die gebirgsmechanischen Berechnungen wurden mit dem FE-Programmsystem ANSALT I (NIPP 1991) durchgeführt. Die Berechnungsmodelle wurden mit dem Programmsystem INCA (NIPP, MÜLLER & STECHER 1994) erstellt.

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. Dies ist aufgrund der ausgeprägten NNW-SSE-Richtung der geologischen Struktur und der sich teilweise daran ausrichtenden Abbaureihen zulässig. Im Hinblick auf die aus den Modellberechnungen abzuleitende geomechanische Beurteilung der Barrierenintegrität führen die zweidimensionalen Modelle i. a. zu ungünstigeren Spannungs- und Verformungszuständen und sind damit konservativ abdeckend.

In allen Berechnungsmodellen wurde neben der Salzstruktur nicht das gesamte Deckgebirge, sondern vereinfachend nur der vom Salzspiegel bis zu einer Teufe von ca. 130 m (Lager H) bzw. von ca. 30 m (Zentralbereich Marie, Bunte First) reichende Deckgebirgstheil abgebildet. Der darüber liegende, bis zur Geländeoberfläche reichende Teil wurde in seiner Tragwirkung vernachlässigt, in seiner Lastwirkung jedoch durch entsprechende konstant verteilte Ersatzlasten berücksichtigt, die sich aus einer angenommenen mittleren Deckgebirgsdichte von $\rho = 2,2 \text{ g/cm}^3$ ergeben.

In den einzelnen Modellen erfolgte der Ausbruch der Hohlräume jeweils gleichzeitig spontan. Vergleichende Berechnungen haben gezeigt, dass der sukzessive Ausbruch zu den tatsächlichen Zeitpunkten nur in den ersten zwei Jahrzehnten zu anderen Ergebnissen führt.

5.1 Modellberechnungen zu „Lager H“

5.1.1 Geometrische Idealisierung und Diskretisierung des FE-Modells GMLH-S1

Der für die Modellierung gewählte Berechnungsausschnitt beträgt in horizontaler Richtung 1200 m und in vertikaler Richtung 650 m. Die Oberkante des Berechnungsmodells liegt ca. 130 m unterhalb der Geländeoberkante. Das Modell umfasst 17700 isoparametrische

8-Knoten-Elemente und 53323 Knoten. Die Knoten der seitlichen Modellränder sind vertikal verschieblich gelagert. In horizontaler Richtung sind diese Knoten mit zusätzlichen Randelementen elastisch gebettet, die so ausgelegt sind, dass ihre Steifigkeit einem Gebirgsbereich von 650 m Breite mit einem Elastizitätsmodul von 25000 MPa und einer Querdehnungszahl von 0,27 entspricht. Die Knoten des unteren Modellrandes sind horizontal verschieblich gelagert und in vertikaler Richtung fixiert.

Anlage 5.1 zeigt das gesamte diskretisierte FE-Modell GMLH-S1 einschließlich der für die einzelnen Homogenbereiche gewählten, rot gekennzeichneten Elementgruppen. Der Nahbereich um die modellierten Hohlräume ist in drei Ausschnitten dargestellt. Anlage 5.2 zeigt den Ausschnitt 1 des FE-Modells mit Hohlräumen im Bereich zwischen Westsattel und Westmulde. Anlage 5.3 zeigt den Ausschnitt 2 mit Hohlräumen im Bereich der Hauptmulde bzw. des Lagerteils H. Anlage 5.4 zeigt den Ausschnitt 3 mit Hohlräumen im Bereich zwischen Randsattel I und Randmulde.

Im Lagerteil H wurde der Kaliabbau auf der Sohle -253 m NN als vollständig verfüllt, der Kaliabbau auf der Sohle -225 m NN mit einem Verfüllungsgrad von ca. 85 % modelliert. Die nach 1990 erfolgte Verfüllung von Kammern zwischen den Nordstrecken wurde konservativ nicht berücksichtigt.

Die im Lagerteil H auf der Sohle -318 m NN angetroffenen, offensichtlich geschlossenen Klüfte wurden nicht modelliert.

5.1.2 Modellvarianten zu „Lager H“

Bezüglich der Kriechfähigkeit der Salzsichten im betrachteten Modellschnitt wurde von der aus anderen Lokationen des ERA Morsleben bekannten Streubreite ausgegangen. Es wurden folgende Berechnungsvarianten untersucht:

GMLH-S1-L[†]: Dieses Modell ist das Referenzmodell für den Modellschnitt GMLH-S1 und berücksichtigt bezüglich der Festlegung aller Modellparameter den bestmöglichen Kenntnisstand („Best-estimate“-Parameter).

GMLH-S1-M: In dieser Berechnungsvariante wurde für den Großteil der Salinarschichten eine gegenüber dem Referenzmodell höhere Duktilität angenommen. Dazu wurde die relative Kriechfähigkeit A^* entsprechend der im Labor ermittelten Streubreite erhöht.

[†] GMLH steht für „Grube Marie, Lager H“, S1 bezeichnet das Modell bezüglich Schnittlage und Geometrie, dann folgt die fortlaufende Kennung des Berechnungslaufs, hier L.

GMLH-S1-N: In dieser Berechnungsvariante wurde für den Großteil der Salinarschichten eine gegenüber dem Referenzmodell geringere Duktilität angenommen. Dazu wurde die relative Kriechfähigkeit A^* entsprechend der im Labor ermittelten Streubreite abgemindert.

Bezüglich Geologie und Hohlraumgeometrie sind alle drei Modellvarianten gleich. Die in den Varianten für die relative Kriechfähigkeit A^* gewählten Werte sind in Tabelle 5.1 zusammengestellt.

Der Berechnungszeitraum beträgt jeweils insgesamt 150 Jahre. Er beginnt mit einer fiktiven simultanen Auffahrung aller Hohlräume im Jahre 1920 und endet im Jahr 2070, so dass ein ausreichend großer Prognosezeitraum über die Betriebsdauer hinaus betrachtet wird. Der gegenwärtige Zeitpunkt entspricht einer Standzeit der Hohlräume von ca. 80 Jahren.

Tab. 5.1: In den Modellvarianten GMLH-S1 gewählte Parameter für A^*

Homogenbereich	Kurzbezeichnung im Modell	Relative Kriechfähigkeit A^*		
		GMLH-S1-L (Referenzmodell)	GMLH-S1-M (Hohe Duktilität)	GMLH-S1-N (Niedr. Duktilität)
Leine- und Aller-Folge (z3-z4)	Z3Z4	1/32	1/32	1/64
inneres Muldensalz (z3AM, z3SS)	Z3AMSS	1/32	1/32	1/32
Orange- und Bank-/Bändersalz (z3OS-BK/BD)	Z3OSBKBD	1/16	1/8	1/64
Kaliflöz Staßfurt (z2SF)	Z2SFW	10	10	1/2
Kaliflöz Staßfurt (z2SF), Lagerteil H	Z2SFH	1/2	1/2	1/32
Kaliflöz Staßfurt (z2SF), Lagerteil M	Z2SFM	1/32	1/2	1/32
Hauptsalz 2 und z3-z4 (z2HS2, z3-z4)	Z2Z3Z4	1/2	1	1/4
westliches Hauptsalz 3 (z2HS3)	Z2HS3W	1	1	1/8
Hauptsalz 3 (z2HS3)	Z2HS3	1/4	1	1/8
westliches Hauptsalz 2 (z2HS2)	Z2HS2W	1/4	1	1/4
Hauptsalz 2 (z2HS2)	Z2HS2	1/2	1	1/4

5.2 Modellberechnungen zum Zentralbereich

5.2.1 Geometrische Idealisierung und Diskretisierung des FE-Modells GMZB-S2

Der für die Modellierung gewählte Berechnungsausschnitt beträgt in horizontaler Richtung 1600 m und in vertikaler Richtung 800 m. Er erfasst einen Teufenbereich von etwa +100 m NN bis -700 m NN. Der Salzspiegel liegt bei etwa -140 m NN und ungefähr 240 m unter dem oberen Modellrand. Bei einer mittleren Deckgebirgsmächtigkeit von ca. 270 m befindet sich die Oberkante des Berechnungsmodells etwa 30 m unterhalb GOK.

Das FE-Modell GMZB-S2 besteht aus 18564 isoparametrischen 8-Knoten-Elementen und 55763 Knoten. Anlage 5.5 zeigt die Diskretisierung des gesamten FE-Modells einschließlich der rot gekennzeichneten Homogenbereichsgrenzen. Für die Darstellung der Berechnungsergebnisse wird ein Ausschnitt gewählt, der das zentrale Grubengebäude umfasst (Anlage 5.5). Das FE-Modell ist in diesem Ausschnitt in Anlage 5.6 noch einmal dargestellt.

Die Knoten der seitlichen Modellränder sind vertikal verschieblich gelagert und in horizontaler Richtung mit zusätzlichen Randelementen elastisch gebettet. Diese Elemente sind so ausgelegt, dass ihre Steifigkeit einem Gebirgsbereich von 500 m Breite mit einem Elastizitätsmodul von 25000 MPa und einer Querdehnungszahl von 0,27 entspricht. Die Knoten des unteren Modellrandes sind horizontal verschieblich gelagert und in vertikaler Richtung fixiert.

5.2.2 Modellvarianten zum Zentralbereich Marie

Bezüglich der Kriechfähigkeit der Salzsichten im betrachteten Modellschnitt wurde von der dort und aus anderen Lokationen des ERA Morsleben bekannten Streubreite ausgegangen. Es wurden folgende Berechnungsvarianten untersucht:

GMZB-S2-A[‡]: Dieses Modell ist das Referenzmodell für den Modellschnitt GMZB-S2 und berücksichtigt bezüglich der Festlegung aller Modellparameter den bestmöglichen Kenntnisstand („Best-estimate“-Parameter).

GMZB-S2-B: In dieser Berechnungsvariante wurde für den Großteil der Salinarschichten eine gegenüber dem Referenzmodell höhere Duktilität angenommen. Dazu wurde die relative Kriechfähigkeit A^* entsprechend der im Labor ermittelten Streubreite erhöht.

[‡] GMZB steht für „Grube Marie, Zentralbereich“, S2 bezeichnet das Modell bezüglich Schnittlage und Geometrie, dann folgt die fortlaufende Kennung des Berechnungslaufs, hier A.

GMZB-S2-C: In dieser Berechnungsvariante wurde für den Großteil der Salinarschichten eine gegenüber dem Referenzmodell geringere Duktilität angenommen. Dazu wurde die relative Kriechfähigkeit A^* entsprechend der im Labor ermittelten Streubreite abgemindert.

GMZB-S2-D: In dieser Berechnungsvariante wurde für den Haupt- und den Werra-Anhydrit eine gegenüber dem Referenzmodell höhere Steifigkeit von $E = 60000$ MPa angenommen, die dem ungeklüfteten Gestein entspricht.

Bezüglich Geologie und Hohlraumgeometrie sind alle vier Modellvarianten gleich. Die in den Varianten für die relative Kriechfähigkeit A^* der duktilen Salzsichten und für den Elastizitätsmodul der Anhydritschichten gewählten Werte sind in Tabelle 5.2 zusammengestellt.

Tabelle 5.2: In den Modellvarianten GMZB-S2 gewählte Parameter für A^* und E

Homogenbereich	Kurzbezeichnung im Modell	GMZB-S2-A (Referenzmodell)	GMZB-S2-B (Hohe Duktilität)	GMZB-S2-C (Niedrige Duktilität)	GMZB-S2-D (Hohe Anhydritsteifigk.)
Relative Kriechfähigkeit A^* der duktilen Salze					
Anhydritmittel- (z3AM) und Schwadensalz (z3SS)	Z3AM	1/32	1/32	1/64	1/32
Orange- und Bank-/Bänder-salz (z3OS-BK/BD)	Z3OSBKBD	1/16	1/8	1/64	1/16
Kaliflöz Staßfurt (z2SF), carnallitisch, Lagerteil F	Z2SFLF	10	10	10	10
Kaliflöz Staßfurt (z2SF), carnallitisch, Lagerteil K	Z2SFLK	10	10	10	10
Kaliflöz Staßfurt (z2SF), carnallitisch, Lagerteil M	Z2SFLM	10	10	10	10
Trennschichten zwischen Hauptanhydritschollen (z2SF)	Z2SFTS	10	10	10	10
Staßfurt-Hauptsalz (z2HS3), Westmulde	Z2HS3WM	1/4	1	1/8	1/4
Staßfurt-Hauptsalz (z2HS3), Südlicher Randsattel	Z2HS3SR	1/4	1	1/8	1/4
Staßfurt-Hauptsalz (z2HS3), Westlicher Sattel	Z2HS3WS	1/4	1/2	1/4	1/4
Elastizitätsmodul E (MPa) der Anhydritschichten					
Werra-Anhydrit (z1WA)	Z1WA	30000	30000	30000	60000
Hauptanhydrit (z3HA)	Z3HA	30000	30000	30000	60000

Der Berechnungszeitraum beträgt jeweils insgesamt 130 Jahre. Er beginnt mit einem fiktiven simultanen Auffahrzeitpunkt der Abbaue im Jahre 1920 und endet im Jahr 2050, so dass ein ausreichend großer Prognosezeitraum über die Betriebsdauer hinaus betrachtet wird. Der gegenwärtige Zeitpunkt entspricht einer Standzeit der Hohlräume von ca. 80 Jahren.

5.3 Modellberechnungen zu „Bunte First“

5.3.1 Geometrische Idealisierung und Diskretisierung des FE-Modells

Die geomechanische Situation im Bereich „Bunte First“ ist, insbesondere wegen der vorliegenden Abbaukonfiguration, durch eine ausgeprägte dreidimensionale Tragwirkung gekennzeichnet, die im strengen Sinn nur mit einem räumlichen Berechnungsmodell zu erfassen ist. Bei der Diskretisierung eines derartigen Modells ist jedoch ein sehr hoher Detaillierungsgrad erforderlich, so dass die Durchführung räumlicher Berechnungen nur sehr begrenzt möglich ist. Daher wird der Untersuchungsbereich vereinfachend zweidimensional im gewählten Modellschnitt GMBF-S1 abgebildet. Dies ist aufgrund der ausgeprägten NNW-SSE-Richtung der geologischen Struktur der Schachanlage Marie zulässig. Hinsichtlich der aus den FE-Berechnungen abzuleitenden geomechanischen Beurteilung der Barrierenintegrität führt das 2D-Modell zu ungünstigeren Spannungs- und Verformungszuständen und ist damit konservativ abdeckend.

Im Berechnungsmodell wurde neben der Salzstruktur nicht das gesamte Deckgebirge, sondern vereinfachend nur der vom Salzspiegel bis ca. +100 m NN reichende Teil abgebildet. Der restliche, bis zur Geländeoberfläche reichende Teil mit einer Mächtigkeit von ca. 30 m wurde in seiner Tragwirkung vernachlässigt, in seiner Lastwirkung jedoch durch entsprechende Ersatzlasten berücksichtigt, die sich aus einer angenommenen mittleren Deckgebirgsdichte von $\rho = 2,2 \text{ g/cm}^3$ ergeben. Einige Hohlräume, die etwas weiter nördlich oder südlich des Profils 7.1 liegen, wurden in die Modellebene hineingezogen. Der Hochabbau im Lagerteil E wurde konservativ ohne zwei Schweben gerechnet. Nicht berücksichtigt wurde, dass mehrere Hohlräume bereits verfüllt wurden. Am westlichen und östlichen Rand des Modells wurde die Geologie stark vereinfacht abgebildet, da von diesen Rändern keine relevanten Einflüsse ausgehen.

Der für die Modellierung gewählte Berechnungsausschnitt beträgt in horizontaler Richtung 1150 m und in vertikaler Richtung 750 m. Das Modell umfasst 12404 isoparametrische 8-Knoten-Elemente und 37373 Knoten. Die Knoten der seitlichen Modellränder 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 25000 MPa und einer Querdehnungszahl von 0,27 entspricht. Die Knoten des unteren Modellrandes sind horizontal verschieblich gelagert und in vertikaler Richtung festgehalten.

Die Diskretisierung des gesamten FE-Modells ist Anlage 5.7 zu entnehmen. Die Anlagen 5.8 bis 5.10 zeigen verschiedene Ausschnittsdarstellungen des FE-Modells. In Anlage 5.8 ist analog zu Ausschnitt 1 (Anlage 4.13) die Diskretisierung im Bereich von Lagerteil E und der westlich davon liegenden Hohlräume dargestellt. Anlage 5.9 kann analog zu Ausschnitt 2 (Anlage 4.14) die Diskretisierung im Bereich von Lagerteil F entnommen werden. Anlage 5.10 zeigt analog zu Ausschnitt 3 (Anlage 4.15) die Diskretisierung im Bereich von Lagerteil I.

5.3.2 Modellvarianten zu „Bunte First“

Bezüglich der Kriechfähigkeit der Salzsichten im betrachteten Modellschnitt wurde von der aus anderen Lokationen des ERA Morsleben bekannten Streubreite ausgegangen. Zusätzlich zum Referenzmodell wurden drei Modellvarianten berechnet, in denen die entsprechenden Materialparameter variiert wurden:

GMBF-S1-A[§]: Dieses Modell ist das Referenzmodell für den Modellschnitt GMBF-S1 und berücksichtigt bezüglich der Modellparameter den bestmöglichen Kenntnisstand („Best-estimate“-Parameter).

GMBF-S1-B: In dieser Berechnungsvariante wurde für den Großteil der Salinarschichten eine gegenüber dem Referenzmodell höhere Duktilität angenommen. Dazu wurde die relative Kriechfähigkeit A^* entsprechend der im Labor ermittelten Streubreite erhöht.

GMBF-S1-C: In dieser Berechnungsvariante wurde für den Großteil der Salinarschichten eine gegenüber dem Referenzmodell geringere Duktilität angenommen. Dazu wurde die relative Kriechfähigkeit A^* entsprechend der im Labor ermittelten Streubreite abgemindert.

GMBF-S1-D: In dieser Berechnungsvariante wurde für den Haupt- und den Werra-Anhydrit eine gegenüber dem Referenzmodell höhere Steifigkeit von $E = 60000$ MPa angenommen, die dem ungeklüfteten Gestein entspricht.

[§] GMBF steht für „Grube Marie, Bunte First“, S1 bezeichnet das Modell bezüglich Schnittlage und Geometrie, dann folgt die fortlaufende Kennung des Berechnungslaufs, hier A.

Bezüglich Geologie und Hohlraumgeometrie sind alle vier Modellvarianten gleich. Die in den Varianten für die relative Kriechfähigkeit A^* der duktilen Salzschiechten und für den Elastizitätsmodul der Anhydritschichten gewählten Werte sind in Tabelle 5.3 zusammengestellt.

Tabelle 5.3: In den Modellvarianten GMBF-S1 gewählte Parameter für A^* und E

Homogenbereich	Kurzbezeichnung im Modell	GMBF-S1-A (Referenzmodell)	GMBF-S1-B (Hohe Duktilität)	GMBF-S1-C (Niedrige Duktilität)	GMBF-S1-D (Hohe Anhydritsteifigkeit)
		Relative Kriechfähigkeit A^* der duktilen Salzschiechten			
Aller-Folge (z4)	Z4	1/8	1/2	1/16	1/8
Linien- und Bank-/Bändersalz (z3LS-BK/BD)	Z3LSBKBD	1/16	1/8	1/64	1/16
Anhydritmittelsalz (z3AM)	Z3AM	1/32	1/32	1/64	1/32
Kaliflöz Staßfurt (z2SF), carnallitisch	Z2SFC	10	10	10	10
Kaliflöz Staßfurt (z2SF), Hartsalz	Z2SFH	1/2	1/2	1/2	1/2
Staßfurt-Hauptsalz (z2HS3)	Z2HS3	1/4	1	1/8	1/4
		Elastizitätsmodul E (MPa) der Anhydritschichten			
Werra-Anhydrit (z1WA)	Z1WA	30000	30000	30000	60000
Hauptanhydrit (z3HA)	Z3HA	30000	30000	30000	60000

Der Berechnungszeitraum beträgt jeweils insgesamt 130 Jahre. Er beginnt mit einem fiktiven simultanen Auffahrzeitpunkt der Abbaue im Jahr 1920 und endet im Jahr 2050, so dass ein ausreichend großer Prognosezeitraum über die Betriebsdauer hinaus betrachtet wird. Der gegenwärtige Zeitpunkt entspricht einer Standzeit der Hohlräume von ca. 80 Jahren.

6 Darstellung der Berechnungsergebnisse

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

Für die mit den Referenzmodellen durchgeführten Berechnungen sind jeweils exemplarisch folgende Ergebnisse für die Berechnungszeitpunkte 80 und 150 Jahre (Modell GMLH-S1) bzw. 80 und 130 Jahre (Modelle GMZB-S2 und GMBF-S1) als Isoflächenplots dargestellt:

- Hauptspannungen S_1 und S_2 ,
- Effektivspannungen,
- Effektivverzerrungen.

Darüber hinaus sind für die Referenzmodelle zum Zeitpunkt 80 und 150 Jahre (Modell GMLH-S1) bzw. 80 und 130 Jahre (Modelle GMZB-S2 und GMBF-S1) sowie für alle übrigen Modellvarianten zum Zeitpunkt 150 Jahre (GMLH-S1) bzw. 130 Jahre (GMZB-S2 und GMBF-S1) exemplarisch folgende Ergebnisse in Isoflächenplots dargestellt:

- Dilatante Salzgebirgsbereiche, in denen 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 $\rho = 1,1 \text{ g/cm}^3$ und der kleinsten Hauptdruckspannung S_1 . Bereiche, in denen dieser Laugendruck die maximale Hauptspannung S_1 , d.h. die kleinste Hauptdruckspannung überschreitet, werden nachfolgend als hypothetisch laugendruckgefährdete Bereiche bezeichnet. Dabei wird nur der Zustand der duktilen Salzsichten, nicht jedoch der der ausschließlich elastisch reagierenden Schichten untersucht. Von Hauptanhydrit und Deckgebirge wird grundsätzlich angenommen, dass sie primär Wegsamkeiten aufweisen.

6.1 Berechnungsergebnisse zu „Lager H“

6.1.1 Referenzmodell GMLH-S1-L

Kleinste Hauptdruckspannungen S_1

Die gegenüber dem primären Spannungszustand berechnete Abminderung der kleinsten Hauptdruckspannung ist räumlich derart begrenzt, dass sie das Deckgebirge nicht erreicht. Lediglich im Bereich der Salzspiegelsenke über dem Lagerteil H treten auch im Hutgestein Reduzierungen von S_1 um ca. 2 MPa auf (Anlagen 6.1 und 6.2). In den Firsten der Hohlräume bilden sich nur geringe Zugspannungen, die einen Wert von 1 MPa nicht überschreiten.

Größte Hauptdruckspannungen S_2

Die größte Hauptdruckspannung steigt von Werten unter 2 MPa im unmittelbaren Bereich der Hohlräume auf über 6 MPa am Salzspiegel (Anlagen 6.3 und 6.4). Die Reduktion von S_2 im unmittelbaren Nahbereich der Hohlräume führt infolge Spannungsumlagerung in weiter außen gelegenen Zonen zu etwas erhöhten Druckwerten.

Effektivspannungen

Effektivspannungen mit Werten bis ca. 6 MPa bleiben auf die Salzsichten beschränkt (Anlagen 6.5 und 6.6). Lediglich vom Steinsalzabbau 32 reichen zwei Scherbänder mit bis zu 8 MPa betragenden Spannungen bis zum Lagerteil H hin. Im Deckgebirge weist nur der Bereich über der Salzspiegelsenke Effektivspannungen von 1 bis ca. 3 MPa auf.

Effektivverzerrungen

Signifikante Effektivverzerrungen treten im allgemeinen nur im Nahbereich der Hohlräume auf (Anlagen 6.7 und 6.8), insbesondere in den Stößen der Steinsalzabbau und in der Schwebe des obersten Abbaus im Lagerteil H. Dort betragen die Verzerrungen bis zu 3 %.

Dilatante Bereiche

Die als dilatant ausgewiesenen Bereiche um die Hohlräume sind größtenteils durch den unmittelbar nach Auffahrung der Hohlräume auftretenden Spannungszustand verursacht, der lokal zu einer Überschreitung der Dilatanzgrenze führt. Diese Bereiche bleiben auf die Umgebung der Abbaue beschränkt (Anlagen 6.9 und 6.10). Im Bereich des Lagerteils H treten dilatante Zonen auf, die von den Kaliabbauen bis zu benachbarten Hohlräumen (Nordstrecke F, Steinsalzabbau 32) reichen.

Hypothetisch laugendruckgefährdete Bereiche

Die im Bereich des West- und des Randsattels I liegenden Hohlräume weisen nur in ihrer näheren Umgebung hypothetisch laugendruckgefährdete Bereiche auf. Unterhalb der Salzspiegelsenke ergibt sich für die Kaliabbaue im Lagerteil H und die benachbarten Steinsalzabbaue ein größerer zusammenhängender Bereich, der hypothetisch laugendruckgefährdet ist (Anlage 6.13). Dieser Bereich erstreckt sich nach 80 Jahren (also zum gegenwärtigen Zeitpunkt) noch nicht bis an die Salzspiegelsenke, erreicht diese aber nach ca. 110 Jahren in einem schmalen Band. Anlage 6.14 zeigt den für 150 Jahre berechneten Zustand.

6.1.2 Modellvarianten GMLH-S1-M und GMLH-S1-N

Die in den zwei Modellvarianten erzielten Ergebnisse weisen keine gravierenden Unterschiede zum Referenzmodell auf. Außerdem zeigen sich nur geringe Unterschiede zwischen den für 80 Jahre (entspricht etwa dem gegenwärtigen Zustand) und für 150 Jahre berechneten Ergebnissen. Die für 150 Jahre ermittelte Beanspruchung der Salzbarriere gilt konservativ auch für den gegenwärtigen Zustand.

Dilatante Bereiche

Die räumliche Erstreckung der in den Modellvarianten ermittelten dilatanten Bereiche (Anlagen 6.11 und 6.12) ist den mit dem Referenzmodell berechneten Ergebnissen sehr ähnlich. Es ergeben sich auch hier räumlich nur sehr begrenzte dilatante Gebirgsbereiche.

Hypothetisch laugendruckgefährdete Bereiche

Die hypothetisch laugendruckgefährdeten Bereiche reichen zu unterschiedlichen Zeitpunkten in einem relativ schmalen Band bis an die Salzspiegelsenke, und zwar im Modell GMLH-S1-M mit erhöhter Duktilität nach ca. 60 Jahren und im Referenzmodell GMLH-S1-L nach ca. 110 Jahren. Im Modell GMLH-S1-N mit verminderter Duktilität wird innerhalb des Berechnungszeitraums von 150 Jahren die Salzspiegelsenke nicht erreicht (Anlagen 6.15 und 6.16).

6.2 Berechnungsergebnisse zum Zentralbereich

6.2.1 Referenzmodell GMZB-S2-A

Kleinste Hauptdruckspannungen S_1

Der Vergleich der Ergebnisse nach 80 und 130 Jahren zeigt in überwiegenden Teilen des Modells keine nennenswerten Unterschiede bezüglich der berechneten Hauptspannungen S_1 (Anlagen 6.17 und 6.18). Allerdings bildet sich nach mehr als 80 Jahren Standzeit im Bereich

des westlichen Hauptanhydrits (nahe Lagerteil F) am Salzspiegel in Hutgestein und Hauptanhydrit eine lokal begrenzte Zone mit Zugspannungen heraus. Ferner ergeben sich erwartungsgemäß Zugspannungsbereiche in einigen Stößen der Kaliabbau und in den im Modell flach ausgebildeten Firsten der Steinsalzabbau. Aufgrund der i. allg. geringen Zugfestigkeit von Salzgesteinen besteht hier ein Potential für Abschalungen.

Größte Hauptdruckspannungen S_2

Die höchsten Beträge der größten Hauptdruckspannung S_2 treten in den beiden salzspiegel-nahen Hauptanhydritschollen am Lagerteil F auf (Anlagen 6.19 und 6.20). Insbesondere die untere der beiden Schollen wird an ihrer östlichen Seite stark auf Druck beansprucht. Dies korreliert mit der hohen Hauptzugspannung S_1 an der westlichen Seite und weist auf eine Biegebeanspruchung hin. Die Unterschiede der Ergebnisse zwischen 80 und 130 Jahren nach Auffahrung der Hohlräume sind gering; es ist eine geringe Ausweitung der Zonen höherer Hauptdruckspannungen zu verzeichnen.

Effektivspannungen

Die Effektivspannungen steigen zwischen 80 und 130 Jahren Standzeit nur stellenweise und nur geringfügig an, bereichsweise ergeben sich auch kriechbedingte Entlastungen (Anlagen 6.21 und 6.22). Am stärksten belastet sind neben den beiden salzspiegel-nahen Hauptanhydritschollen am Lagerteil F die Pfeiler zwischen den Abbauen auf den beiden oberen Sohlen -231 m NN und -267 m NN zwischen Lagerteil F und Lagerteil K. Ferner tritt ein Band erhöhter Effektivspannungen von den beiden obersten Hauptanhydritschollen am Lagerteil F zu den Abbauen auf der Sohle -267 m NN auf.

Effektivverzerrungen

Die Pfeiler zwischen den Abbauen der beiden Sohlen -231 m NN und -267 m NN weisen ebenso wie das Kalisalz in der Störung Lager K vergleichsweise hohe Effektivverzerrungen auf (Anlagen 6.23 und 6.24). Das Staßfurt-Hauptsalz, das als Trennschicht am Lagerteil F ansteht, gehört ebenfalls zu den stärker beanspruchten Gebirgsbereichen. Die Zonen höherer Effektivverzerrung vergrößern sich mit der Zeit insbesondere in den Kernzonen, zu denen das Scherband zwischen den Steinsalzabbauen und von diesen zu den beiden obersten Hauptanhydritschollen im Bereich des Lagerteils F gehört. Außerdem treten ausgeprägte Scherbänder zwischen den Abbauen der Sohle -231 m NN und Lagerteil K auf.

Dilatante Bereiche

Erwartungsgemäß bilden sich im Nahbereich aller Hohlräume dilatante Zonen (Anlagen 6.25 und 6.26). Weitere größere Dilatanzbereiche ergeben sich zwischen den Kaliabbauen im Lagerteil K und den benachbarten Abbauen auf beiden Seiten dieses Lagerteils. Die Erstreckung der dilatanten Bereiche nach 80 und 130 Jahren ist annähernd konstant. Eine

Ausnahme bildet der Bereich vom Salzspiegel zu den Hauptanhydritschollen oberhalb von Lagerteil F. Nach 130 Jahren Standzeit hat sich am Salzspiegel westlich der obersten Hauptanhydritscholle eine lokal begrenzte Dilatanzzone ausgebildet, die auf die Starrkörperverschiebung dieser Scholle zurückgeführt werden kann. Hier hatte bereits die Hauptspannung S_1 nach 130 Jahren auf eine Zugbeanspruchung im Hutgestein und in der Hauptanhydritscholle hingewiesen. Sehr kleine Dilatanzbereiche entstehen an der östlichen Flanke der obersten Scholle und am Übergang zur darunterliegenden Scholle. Ferner ergibt sich oberhalb der isolierten Abbaukammer auf der Sohle -332 m NN eine Dilatanzzone, die bis zur oberhalb der Kammer liegenden Hauptanhydritscholle reicht.

Hypothetisch laugendruckgefährdete Bereiche

Hypothetisch laugendruckgefährdete Bereiche treten großräumig in der weiteren Umgebung aller Hohlräume auf (Anlagen 6.30 und 6.31). Insbesondere in der Hauptmulde zwischen den Lagerteilen F und K erstrecken sich diese Bereiche bis zum Salzspiegel. Sie vergrößern sich zwischen 80 und 130 Jahren Standzeit nur geringfügig.

6.2.2 Modellvarianten GMZB-S2-B, GMZB-S2-C und GMZB-S2-D

Die in den drei Modellvarianten erzielten Ergebnisse weisen keine gravierenden Unterschiede zum Referenzmodell auf. Außerdem zeigen sich nur geringe Abweichungen zwischen den für 80 Jahre (Ist-Zustand) und für 130 Jahre berechneten Ergebnissen. Die für 130 Jahre ermittelte Beanspruchung der Salzbarriere gilt konservativ auch für den gegenwärtigen Zustand.

Die ungünstigsten Ergebnisse werden i. allg. mit der Variante GMZB-S2-B mit erhöhter Duktilität der Salzsichten erzielt. Die geringsten Abweichungen zum Referenzmodell zeigen sich bei Variante GMZB-S2-D mit erhöhter Steifigkeit des Haupt- und des Werra-Anhydrits.

Dilatante Bereiche

Die erhöhte Kriechfähigkeit der Salzsichten in Modellvariante GMZB-S2-B führt am Salzspiegel oberhalb von Lagerteil F zu einem früheren Auftreten von Dilatanz (Anlage 6.27). Es bildet sich ausserdem nach 130 Jahren ein zweiter lokal begrenzter Dilatanzherd in Salzspiegelnähe im Homogenbereich Z3AM westlich von Lagerteil K heraus. Dies resultiert aus der Überlagerung des großräumigen Druckgewölbes über dem Abbaufeld (Anlagen 6.19 und 6.20) mit einer durch das gering kriechfähige Z3AM hervorgerufenen Reduktion der Spannung S_1 (Anlagen 6.17 und 6.18).

Wird die Kriechfähigkeit der Salze in Modellvariante GMZB-S2-C verringert, zeigen sich auch nach 130 Jahren Standzeit keine Dilatanzzonen am Salzspiegel (Anlage 6.28). Die zeitliche

Veränderung der übrigen Dilatanzbereiche entspricht annähernd den Ergebnissen der Modellvarianten GMZB-S2-A und -B.

Eine erhöhte Steifigkeit des Haupt- und Werra-Anhydrits in Modellvariante GMZB-S2-D ergibt im Vergleich zum Referenzmodell keine signifikant anderen Ergebnisse (Anlage 6.29).

Hypothetisch laugendruckgefährdete Bereiche

Bei erhöhter Duktilität der Salzsichten in Modellvariante GMZB-S2-B zeigen die hypothetisch laugendruckgefährdeten Bereiche im Vergleich zum Referenzmodell nur eine geringfügig größere Ausdehnung (Anlage 6.32), während eine Reduzierung der Duktilität in Modellvariante GMZB-S2-C zu deutlich kleineren Bereichen führt (Anlage 6.33). Eine Erhöhung der Steifigkeit des Haupt- und des Werra-Anhydrits in Modellvariante GMZB-S2-D ergibt im Vergleich zum Referenzmodell keine nennenswerten Abweichungen (Anlage 6.34).

6.3 Berechnungsergebnisse zu „Bunte First“

6.3.1 Referenzmodell GMBF-S2-A

Kleinste Hauptdruckspannungen S_1

Die gegenüber dem primären Spannungszustand berechnete Abminderung der kleinsten Hauptdruckspannung ist auf den Bereich der Hohlräume begrenzt und reicht i. allg. nicht bis an den Salzspiegel. Lediglich über den in der Südmulde gelegenen Kammern 23 und 24 erstreckt sich eine kleine Zone geringfügig reduzierter Spannungen bis in das Hutgestein (Anlagen 6.35 und 6.36).

Im Bereich oberhalb und in geringerem Umfang auch unterhalb der flach ausgebildeten Kammern der Sohle -231 m NN treten Zugspannungen kleiner 0,5 MPa auf. Ferner werden geringe Zugspannungen in den Stößen des Hochabbaues im Lagerteil E, im Nahbereich der Abbaue im Lagerteil I und lokal begrenzt auch in einzelnen Hauptanhydritschollen ermittelt. Im Bereich unterhalb des Hauptanhydrits und zwischen dessen Schollen zeichnet sich dessen tragende Funktion durch leicht erhöhte Werte für S_1 ab.

Größte Hauptdruckspannungen S_2

Die größte Hauptdruckspannung steigt von Werten unter 2 MPa im unmittelbaren Bereich der Hohlräume bis auf ca. 8 MPa am Salzspiegel (Anlagen 6.37 und 6.38). Im unteren Bereich des Hauptanhydrits treten infolge dessen Steifigkeit und der damit verbundenen Tragwirkung erhöhte Spannungswerte auf. In Sohle und Firste des Hochabbaues im Lager-

teil E sowie zwischen den Kammern 23 und 24 treten Spannungswerte von ca. 16 - 18 MPa auf.

Effektivspannungen

In den Salzsichten treten im Bereich der Hohlräume, in der Hauptmulde auch weiträumig in den Schichten der Leine-Folge Effektivspannungen von 3 - 6 MPa auf (Anlagen 6.39 und 6.40). Lokal, insbesondere in den Pfeilern zwischen den Kammern 23 und 24 sowie am Hochabbau des Lagerteils E werden Werte bis ca. 7 MPa berechnet. Im Hauptanhydrit sind aufgrund seiner Steifigkeit Spannungskonzentrationen zu verzeichnen, die lokal insbesondere an Schichtübergängen oder bei Richtungswechsel der Konturlinie Werte bis ca. 11 MPa aufweisen. Im besonders kriechfähigen Kalisalz des Lagerteils I bleiben die Effektivspannungen unter 3 MPa. Lediglich im Pfeiler zwischen den Doppelabbauen treten Werte bis ca. 6 MPa auf.

Effektivverzerrungen

Auf der Sohle -231 m NN treten nach 130 Jahren an den Stößen der Kammern i. allg. Verzerrungen unter 3,5 % auf (Anlagen 6.41 und 6.42). Für den Hochabbau im Lagerteil E werden an der Firste und Sohle im Carnallit Verzerrungen von über 10 % (an den Hohlraumecken) errechnet. Ähnlich hohe Verzerrungen werden lokal im schmalen Hartsalzband zwischen den engstehenden Abbauen im Lagerteil F erreicht. Die ungünstige Form des Pfeilers zwischen den beiden Abbauen im Lagerteil I führt zu Effektivverzerrungen von über 20 % in dessen oberem Bereich.

Dilatante Bereiche

Die als dilatant ausgewiesenen Bereiche um die Hohlräume sind für den Zeitpunkt 80 Jahre nach Auffahrung in Anlage 6.43 und für den Zeitpunkt 130 Jahre in Anlage 6.44 dargestellt. Ihre räumliche Erstreckung bleibt auf die Umgebung der Hohlräume begrenzt. Nur in wenigen Fällen zeigen sich zwischen den Abbauen bzw. Strecken durchgängig dilatante Bereiche. Zwischen 80 und 130 Jahren tritt über dem Doppelabbau in Lager I keine signifikante Ausweitung der Dilatanz auf. Eine potenzielle hydraulische Anbindung bestehender Hohlräume über dilatante Bereiche an den Hauptanhydrit ist nur für die beiden Begleitstrecken der Sohle -315 m NN und -332 m NN im Lagerteil F sowie für Kammern und Strecken im Lagerteil I an einzelne Anhydritschollen gegeben.

Hypothetisch laugendruckgefährdete Bereiche

Die für 80 Jahre berechneten, hypothetisch laugendruckgefährdeten Bereiche sind in Anlage 6.48 dargestellt. Anlage 6.49 zeigt die für 130 Jahre berechneten Ergebnisse. Zwangsläufig treten in der Umgebung aller Hohlräume Bereiche auf, in denen das Laugendruckkriterium nicht erfüllt ist. Diese Bereiche erstrecken sich je nach Hohlraumgröße und -konfiguration mehrere Zehnermeter in das umgebende Gebirge. Für die Kammern der Sohle -231 m NN und den Hochabbau im Lagerteil E ergeben sich hypothetisch laugendruckgefährdete Bereiche, die nicht bis an den Hauptanhydrit heranreichen. Die entsprechenden Bereiche um die östlichen Großabbau im Lagerteil I reichen relativ weit in das Gebirge hinein, berühren aber vorwiegend nur vereinzelte Hauptanhydritschollen und erreichen nur an einer schmalen Stelle auch den westlichen Hauptanhydrit, der in Schollen zerlegt ist, die bis an den Salzspiegel reichen.

6.3.2 Modellvarianten GMBF-S2-B, GMBF-S2-C und GMBF-S2-D

Die in den drei Modellvarianten erzielten Ergebnisse weisen keine gravierenden Unterschiede zum Referenzmodell auf. Außerdem zeigen sich nur geringe Abweichungen zwischen den für 80 Jahre (Ist-Zustand) und für 130 Jahre berechneten Ergebnissen. Die für 130 Jahre ermittelte Beanspruchung der Salzbarriere gilt konservativ auch für den gegenwärtigen Zustand.

Dilatante Bereiche

Die räumliche Erstreckung der dilatanten Bereiche ist bei allen drei Modellvarianten sehr ähnlich (Anlagen 6.45 bis 6.47). Es ergeben sich im Vergleich zum Referenzmodell keine signifikant anderen Ergebnisse.

Hypothetisch laugendruckgefährdete Bereiche

Die räumliche Erstreckung der hypothetisch laugendruckgefährdeten Bereiche ist bei allen drei Modellvarianten sehr ähnlich (Anlagen 6.50 bis 6.52). Es ergeben sich im Vergleich zum Referenzmodell keine signifikant anderen Ergebnisse.

7 Beurteilung der Integrität der Salzstockbarriere in der Schachanlage Marie

7.1 Bewertungskriterien

Im unverritzten Zustand ist Steinsalz mit Ausnahme möglicher isolierter Lösungseinschlüsse trocken und dicht. Zur Bewertung der Barriereigenschaften der Salzsichten unter Einwirkung des Bergbaues werden deshalb die Prozesse untersucht, die mechanisch zur 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, z.B. an dem als primär nicht vorgeschädigt angenommenen Salzspiegel, 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 Dichtheit des Salzgesteins gewährleistet ist. Erst Spannungszustände oberhalb der Dilatanzgrenze führen zu einer Auflockerung des Mikrogefüges, wodurch bei Andauern des Zustandes allmählich ein Netzwerk von Mikrorissen entsteht.
- **Laugendruckkriterium:** Die Integrität ist gewährleistet, wenn die kleinste Hauptdruckspannung S_1 nicht unter den Wert des angenommenen hydrostatischen 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 $\rho = 1,1 \text{ g/cm}^3$ ausgegangen.

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

7.2 Bewertung der Ergebnisse der Modellberechnungen

7.2.1 Bewertung der Integrität im Bereich „Lager H“

Aus den Ergebnissen der geomechanischen Modellberechnungen lassen sich folgende Aussagen zur Integrität der Salzschieben im Bereich „Lager H“ ableiten:

- Die rechnerisch ermittelten, hypothetisch laugendruckgefährdeten Zonen bleiben für die Hohlräume im Bereich des Westsattels und des Randsattels I auf die Umgebung der Hohlräume beschränkt. Für die Hohlräume in der Hauptmulde ergibt sich eine Zone mit größerer Erstreckung, die gegenwärtig lokal bis auf einige Meter an die Salzspiegelsenke über der Hauptmulde reicht und im Sonderfall (bei ungünstiger Annahme einer hohen Duktilität aller Salzschieben) diese Senke sogar erreicht.
- Für den Nahbereich von Abbauen, Kammern und Strecken werden aufgrund höherer mechanischer Beanspruchung dilatante Auflockerungszonen berechnet. Sie reichen im allgemeinen nur wenige Meter, maximal bis ca. 10 m in das Salzgebirge hinein.
- Für den am stärksten beanspruchten Bereich in der Hauptmulde verbleibt zwischen der Salzspiegelsenke und der konturnahen Auflockerungszone des obersten Kaliabbaus im Lagerteil H eine ca. 25 m mächtige Salzbarriere, für die das Dilatanzkriterium erfüllt ist.

Die Ergebnisse der Modellberechnungen zeigen, dass bei Annahme eines kluffreien Salzgebirges oberhalb der Abbaue im Lagerteil H eine ausreichend mächtige intakte und damit hydraulisch dichte Salzbarriere besteht. Die im Lagerteil H auf der Sohle -318 m NN angelegten Klüfte sind im Berechnungsmodell nicht berücksichtigt. Ihre räumliche Orientierung (steil stehend, quer zur Lager- bzw. Abbauachse streichend, d. h. annähernd parallel zur Modellebene verlaufende Klufflächen) lässt den Schluss zu, dass sie einen geogenen Ursprung haben und nicht abbaubedingt sind. Im Falle abbaubedingter Trennflächen wäre zu erwarten, dass diese senkrecht zur Modellebene (z. B. in Form von parallel zur Hohlraumkontur verlaufenden Abschalungen) orientiert sind.

Die mit diesen Klüften verbundenen Beeinträchtigungen der Barrierenintegrität und die dort lokal beobachteten Lösungszutritte (BfS 1999) können nicht auf eine abbaubedingte Überbeanspruchung und eine dadurch ggf. zusätzlich hervorgerufene Beeinträchtigung des Isolationsvermögens der Salzbarriere bis zum Salzspiegel hin zurückgeführt werden. Aus den in den Modellberechnungen ermittelten abbaubedingten Spannungsumlagerungen und Gebirgsverformungen lässt sich ableiten, dass eine Öffnung der bestehenden Klüfte und eine dadurch verursachte Erhöhung bestehender Wegsamkeiten oder eine Ausbildung neuer Wegsamkeiten aus geomechanischer Sicht nicht zu erwarten ist.

7.2.2 Bewertung der Integrität des Zentralbereichs

Aus den Ergebnissen der geomechanischen Berechnungen lassen sich folgende Aussagen zur Integrität der Salzbarriere im Zentralbereich Marie ableiten:

- Das Laugendruckkriterium wird in der Hauptmulde fast durchweg nicht erfüllt. Die Berechnungsergebnisse zeigen, dass die hypothetisch laugendruckgefährdeten Gebirgsbereiche vom Salzspiegel bis hin zu den Abbauen der Sohle auf dem Niveau von -332 m NN reichen, und zwar für alle untersuchten Modellvarianten.
- Die Modellberechnungen zeigen eine lokal begrenzte Dilatanzzone im Bereich des Salzspiegels oberhalb von Kalilager F. Ferner tritt eine sehr kleine Dilatanzzone am Übergang von der obersten Hauptanhydrit-Scholle zur nächsten Scholle auf, die ihrerseits mit dem Kaliabbau im Lagerteil F in Verbindung steht. Da die Verhältnisse am Übergang zwischen den Schollen nicht genau bekannt sind und auch die Zerblockung des Hauptanhydrits mit ihrer Repräsentation in einem zweidimensionalen Modell nicht eindeutig nachgewiesen ist, sind an dieser Stelle Wegsamkeiten vom Salzspiegel über die beiden Hauptanhydritschollen in den Kaliabbau im Lagerteil F nicht mit Sicherheit auszuschließen, da dieser Abbau unmittelbar an den Hauptanhydrit grenzt. Dies gilt prinzipiell auch für den Kaliabbau im Lagerteil M, der ebenfalls an eine Hauptanhydrit-Scholle grenzt, die direkt bis zum Salzspiegel reicht.

Für alle übrigen Abbaue, insbesondere im Bereich des Hauptsattels, kann eine Gefährdung durch Wegsamkeiten nach Maßgabe des Referenzmodells GMZB-S2-A ausgeschlossen werden. Die Dilatanzzone am Salzspiegel, die im Bereich der Hauptmulde als Ergebnis der Modellvariante GMZB-S2-B entsteht, liegt im Homogenbereich Z3AM, der hauptsächlich aus kriechfähigem Anhydrit-Mittelsalz besteht, so dass Wegsamkeiten aufgrund von Klüften auszuschließen sind. Dass dieser Homogenbereich nach den Berechnungsergebnissen potentiell laugendruckgefährdet ist, spielt für die Integrität keine Rolle, da der räumlich sehr begrenzte Dilatanzbereich am Salzspiegel der Hauptmulde nicht mit dem Dilatanzbereich um die Abbaue der Hauptmulde in Verbindung steht. Eine Gefährdung auf der Basis des Dilatanzkriteriums liegt somit nicht vor.

Im gesamten Zentralbereich der Schachanlage Marie sind bis zum heutigen Zeitpunkt keine Lösungszutritte beobachtet worden (BfS 1999).

7.2.3 Bewertung der Integrität im Bereich „Bunte First“

Aus den geomechanischen Modellberechnungen lassen sich folgende Aussagen zur Integrität der Salzsichten im Bereich des geologischen Profils 7.1 ableiten:

- Für die in der Südmulde gelegenen Kammern und Lagerteil E, für die tiefer liegenden Abbaue im Lagerteil F und für die Abbaue im Lagerteil I ergeben sich großräumige Gebirgsbereiche, in denen das Laugendruckkriterium nicht erfüllt ist. Diese Bereiche erstrecken sich zum Teil bis an benachbarte Hauptanhydritschollen, die jedoch nicht unmittelbar Kontakt mit dem Salzspiegel aufweisen. Die hypothetisch laugendruckgefährdeten Zonen reichen in keinem untersuchten Fall bis an den Salzspiegel; es verbleibt über allen Hohlräumen im Bereich des Profils 7.1 eine mehrere Zehnermeter mächtige Salzbarriere, für die das Laugendruckkriterium erfüllt ist.
- Dilatante Gebirgsbereiche ergeben sich in allen untersuchten Modellvarianten im Nahbereich aller Abbaue und Kammern. Vereinzelt erstrecken sich diese Bereiche lokal bis an benachbarte Hauptanhydritschollen, die jedoch keinen unmittelbaren Kontakt zum Salzspiegel haben. Über allen Hohlräumen im Bereich des Profils 7.1 verbleibt eine mehrere Zehnermeter mächtige Salzbarriere, für die das Dilatanzkriterium erfüllt ist.
- Unabhängig von berechneten dilatanten und hypothetisch laugendruckgefährdeten Zonen weisen die Abbaue im Lagerteil F eine direkte hydraulische Anbindung zum östlich angrenzenden Hauptanhydrit auf. Aufgrund der deutlichen Zerlegung des Hauptanhydrits in einzelne voneinander getrennte Schollen ist jedoch ein Lösungszutritt in dieser Teufe als sehr unwahrscheinlich zu bewerten. Bisher sind dort trotz einer ca. 80-jährigen Standzeit keine Lösungszutritte zu verzeichnen.
- Einer der beiden Doppelabbaue im Lagerteil I hat direkten Kontakt zu einer isolierten Hauptanhydritscholle. Weitere tiefergelegene Hohlräume sind aufgrund erhöhter mechanischer Beanspruchung über schmale dilatante Bereiche mit einer weiteren Hauptanhydritscholle verbunden. In diesem Bereich wird auch das Laugendruckkriterium nicht eingehalten. Aufgrund der starken Zerlegung des Hauptanhydrits in viele einzelne Schollen ist zu unterstellen, dass auf diesem Wege keine hydraulische Verbindung bis zum Deckgebirge gegeben ist.

Die Ergebnisse der geomechanischen Modellberechnungen zeigen, dass die Mächtigkeit der intakten Salzbarriere oberhalb der Abbaue im Bereich des geologischen Profils 7.1 ausreichend ist und geomechanisch bedingte direkte Lösungszutritte aus dem Salzspiegelbereich über die Salzbarriere auszuschließen sind. Aufgrund des unmittelbaren Kontakts der Abbaue im Lagerteil F zum Hauptanhydrit kann ein Lösungszutritt über den Anhydrit zwar

nicht mit Sicherheit ausgeschlossen werden. Jedoch ist aufgrund der Zerlegung des Hauptanhydrits in einzelne, voneinander getrennte Schollen eine hydraulische Verbindung zum Salzspiegel sehr unwahrscheinlich. Die weiter östlich gelegenen Großabbaue im Lagerteil I stellen aus geomechanischer Sicht keine Gefährdung bzgl. der Integrität dar.

Aufgrund der geologischen Besonderheit und der damit verbundenen komplexen bergbaulichen Situation im Bereich des Profils 9 ("Bunte First") wurde auf eine Modellierung dieses Bereichs verzichtet. Die im Bereich „Bunte First“ vorliegende Situation wird daher nachfolgend auf der Grundlage geomechanischer Erfahrungen ausschließlich qualitativ beurteilt.

Die "Bunte First" ist ein komplexes Hohlraumssystem, das in mit Carnallit gefüllten Klüften zwischen Hauptanhydritschollen erstellt wurde und direkt an diese Schollen grenzt. Daher liegt unabhängig von berechneten dilatanten und hypothetisch laugendruckgefährdeten Zonen eine hydraulische Verbindung zwischen den Hauptanhydritschollen und dem Hohlraumssystem vor. Auswirkungen der Auffahrung auf das umgebende Gebirge außerhalb der unmittelbar anliegenden Hauptanhydritschollen sind nicht zu erwarten, Auflockerungszonen können sich nur unmittelbar am Hohlraum im verbliebenen Carnallit entwickeln. Die Hauptanhydritschollen haben keinen Kontakt zum Salzspiegel.

Die Abbaue in den Lagerteilen E und F befinden sich direkt unterhalb mächtiger Hauptanhydritschollen, die nicht bis zum Salzspiegel reichen. Da die Schollen mechanisch eine stark abschirmende Funktion zum Salzspiegel hin haben, ist zu erwarten, dass die Ausbildung dilatanter Zonen auf die Umgebung der Abbaue begrenzt ist und sich nicht bis an den Salzspiegel erstreckt. Auch aus der Auffahrung der tieferliegenden Hohlräume ist keine bis zum Salzspiegel reichende dilatante Auflockerung zu erwarten.

Entscheidend ist hier für alle Hohlräume die hydraulische Bewertung der vorliegenden Hauptanhydritschollen. Ihre starke Zerblockung vertikal wie lateral macht eine durchgängige Wegsamkeit zum Deckgebirge sehr unwahrscheinlich (KÄBEL 1998). Darüber hinaus ergaben elektromagnetische Reflexionsmessungen oberhalb der Abbaue im geologischen Profil 9 signifikante Reflexionen am Salzspiegel, die bei Vorhandensein von Lösungen in diesem Bereich nicht sichtbar gewesen wären.

8 Zusammenfassung und Schlussbetrachtung

Im Zuge des Erkundungs- und Beweissicherungsprogramms für das Endlager für radioaktive Abfälle (ERA) Morsleben ist die Integrität der Salzbarriere im Bereich der Schachtanlage Marie auf der Grundlage geomechanischer Modellberechnungen zu analysieren. Für die von der BGR durchgeführten Untersuchungen wurden drei repräsentative Teilbereiche der Schachtanlage Marie (Lager H, Zentralbereich Marie und Bunte First) ausgewählt.

Der Beurteilung der Integrität der Salzbarriere liegt die Annahme zugrunde, dass Salzgestein im unverritzten Zustand hydraulisch dicht ist (Permeabilität $k \ll 10^{-20} \text{ m}^2$). Danach kann eine Auflockerung des Salzgesteins erst infolge geomechanischer Beanspruchung des Gebirges, z. B. aufgrund von Abbautätigkeit, auftreten und sich infolgedessen ein durchlässiger Bereich ausbilden. Die Integrität der Salzbarriere ist nicht beeinträchtigt, wenn die Modellberechnungen eine ausreichend mächtige Zone mit mechanisch intaktem Salzgestein zwischen dem primär als nicht vorgeschädigt angenommenen Salzspiegel und den Abbauen ausweisen.

Für die Bewertung der Integrität der Salzbarriere werden das Dilatanz- und das 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.

Lager H

Aus den geomechanischen Modellberechnungen lassen sich folgende Aussagen zur Integrität und Funktionstauglichkeit der Salzbarriere über dem Lager H ableiten:

- Die Ergebnisse der Referenzberechnung weisen aus, dass abbaubedingte dilatante Auflockerungszonen auf den Nahbereich der Hohlräume beschränkt bleiben und auch die hypothetisch laugendruckgefährdeten Zonen gegenwärtig nicht bis an den Salzspiegel reichen. Es verbleibt zwischen dem potentiell laugeführenden Salzspiegel und den Hohlräumen eine ausreichend mächtige intakte Salzbarriere.
- Die Ergebnisse der Modellvariante mit sehr ungünstig angenommener erhöhter Duktilität aller Salzschichten zeigen, dass für den gegenwärtigen Zeitpunkt die hypothetisch laugendruckgefährdete Zone in der Hauptmulde lokal bis an die konservativ berücksichtigte Salzspiegelsenke reicht. Die dilatanten Auflockerungsbereiche bleiben auch hier auf den Nahbereich der Hohlräume beschränkt und reichen nicht bis an den Salzspiegel heran.

Die Ergebnisse der Modellberechnungen zeigen, dass bei Annahme eines kluffreien Salzgebirges aus geomechanischer Sicht oberhalb der Abbaue im Lagerteil H eine ausreichend mächtige intakte und damit hydraulisch dichte Salzbarriere besteht. Tatsächlich sind jedoch Lösungszutritte im Lagerteil H zu verzeichnen, die offensichtlich aus dem Hutgestein über die quer zur geologischen Struktur streichenden Klüfte erfolgen. Die Salzbarriere über dem Lagerteil H kann somit entgegen den obigen Modellannahmen nicht als dicht bewertet werden. Die Klüfte und die damit verbundenen Lösungszutritte sind nicht abbaubedingt, sondern haben offensichtlich einen geogenen Ursprung. Aus den in den Modellberechnungen ermittelten Spannungszuständen lässt sich ableiten, dass eine Öffnung dieser Klüfte und eine dadurch verursachte Erhöhung bestehender Wegsamkeiten aus geomechanischer Sicht nicht zu erwarten ist.

Zentralbereich

Aus den Ergebnissen der geomechanischen Berechnungen lassen sich folgende Aussagen zur Integrität der Salzbarriere im Zentralbereich Marie ableiten:

- Die mit dem Referenzmodell durchgeführten Berechnungen weisen einerseits großräumige hypothetisch laugendruckgefährdete Gebirgsbereiche aus, die sich bis zum Salzspiegel erstrecken. Andererseits sind die rechnerisch ermittelten dilatanten Auflockerungszonen auf den Nahbereich der Abbaue und Kammern beschränkt, mit Ausnahme einer lokal begrenzten Dilatanzzone im Bereich des Salzspiegels oberhalb von Kalilager F. Die Abbaue und Kammern sind damit nicht durch Lösungszutritte aus dem Salzspiegelbereich über die Salzbarriere gefährdet.
- Für die Kaliabbaue in den Lagerteilen F und M ist ein Lösungszutritt nicht mit Sicherheit auszuschließen, da diese Abbaue unmittelbar an bereichsweise klüftige Hauptanhydritschollen grenzen, die direkt oder indirekt über eine weitere Scholle Wegsamkeiten zum Salzspiegel aufweisen können. Da die Zerlegung des Hauptanhydrits in einzelne Schollen im Einzelnen nicht eindeutig nachgewiesen ist, sind Wegsamkeiten vom Salzspiegel über die beiden Hauptanhydritschollen in die genannten Kaliabbaue nicht mit Sicherheit auszuschließen.

Die Ergebnisse der Modellberechnungen zeigen, dass aus geomechanischer Sicht oberhalb der Abbaue im Zentralbereich Marie eine ausreichend mächtige intakte und damit hydraulisch dichte Salzbarriere besteht. Bis zum gegenwärtigen Zeitpunkt sind in diesem Grubenbereich keine Lösungszutritte zu verzeichnen.

Bunte First

Aus den geomechanischen Modellberechnungen zum Modellschnitt GMBF-S1 lassen sich folgende Aussagen zur Integrität und Funktionstauglichkeit der Salzsichten im Bereich des geologischen Profils 7.1 ableiten:

- Die Berechnungsergebnisse weisen großräumige Gebirgsbereiche um die Abbaue und Kammern aus, für die das Laugendruckkriterium nicht erfüllt ist. Diese Bereiche erstrecken sich zum Teil bis an benachbarte Hauptanhydritschollen, die jedoch nicht unmittelbar Kontakt mit dem Salzspiegel aufweisen. Die hypothetisch laugendruckgefährdeten Zonen reichen in keinem untersuchten Fall bis an den Salzspiegel; es verbleibt über allen Hohlräumen eine mehrere Zehnermeter mächtige Salzbarriere, für die das Laugendruckkriterium erfüllt ist.
- Dilatante Gebirgsbereiche ergeben sich in allen untersuchten Modellvarianten im Nahbereich aller Abbaue und Kammern. Vereinzelt erstrecken sich diese Bereiche lokal bis an benachbarte Hauptanhydritschollen, die jedoch keinen unmittelbaren Kontakt zum Salzspiegel haben. Über allen Hohlräumen verbleibt eine mehrere Zehnermeter mächtige Salzbarriere, für die das Dilatanzkriterium erfüllt ist.
- Unabhängig von berechneten dilatanten und hypothetisch laugendruckgefährdeten Zonen weisen die Abbaue im Lagerteil F eine direkte hydraulische Verbindung zum östlich direkt angrenzenden Hauptanhydrit auf. Aufgrund der deutlichen Zerlegung des Hauptanhydrits in einzelne voneinander getrennte Schollen ist jedoch ein Lösungszutritt in dieser Teufe als sehr unwahrscheinlich zu bewerten. Bisher sind dort trotz einer ca. 80-jährigen Standzeit keine Lösungszutritte zu verzeichnen.

Wegen der komplexen geologischen Struktur und Abbausituation im Bereich des geologischen Profils 9, das den Bereich der "Bunten First" direkt schneidet, wurde auf eine zweidimensionale Modellierung aufgrund unzureichender Aussagekraft verzichtet. Dennoch zeigt eine qualitative Bewertung der vorliegenden geologischen Situation, dass wegen der massiven Überlagerung der Abbaue und Strecken durch den darüber liegenden Hauptanhydrit eine starke mechanische Abschirmung zum Deckgebirge hin zu erwarten ist. Da der in Schollen zerlegte Hauptanhydrit in diesem Bereich keinen direkten Kontakt mit dem potentiell laugeführenden Salzspiegel hat, ist eine geomechanisch bedingte Wegsamkeit auch ohne quantitativen Nachweis durch numerische Berechnungen nicht zu erwarten.

Die Ergebnisse der Modellberechnungen zeigen, dass die Mächtigkeit der aus geomechanischer Sicht intakten Salzbarriere oberhalb der Abbaue im Bereich des geologischen Profils 7.1 ausreichend ist und geomechanisch bedingte, durch Abbaueinwirkung hervorgerufene Lösungszutritte aus dem Salzspiegelbereich über die Salzbarriere im betrachteten

Zeitraum auszuschließen sind. Die in der „Bunten First“ beobachteten Lösungszutritte sind daher nicht auf eine im Bereich des untersuchten geologischen Schnittes abbaubedingte Überbeanspruchung und einen dadurch ggf. hervorgerufenen Verlust des Isolationsvermögens der Salzbarriere zurückzuführen. Die Lösungszutritte sind entweder anthropogenen Ursprungs (Wetterführung, Versatzfeuchte) oder stammen aus einem begrenzten Lösungsreservoir im Hauptanhydrit (KÄBEL 1998). Sie stammen nicht aus dem Deckgebirge. Auch die qualitative Bewertung des geologischen Profils 9, das die Hohlräume der „Bunten First“ direkt schneidet, gibt keinen Anhaltspunkt für einen geomechanisch bedingten Lösungszutritt.

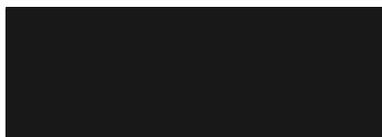
**BUNDESANSTALT FÜR GEOWISSENSCHAFTEN UND ROHSTOFFE
HANNOVER**

Im Auftrage:

Autoren:



(Dr. H. Raschka)
- Dir. u. Prof. -
- Abteilungsleiter B2 -



(Dr.-Ing. M. Wallner)
- Dir. u. Prof. -
- Projektleiter Endlagerung -



(Dr.-Ing. S. Heusermann)
- Wiss. Direktor -
- Autor & Arbeitspaketleiter -



(Dr.-Ing. habil. I. Göbel)
- Wiss. Angestellte -
- Autorin -



(Dr.-Ing. U. Heemann)
- Wiss. Angestellter -
- Autor -

Literatur- und Unterlagenverzeichnis

- BEHLAU, J., MINGERZAHN, G. & BORNEMANN, O. (1997): ERA Morsleben - Erarbeitung eines geologischen Lagerstättenmodells Morsleben. Abschlussbericht zum Arbeitspaket 9M 21246011, Archiv-Nr. 116872, BGR, Hannover.
- 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 Marie (Stand Dez. 1997).
- CRISTESCU, N. & HUNSCHE, U. (1998): Time Effects in Rock Mechanics. John Wiley & Sons, Chichester.
- DBE (1998): Hohlräumangaben Endlager Morsleben. Stand: 31.12.98, DBE-Dokument-Kennzeichen 9M/21232121/GB/BZ/0003/03, Peine.
- HERRMANN, A.G. (2001): Endlager für radioaktive Abfälle Morsleben (ERAM) - Lösungsvorkommen in den Gruben Marie und Bartensleben: Stoffbestand, Herkunft, Entstehung. Bericht für den Zeitabschnitt 01.01. – 31.12.2000. Göttingen.
- HEUSERMANN, St. & NIPP, H.-K. (2000): ERA Morsleben – Gebirgsmechanische Beurteilung der Integrität der Salzbarriere in der Schachtanlage Bartensleben. Abschlussbericht zum Arbeitspaket 9M 23241011, Archiv-Nr. 0120259, BGR, Hannover.
- HUNSCHE, U., PLISCHKE, I. & SCHULZE, O. (1998): ERA Morsleben – Gebirgsmechanische und geotechnische Untersuchungen im Labor und in situ: Ingenieurgeologische Erkundung von Homogenbereichen. Abschlussbericht zum Arbeitspaket 9M 21310015, Archiv-Nr. 117213, BGR, Hannover.
- KÄBEL, H. (1998): Geologische Gesamtbewertung der Lösungszutritte in den Gruben Bartensleben und Marie. Bericht zum Arbeitspaket 9M 21245011, Archiv-Nr. 116678, BGR, Hannover.
- NIPP, H.-K. (1991): Testbericht und Freigabemitteilung für das Programmsystem ANSALT I (Release 1991-1). Bericht, Archiv-Nr. 108586, BGR, Hannover.
- NIPP, H.-K., MÜLLER, D. & STECHER, Th. (1994): Interaktives Dialogsystem INCA. Abschlussbericht zum Arbeitspaket 9G 21323000, Archiv-Nr. 112696, BGR, Hannover.

STORK, G. H. (1998): ERA Morsleben - Geologische Standortbeschreibung. (Unter Mitarbeit von ALBRECHT, H., BALZER, D., BEHLAU, J., BEST, G., BURCHARDT, I., FENNER, J. M., GERARDI, J., GERLING, P., GRISSEMANN, C., HEDERICH, N., JUNG, R., KÄBEL, H., LANGKUTSCH, U., LEYDECKER, G., LOTSCH, D., MARGANE, A., RÖTTGER, B., SCHILDKNECHT, F., SCHNIER, H., SCHWAMM, G., SONNTAG, C., STIER-FRIEDLAND, G., STRAHL, J., THIERBACH, R., VOGEL, P., WEBER, J. R., ZIERMANN, H., ZIRNGAST, M. & ZWIRNER, R.), Abschlussbericht zum Arbeitspaket 9M 2124102100, Archiv-Nr. 116747, BGR, Hannover.

ERA
Morsleben

Abkürzungsverzeichnis

allgemein:

BfS:	Bundesamt für Strahlenschutz
BGR:	Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe
DBE:	Deutsche Gesellschaft zum Bau und Betrieb von Endlagern für Abfallstoffe mbH
ERA:	Endlager für radioaktive Abfälle
FE:	Finite Elemente
GMBF:	Grube Marie, Bunte First
GMLH:	Grube Marie, Lager H
GMZB:	Grube Marie, Zentralbereich
GOK:	Geländeoberkante
N:	Nord
E:	Ost
S:	Süd
W:	West
2D:	zweidimensional

physikalische Größen:

A_{cr}	Strukturfaktor, 1/d
A_0	Referenzwert des Strukturfaktors, $A_0 = 0,18$ 1/d
A^*	relative Kriechfähigkeit (Bruchteil des Strukturfaktors)
E	Elastizitätsmodul, MPa
F	Fließgrenze
$\langle F \rangle$	Schalter in der Fließregel
J_1	1. Invariante des Spannungstensors, MPa
J_2^D	2. Invariante des Spannungsdeviators, $(MPa)^2$
k	Parameter für Fließkriterium; fiktive Kohäsion
n	Spannungsexponent
Q	Aktivierungsenergie, $Q = 54,0$ kJ/mol
\tilde{Q}	Spannungspotential, MPa
R	universelle Gaskonstante, $R = 8,3143 \cdot 10^{-3}$ kJ/mol/K
S_1	max. Hauptspannung, betragsmäßig min. Hauptdruckspannung (Zug ist positiv)
S_2	min. Hauptspannung, betragsmäßig max. Hauptdruckspannung (Zug ist positiv)
T	Temperatur, K

α	Parameter für Fließkriterium; fiktiver Reibungswinkel
δ_{ij}	Kroneckersymbol
$\dot{\varepsilon}_{\text{eff}}^{\text{cr}}$	effektive stationäre Kriechgeschwindigkeit, 1/d
$\dot{\varepsilon}_{ij}^{\text{el}}$	elastische Verzerrungsrate, 1/d
$\dot{\varepsilon}_{ij}^{\text{cr}}$	stationäre Kriechrate, 1/d
$\dot{\varepsilon}_{ij}^{\text{vp}}$	viskoplastische Verzerrungsrate, 1/d
η	Viskosität, MPa·d
ν	Querdehnungszahl, -
ρ	Dichte, g/cm ³
σ_{ij}	Komponenten des Spannungstensors, MPa
σ_{kk}	Spur des Spannungstensors, MPa
σ_{eff}	Effektivspannung, MPa
σ^*	Normierungsspannung, $\sigma^* = 1,0$ MPa

Tabellenverzeichnis

Tabelle 4.1: Elastische Kennwerte der geologischen Schichten

Tabelle 4.2: Relative Kriechfähigkeit A^* der duktilen Salzschiechten („Lager H“)

Tabelle 4.3: Relative Kriechfähigkeit A^* der duktilen Salzschiechten (Zentralbereich)

Tabelle 4.4: Relative Kriechfähigkeit A^* der duktilen Salzschiechten („Bunte First“)

Tabelle 5.1: In den Modellvarianten GMLH-S1 gewählte Parameter für A^*

Tabelle 5.2: In den Modellvarianten GMZB-S2 gewählte Parameter für A^* und E

Tabelle 5.3: In den Modellvarianten GMBF-S1 gewählte Parameter für A^* und E

Anlagenverzeichnis

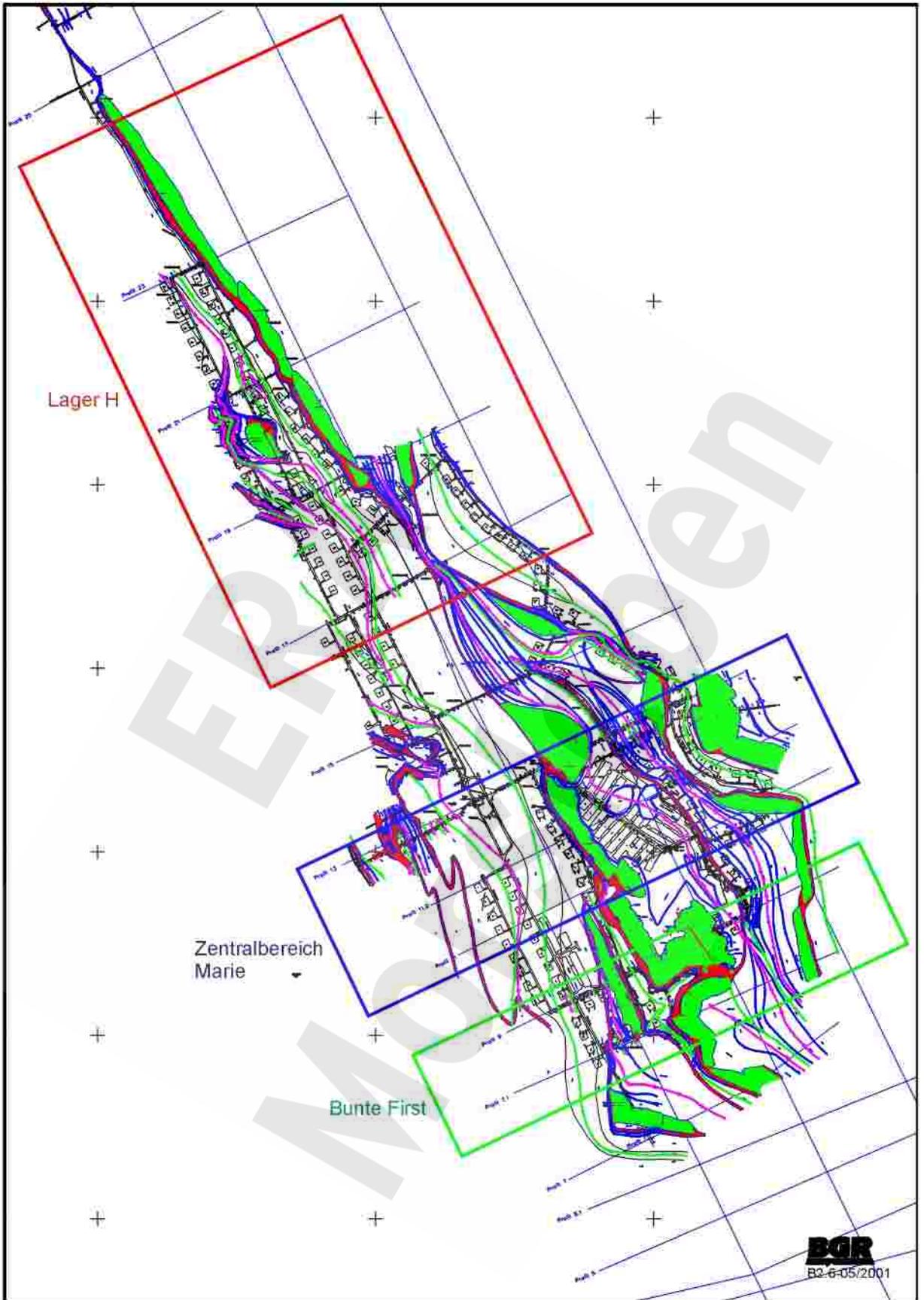
(Die Anlagen sind kapitelweise numeriert. Die erste Ziffer bezieht sich auf das betreffende Hauptkapitel. Danach folgt, durch einen Punkt getrennt, die fortlaufende Nummer der Anlagen in dem jeweiligen Hauptkapitel.)

- Anlage 3.1: ERA Morsleben, Schachtanlage Marie - Geologischer Sohlenriss -231 m NN (BEHLAU, MINGERZAHN & BORNEMANN 1997)
- Anlage 3.2: Lager H - Geologischer Sohlenriss -231 m NN (BEHLAU, MINGERZAHN & BORNEMANN 1997)
- Anlage 3.3: Lager H - Geologisches Profil 17 (BEHLAU, MINGERZAHN & BORNEMANN 1997)
- Anlage 3.4: Lager H - Geologisches Profil 19 (BEHLAU, MINGERZAHN & BORNEMANN 1997)
- Anlage 3.5: Lager H - Tiefenlinien des Salzspiegels (BEHLAU, MINGERZAHN & BORNEMANN 1997)
- Anlage 3.6: Zentralbereich Marie - Sohlenriss der Sohle -231 m NN (BEHLAU, MINGERZAHN & BORNEMANN 1997)
- Anlage 3.7: Zentralbereich Marie - Geologisches Profil 11 (BEHLAU, MINGERZAHN & BORNEMANN 1997)
- Anlage 3.8: Zentralbereich Marie - Geologisches Profil 11.2 (BEHLAU, MINGERZAHN & BORNEMANN 1997)
- Anlage 3.9: Zentralbereich Marie - Ausschnitt aus der Strukturkarte am Salzspiegel (BEHLAU, MINGERZAHN & BORNEMANN 1997)
- Anlage 3.10: Bunte First - Geologischer Sohlenriss -231 m NN (BEHLAU, MINGERZAHN & BORNEMANN 1997)
- Anlage 3.11: Bunte First - Geologisches Profil 7.1 (BEHLAU, MINGERZAHN & BORNEMANN 1997)
- Anlage 3.12: Bunte First - Geologisches Profil 9 (BEHLAU, MINGERZAHN & BORNEMANN 1997)
- Anlage 4.1: Lager H - Gewählte Homogenbereiche im Modellschnitt GMLH-S1
- Anlage 4.2: Zentralbereich - Gewählte Homogenbereiche im Modellschnitt GMZB-S2
- Anlage 4.3: Bunte First - Gewählte Homogenbereiche im Modellschnitt GMBF-S1
- Anlage 4.4: Lager H - Modellierter Abbaue, Kammern und Strecken (Gesamtdarstellung)
- Anlage 4.5: Lager H - Modellierter Abbaue, Kammern und Strecken (Ausschnitt 1)
- Anlage 4.6: Lager H - Modellierter Abbaue, Kammern und Strecken (Ausschnitt 2)
- Anlage 4.7: Lager H - Modellierter Abbaue, Kammern und Strecken (Ausschnitt 3)
- Anlage 4.8: Zentralbereich - Modellierter Abbaue, Kammern und Strecken (Gesamtdarstellung)
- Anlage 4.9: Zentralbereich - Modellierter Abbaue, Kammern und Strecken (Ausschnitt 1)

- Anlage 4.10: Zentralbereich - Modellierte Abbaue, Kammern und Strecken (Ausschnitt 2)
- Anlage 4.11: Zentralbereich - Modellierte Abbaue, Kammern und Strecken (Ausschnitt 3)
- Anlage 4.12: Bunte First - Modellierte Abbaue, Kammern und Strecken
(Gesamtdarstellung)
- Anlage 4.13: Bunte First - Modellierte Abbaue, Kammern und Strecken (Ausschnitt 1)
- Anlage 4.14: Bunte First - Modellierte Abbaue, Kammern und Strecken (Ausschnitt 2)
- Anlage 4.15: Bunte First - Modellierte Abbaue, Kammern und Strecken (Ausschnitt 3)
-
- Anlage 5.1: Lager H - FE-Modell GMLH-S1 (Gesamtdarstellung)
- Anlage 5.2: Lager H - FE-Modell GMLH-S1 (Ausschnitt 1)
- Anlage 5.3: Lager H - FE-Modell GMLH-S1 (Ausschnitt 2)
- Anlage 5.4: Lager H - FE-Modell GMLH-S1 (Ausschnitt 3)
- Anlage 5.5: Zentralbereich - FE-Modell GMZB-S2 (Gesamtdarstellung)
- Anlage 5.6: Zentralbereich - FE-Modell GMZB-S2 (Ausschnitt)
- Anlage 5.7: Bunte First - FE-Modell GMBF-S1 (Gesamtdarstellung)
- Anlage 5.8: Bunte First - FE-Modell GMBF-S1 (Ausschnitt 1)
- Anlage 5.9: Bunte First - FE-Modell GMBF-S1 (Ausschnitt 2)
- Anlage 5.10: Bunte First - FE-Modell GMBF-S1 (Ausschnitt 3)
-
- Anlage 6.1: GMLH-S1-L: Referenzmodell - Kleinste Hauptdruckspannungen S_1
nach 80 Jahren
- Anlage 6.2: GMLH-S1-L: Referenzmodell - Kleinste Hauptdruckspannungen S_1
nach 150 Jahren
- Anlage 6.3: GMLH-S1-L: Referenzmodell - Größte Hauptdruckspannungen S_2
nach 80 Jahren
- Anlage 6.4: GMLH-S1-L: Referenzmodell - Größte Hauptdruckspannungen S_2
nach 150 Jahren
- Anlage 6.5: GMLH-S1-L: Referenzmodell - Effektivspannungen nach 80 Jahren
- Anlage 6.6: GMLH-S1-L: Referenzmodell - Effektivspannungen nach 150 Jahren
- Anlage 6.7: GMLH-S1-L: Referenzmodell - Effektivverzerrungen nach 80 Jahren
- Anlage 6.8: GMLH-S1-L: Referenzmodell - Effektivverzerrungen nach 150 Jahren
- Anlage 6.9: GMLH-S1-L: Referenzmodell - Dilatante Gebirgsbereiche nach 80 Jahren
- Anlage 6.10: GMLH-S1-L: Referenzmodell - Dilatante Gebirgsbereiche nach 150 Jahren
- Anlage 6.11: GMLH-S1-M: Erhöhte Duktilität - Dilatante Gebirgsbereiche nach 150 Jahren
- Anlage 6.12: GMLH-S1-N: Verminderte Duktilität - Dilatante Gebirgsbereiche nach 150
Jahren

- Anlage 6.13: GMLH-S1-L: Referenzmodell - Hypothetisch laugendruckgefährdete Bereiche nach 80 Jahren
- Anlage 6.14: GMLH-S1-L: Referenzmodell - Hypothetisch laugendruckgefährdete Bereiche nach 150 Jahren
- Anlage 6.15: GMLH-S1-M: Erhöhte Duktilität - Hypothetisch laugendruckgefährdete Bereiche nach 150 Jahren
- Anlage 6.16: GMLH-S1-N: Verminderte Duktilität - Hypothetisch laugendruckgefährdete Bereiche nach 150 Jahren
- Anlage 6.17: GMZB-S2-A: Referenzmodell - Kleinste Hauptdruckspannungen S_1 nach 80 Jahren
- Anlage 6.18: GMZB-S2-A: Referenzmodell - Kleinste Hauptdruckspannungen S_1 nach 130 Jahren
- Anlage 6.19: GMZB-S2-A: Referenzmodell - Größte Hauptdruckspannungen S_2 nach 80 Jahren
- Anlage 6.20: GMZB-S2-A: Referenzmodell - Größte Hauptdruckspannungen S_2 nach 130 Jahren
- Anlage 6.21: GMZB-S2-A: Referenzmodell - Effektivspannungen nach 80 Jahren
- Anlage 6.22: GMZB-S2-A: Referenzmodell - Effektivspannungen nach 130 Jahren
- Anlage 6.23: GMZB-S2-A: Referenzmodell - Effektivverzerrungen nach 80 Jahren
- Anlage 6.24: GMZB-S2-A: Referenzmodell - Effektivverzerrungen nach 130 Jahren
- Anlage 6.25: GMZB-S2-A: Referenzmodell - Dilatante Gebirgsbereiche nach 80 Jahren
- Anlage 6.26: GMZB-S2-A: Referenzmodell - Dilatante Gebirgsbereiche nach 130 Jahren
- Anlage 6.27: GMZB-S2-B: Erhöhte Duktilität - Dilatante Gebirgsbereiche nach 130 Jahren
- Anlage 6.28: GMZB-S2-C: Verminderte Duktilität - Dilatante Gebirgsbereiche nach 130 Jahren
- Anlage 6.29: GMZB-S2-D: Erhöhte Anhydritsteifigkeit - Dilatante Gebirgsbereiche nach 130 Jahren
- Anlage 6.30: GMZB-S2-A: Referenzmodell - Hypothetisch laugendruckgefährdete Bereiche nach 80 Jahren
- Anlage 6.31: GMZB-S2-A: Referenzmodell - Hypothetisch laugendruckgefährdete Bereiche nach 130 Jahren
- Anlage 6.32: GMZB-S2-B: Erhöhte Duktilität - Hypothetisch laugendruckgefährdete Bereiche nach 130 Jahren
- Anlage 6.33: GMZB-S2-C: Verminderte Duktilität - Hypothetisch laugendruckgefährdete Bereiche nach 130 Jahren
- Anlage 6.34: GMZB-S2-D: Erhöhte Anhydritsteifigkeit - Hypothetisch laugendruckgefährdete Bereiche nach 130 Jahren

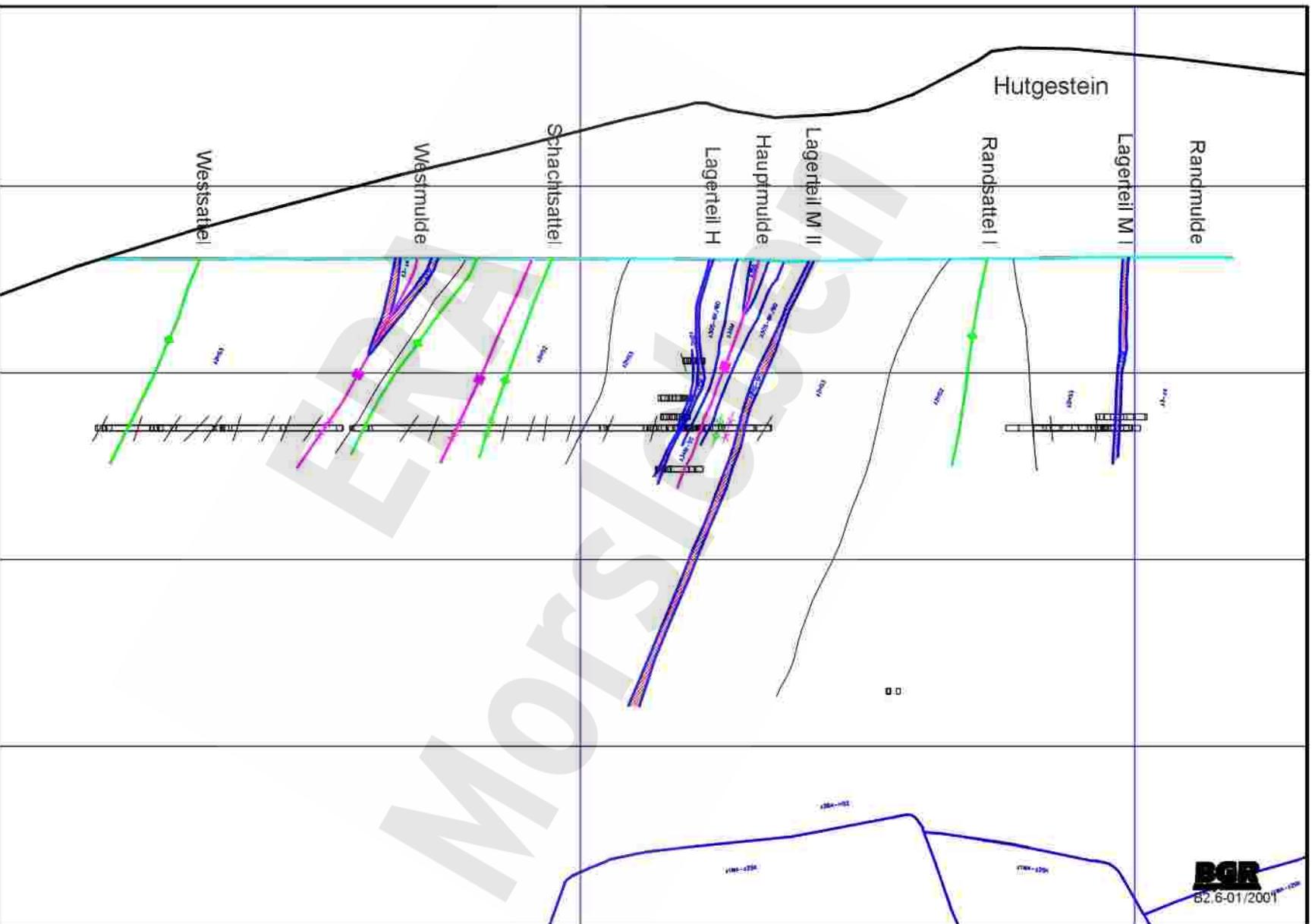
- Anlage 6.35: GMBF-S1-A: Referenzmodell - Kleinste Hauptdruckspannungen S_1 nach 80 Jahren
- Anlage 6.36: GMBF-S1-A: Referenzmodell - Kleinste Hauptdruckspannungen S_1 nach 130 Jahren
- Anlage 6.37: GMBF-S1-A: Referenzmodell - Größte Hauptdruckspannungen S_2 nach 80 Jahren
- Anlage 6.38: GMBF-S1-A: Referenzmodell - Größte Hauptdruckspannungen S_2 nach 130 Jahren
- Anlage 6.39: GMBF-S1-A: Referenzmodell - Effektivspannungen nach 80 Jahren
- Anlage 6.40: GMBF-S1-A: Referenzmodell - Effektivspannungen nach 130 Jahren
- Anlage 6.41: GMBF-S1-A: Referenzmodell - Effektivverzerrungen nach 80 Jahren
- Anlage 6.42: GMBF-S1-A: Referenzmodell - Effektivverzerrungen nach 130 Jahren
- Anlage 6.43: GMBF-S1-A: Referenzmodell - Dilatante Gebirgsbereiche nach 80 Jahren
- Anlage 6.44: GMBF-S1-A: Referenzmodell - Dilatante Gebirgsbereiche nach 130 Jahren
- Anlage 6.45: GMBF-S1-B: Erhöhte Duktilität - Dilatante Gebirgsbereiche nach 130 Jahren
- Anlage 6.46: GMBF-S1-C: Verminderte Duktilität - Dilatante Gebirgsbereiche nach 130 Jahren
- Anlage 6.47: GMBF-S1-D: Erhöhte Anhydritsteifigkeit - Dilatante Gebirgsbereiche nach 130 Jahren
- Anlage 6.48: GMBF-S1-A: Referenzmodell - Hypothetisch laugendruckgefährdete Bereiche nach 80 Jahren
- Anlage 6.49: GMBF-S1-A: Referenzmodell - Hypothetisch laugendruckgefährdete Bereiche nach 130 Jahren
- Anlage 6.50: GMBF-S1-B: Erhöhte Duktilität - Hypothetisch laugendruckgefährdete Bereiche nach 130 Jahren
- Anlage 6.51: GMBF-S1-C: Verminderte Duktilität - Hypothetisch laugendruckgefährdete Bereiche nach 130 Jahren
- Anlage 6.52: GMBF-S1-D: Erhöhte Anhydritsteifigkeit - Hypothetisch laugendruckgefährdete Bereiche nach 130 Jahren



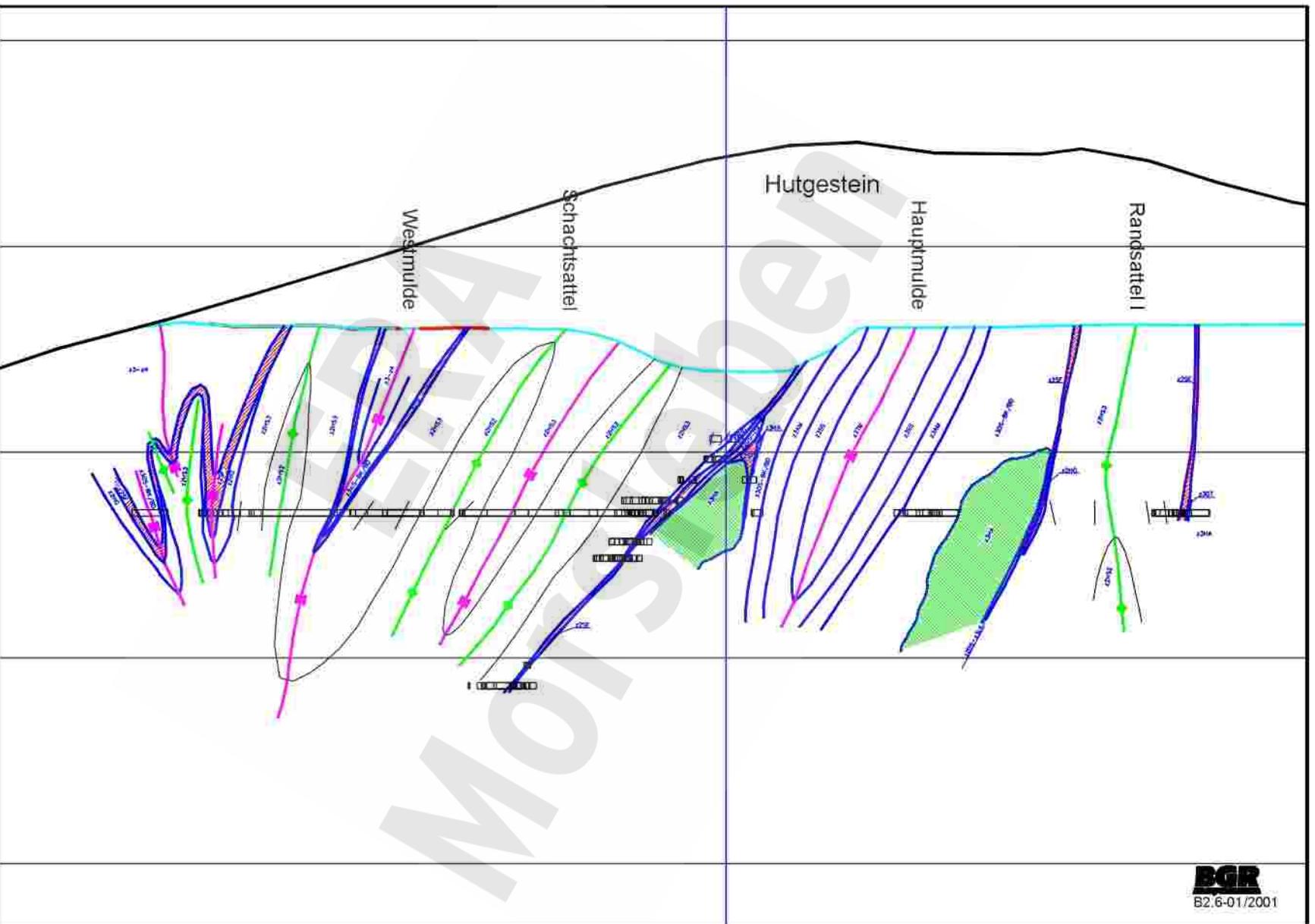
ERA Morsleben, Schachtanlage Marie
 Geologischer Sohlenriss -231 m NN (Behlau, Mingerzahn & Bornemann 1997)



Lager H
 Geologischer Sohlenriss -231 mNN (Behlau, Mingerzahn & Bornemann 1997)

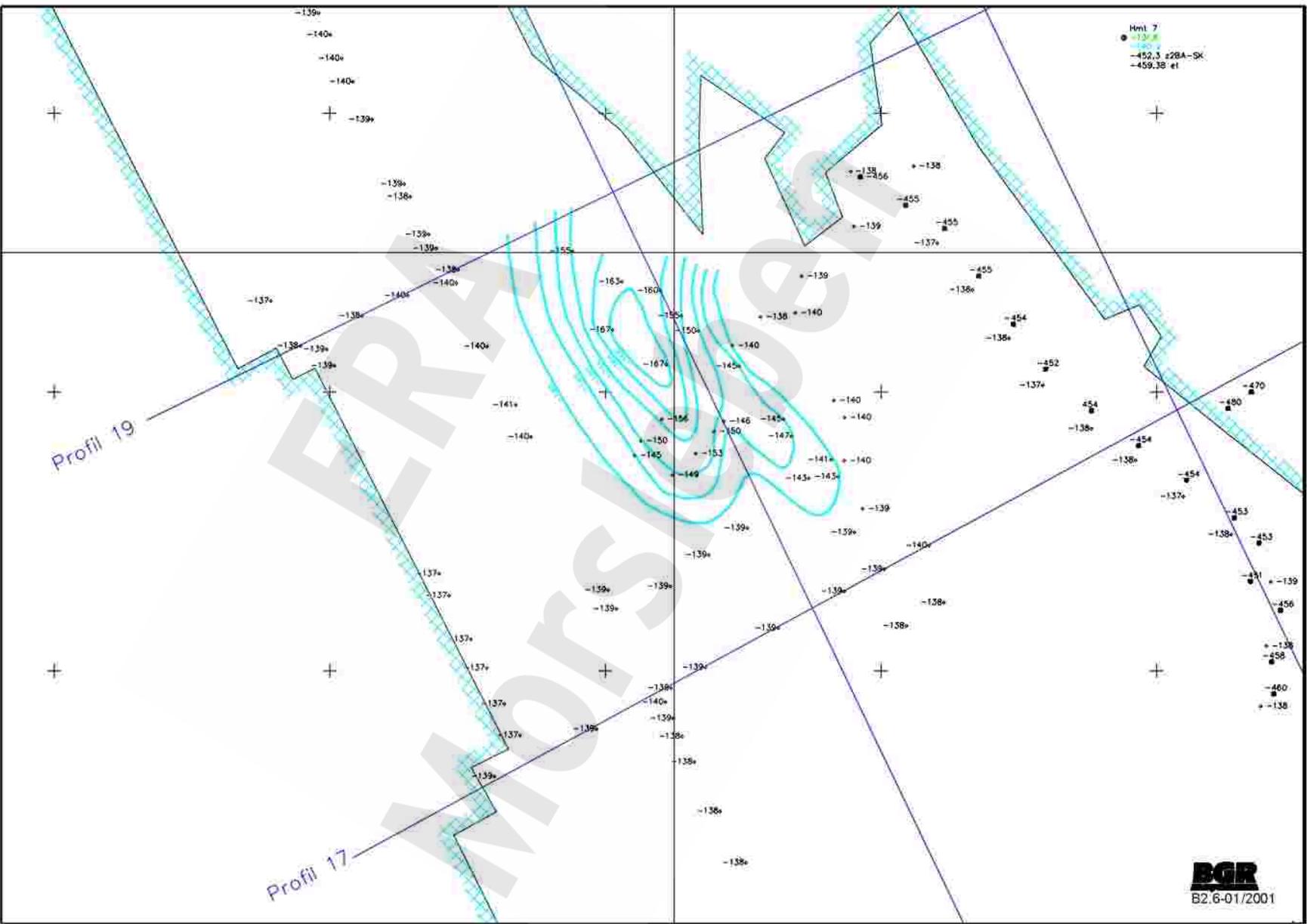


Lager H
 Geologisches Profil 17 (Behlau, Mingerzahn & Bornemann 1997)



Lager H
Geologisches Profil 19 (Behlau, Mingerzahn & Bornemann 1997)

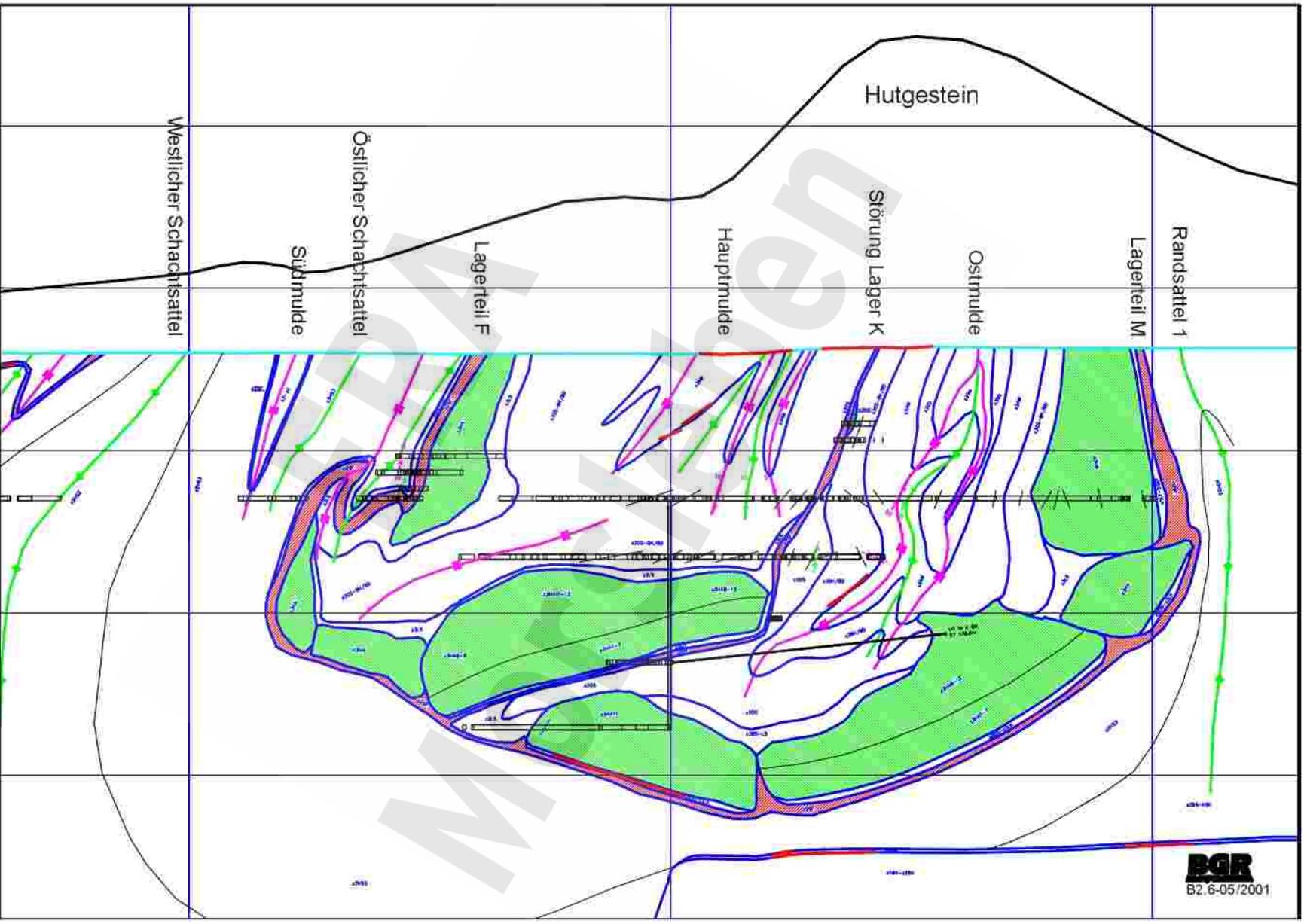
Hmt 7
-452,3 z2BA-SK
-459,3B et



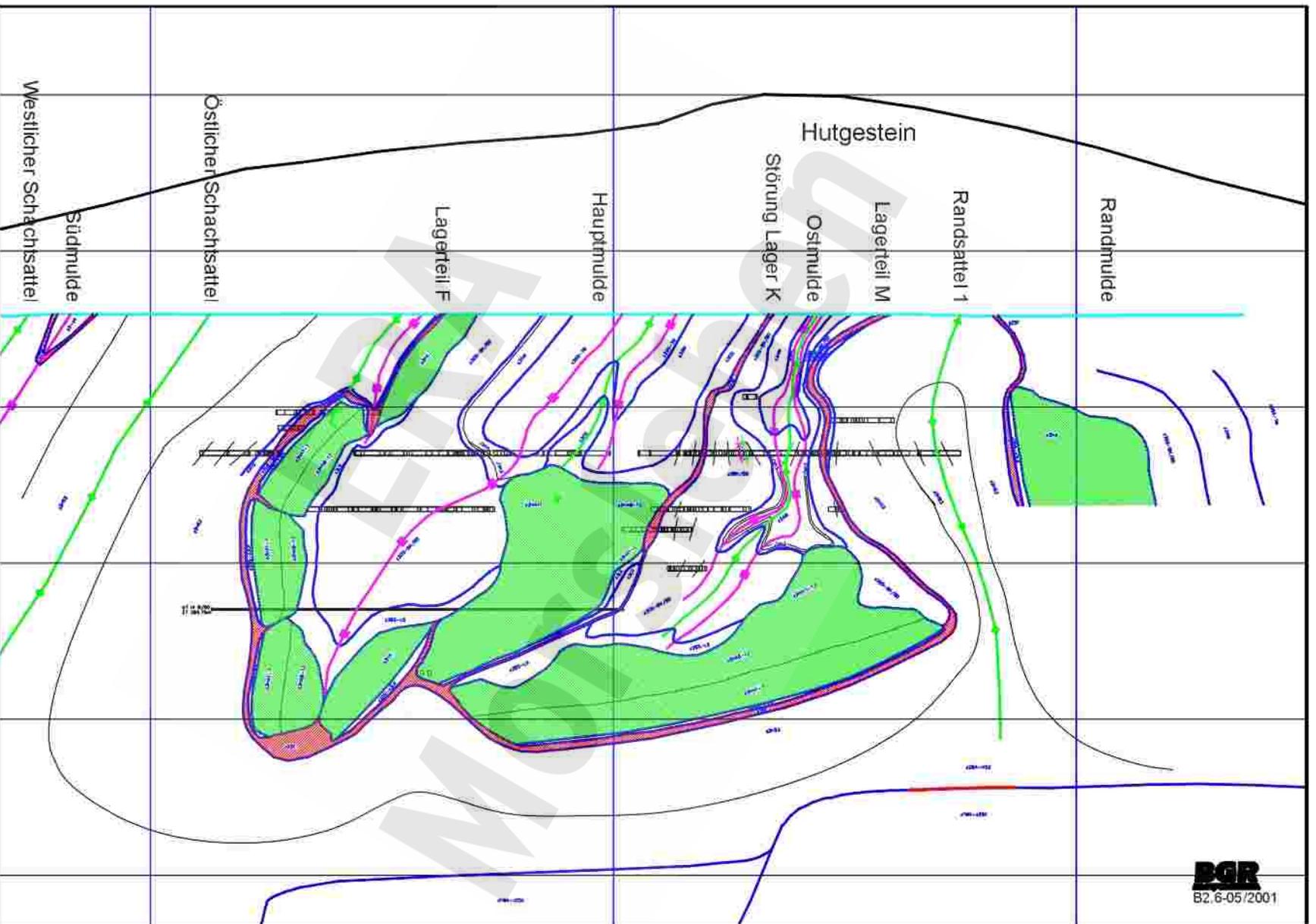
Lager H
Tiefenlinien des Salzspiegels (Behlau, Mingerzahn & Bornemann 1997)

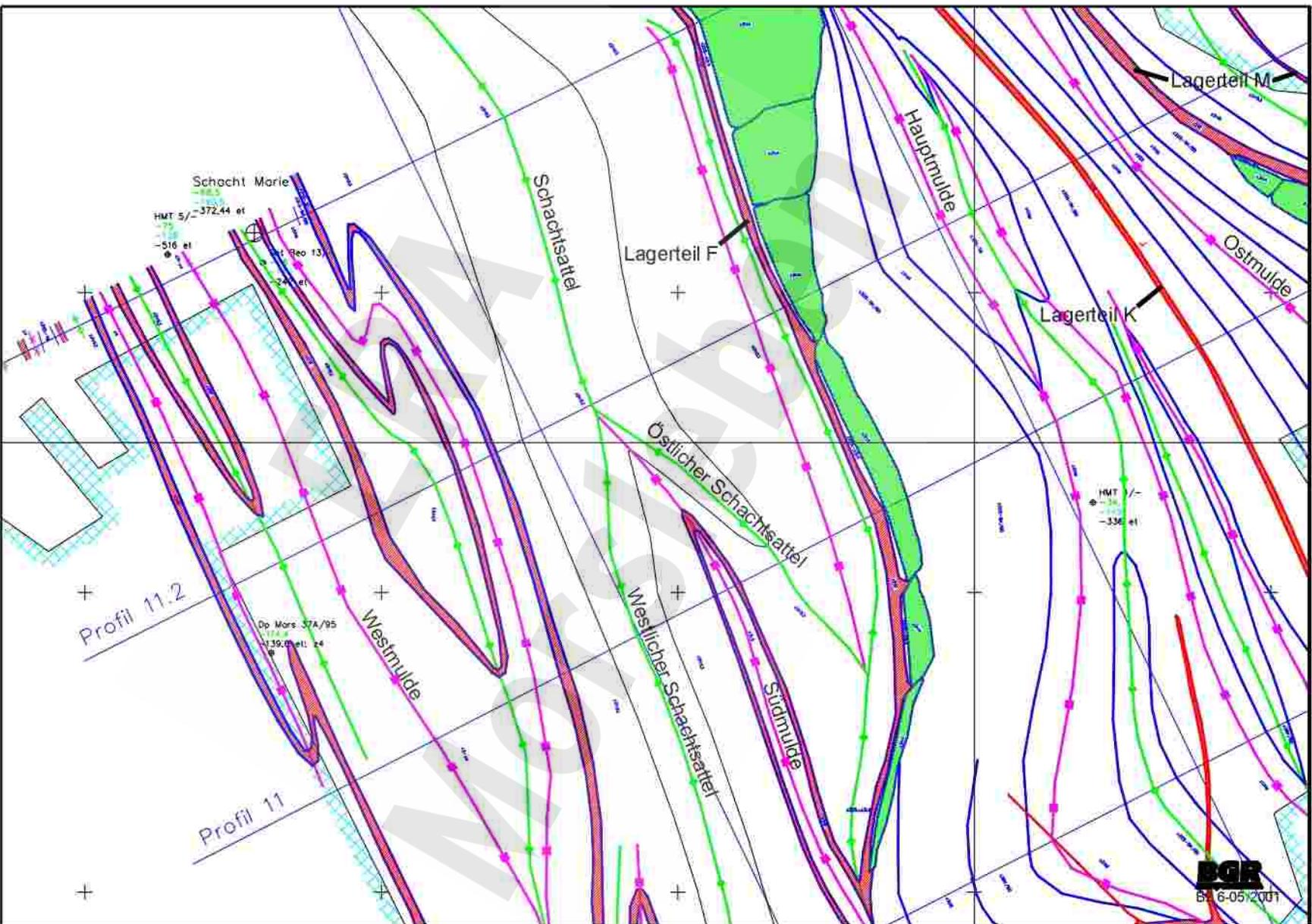


Zentralbereich Marie
Sohlenriss der Sohle -231 m NN (Behlau, Mingerzahn & Bornemann 1997)

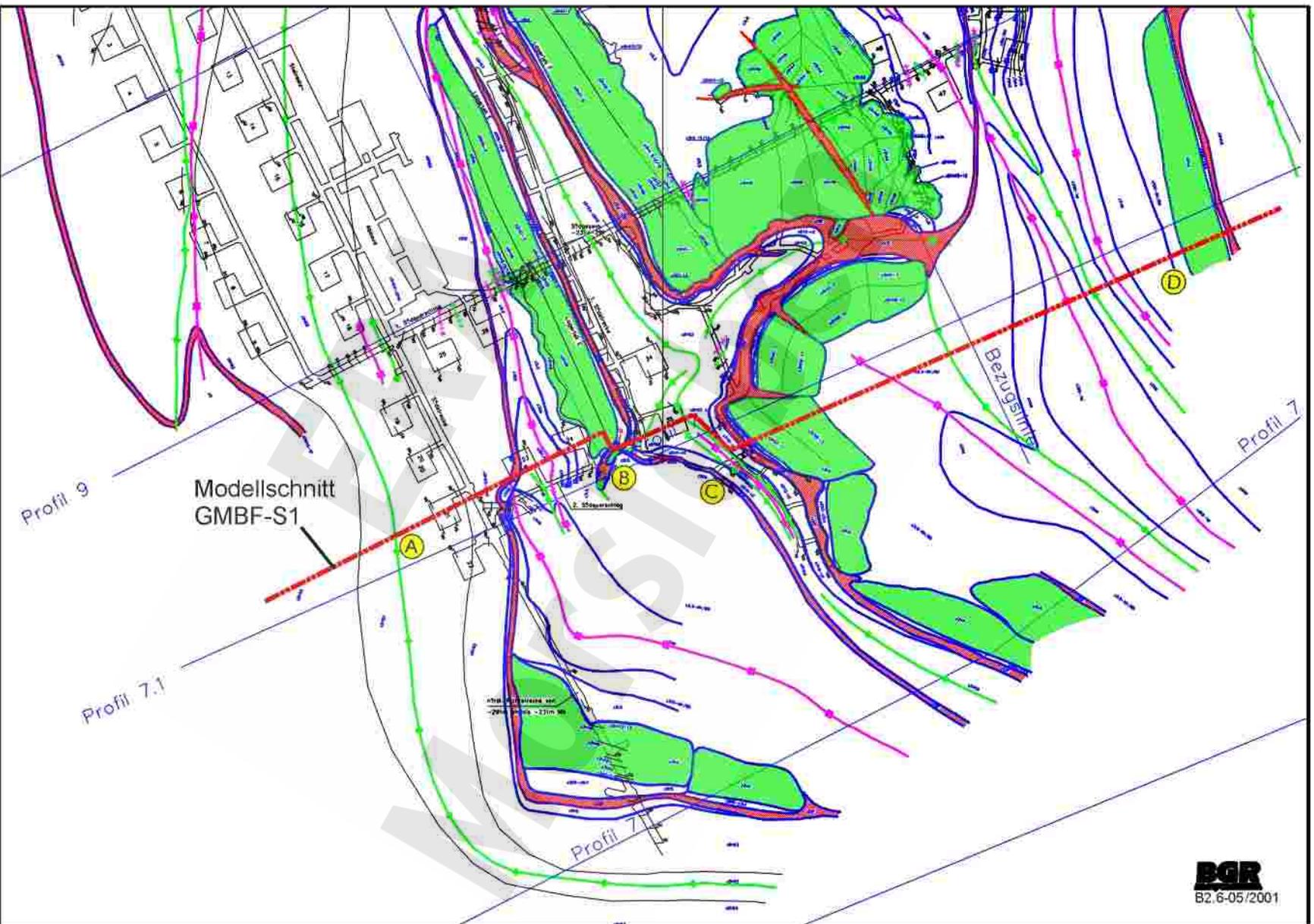


Zentralbereich Marie
 Geologisches Profil 11 (Behlau, Mingerzahn & Bornemann 1997)





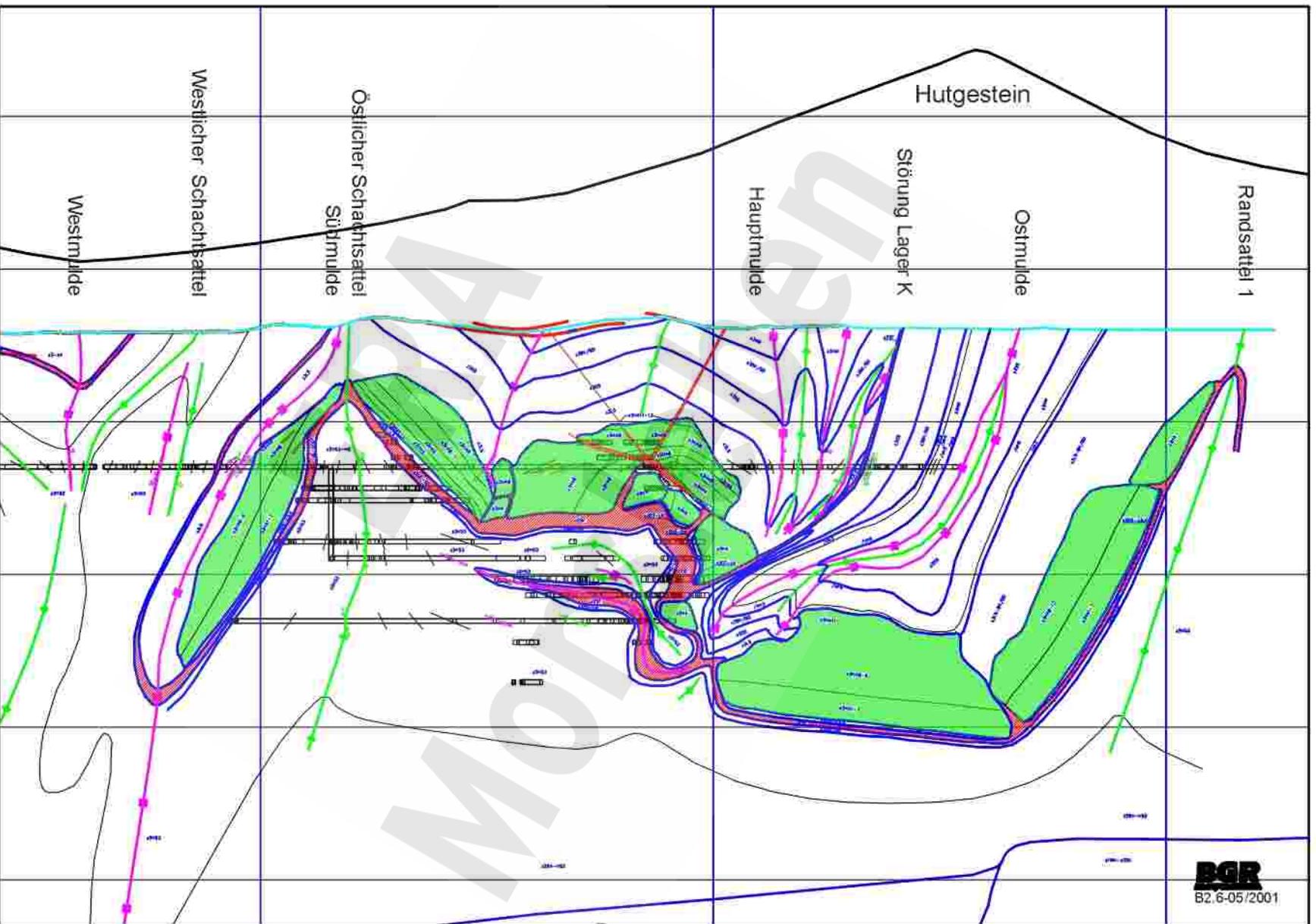
Zentralbereich Marie
 Ausschnitt aus der Strukturkarte am Salzspiegel
 (Behlau, Mingerzahn & Bornemann 1997)



Bunte First
 Geologischer Sohlenriss -231 m NN (Behlau, Mingerzahn & Bornemann 1997)



Bunte First
Geologisches Profil 7. 1 (Behlau, Mingerzahn & Bornemann 1997)

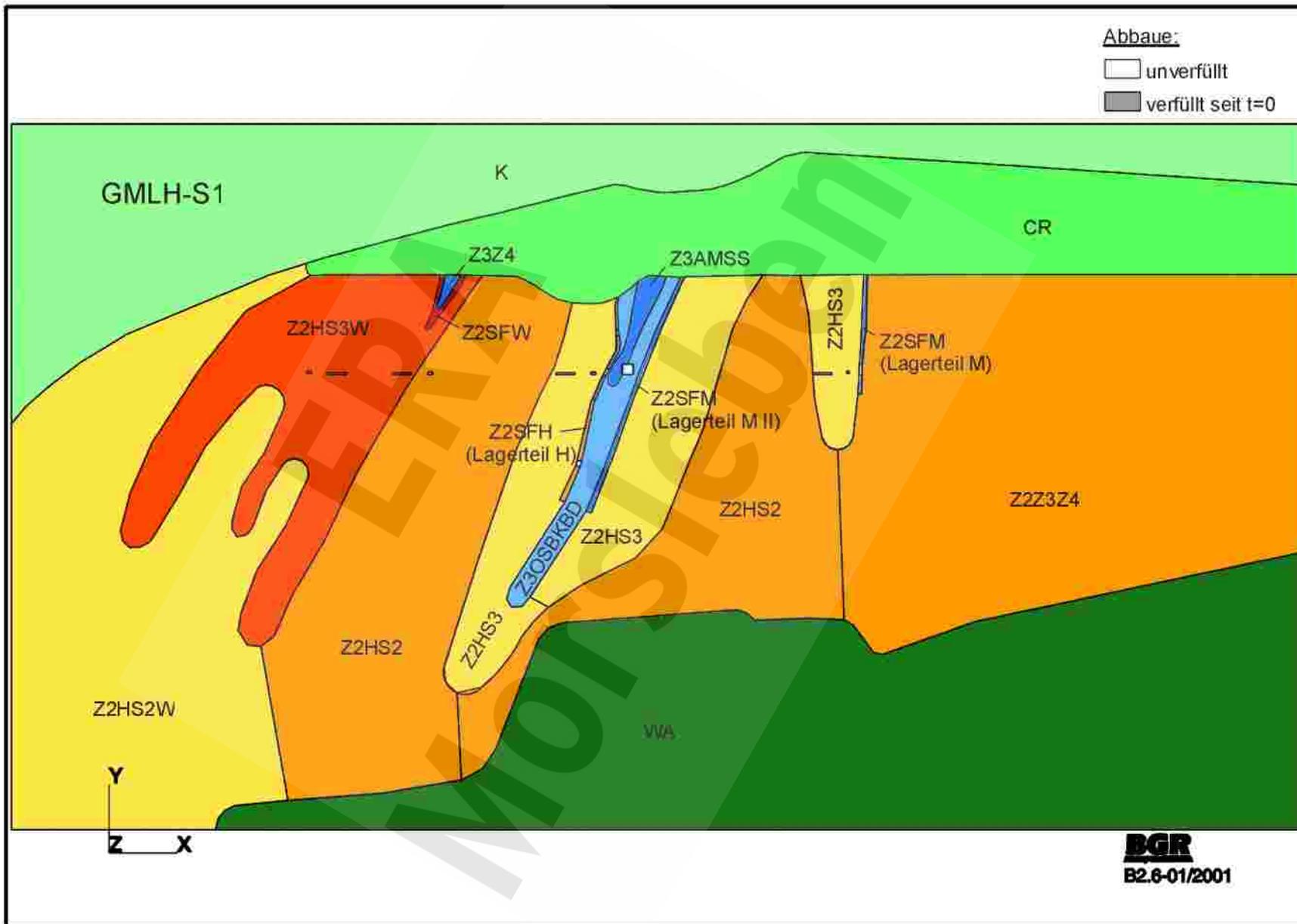


Bunte First
 Geologisches Profil 9 (Behlau, Mingerzahn & Bornemann 1997)

Abbaue:

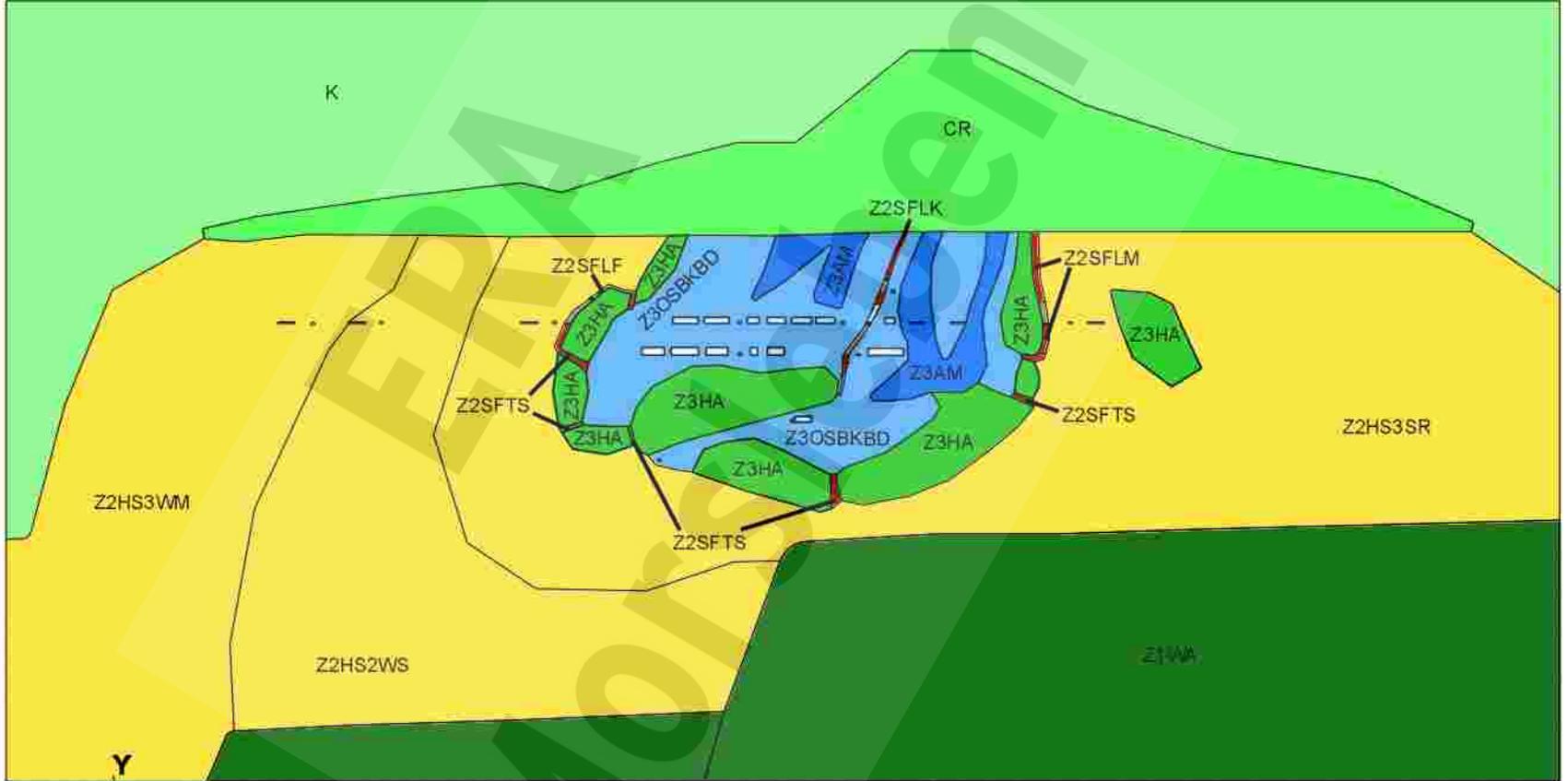
unverfüllt

verfüllt seit t=0

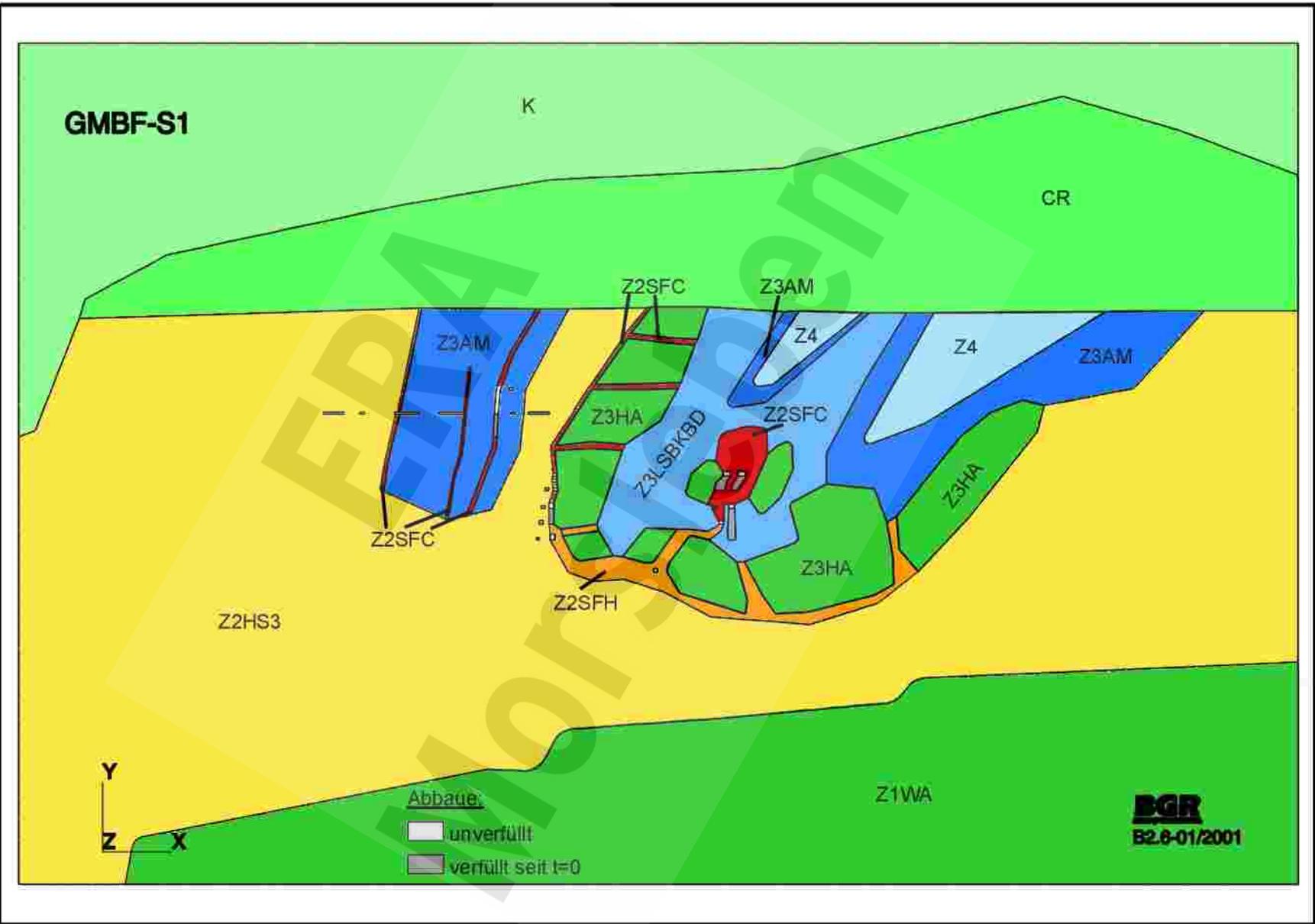


Lager H
Gewählte Homogenbereiche im Modellschnitt GMLH-S1

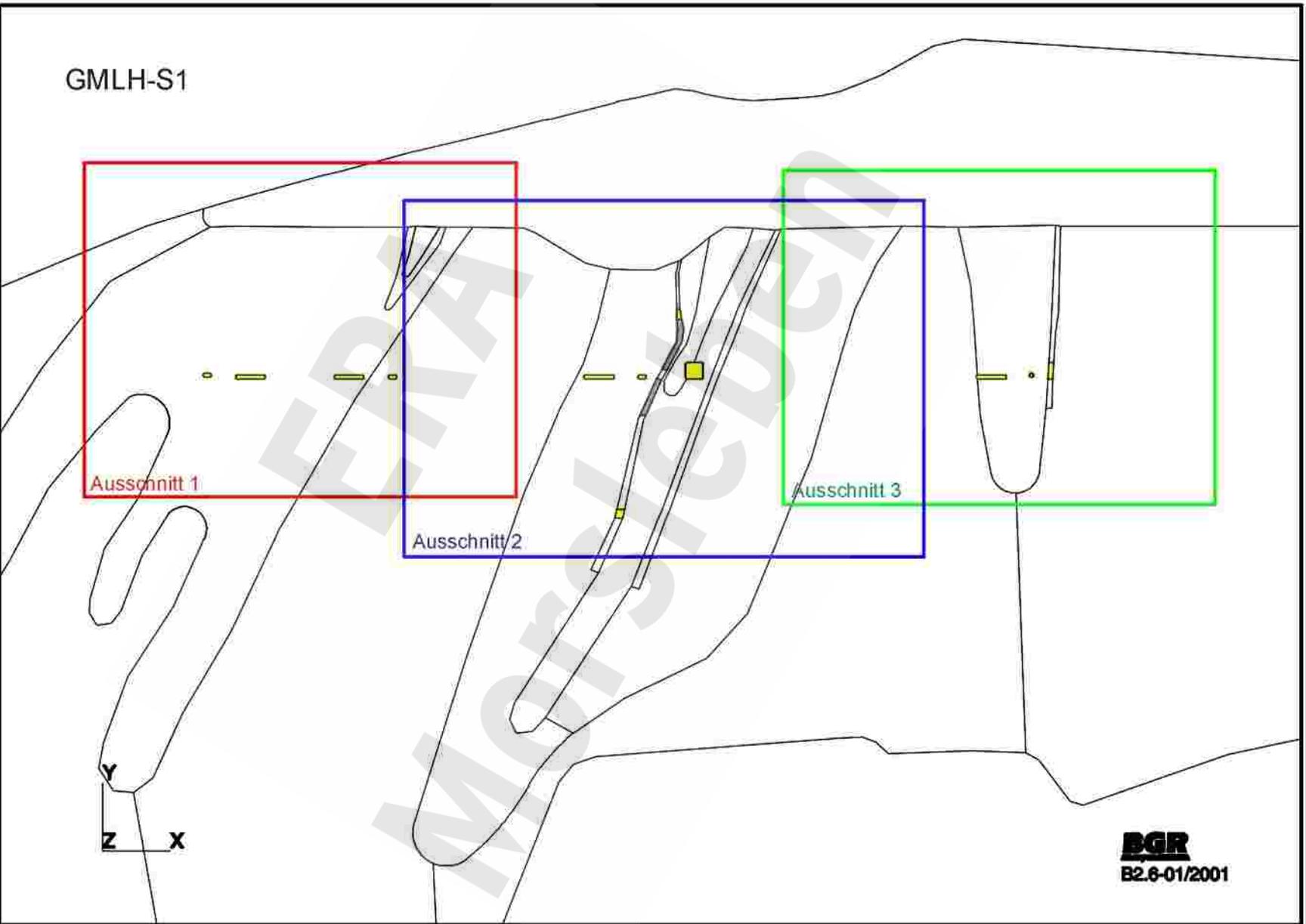
GMZB-S2



Zentralbereich
Gewählte Homogenbereiche im Modellschnitt GMZB-S2



Bunte First
 Gewählte Homogenbereiche im Modellschnitt GMBF-S1

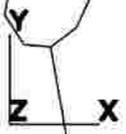


GMLH-S1

Ausschnitt 1

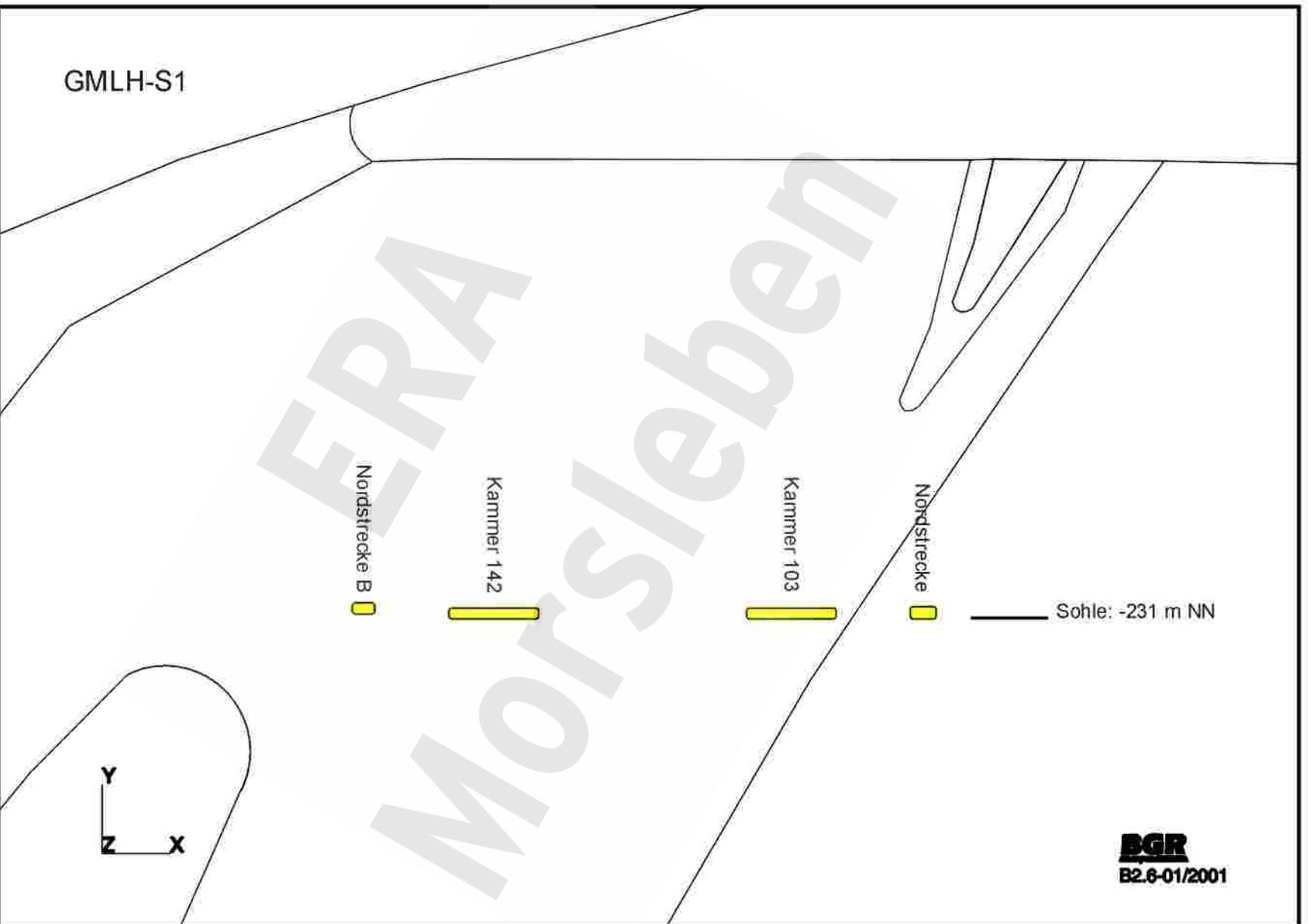
Ausschnitt 2

Ausschnitt 3



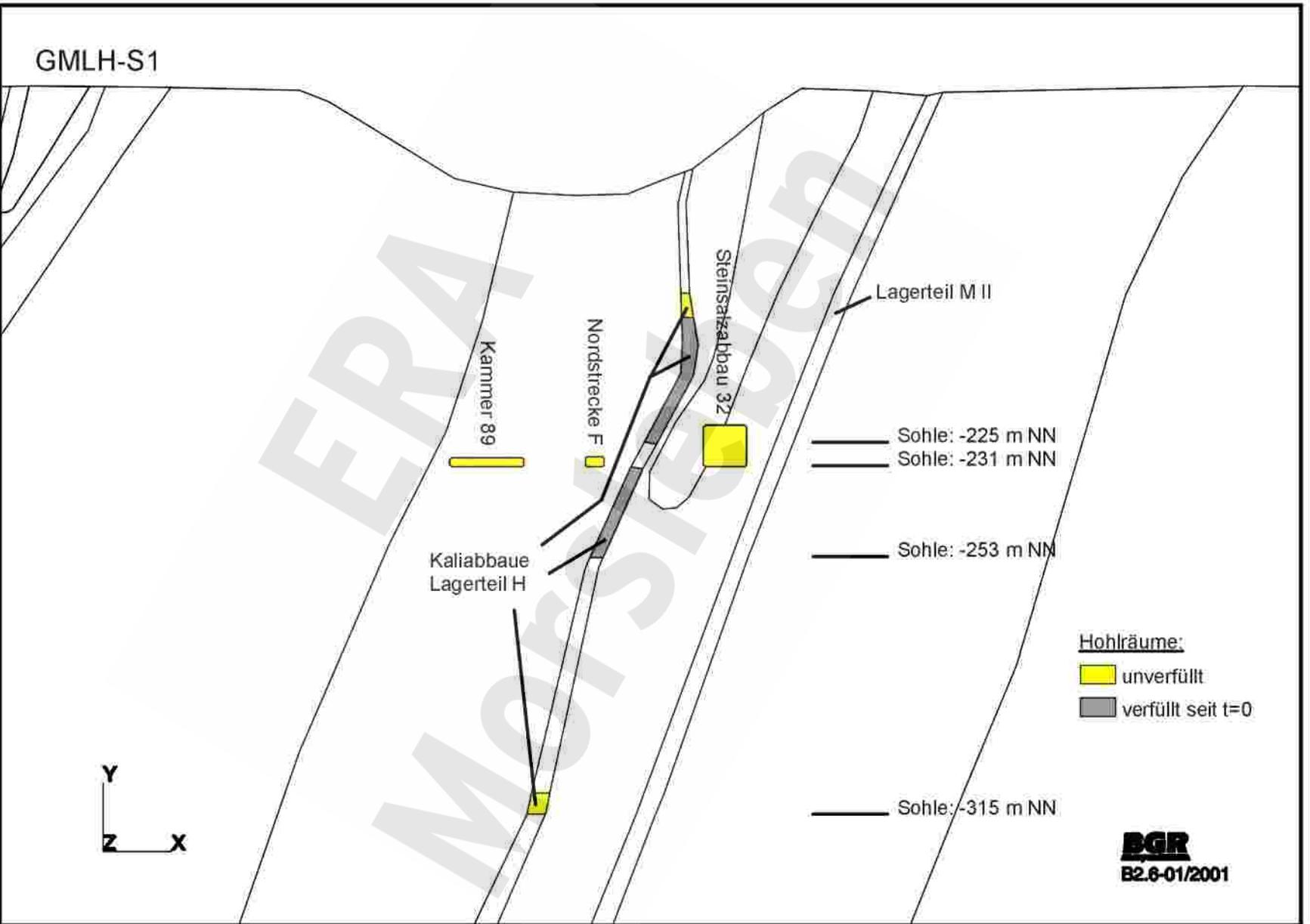
BGR
B2.6-01/2001

Lager H
Modellierte Abbaue, Kammern und Strecken (Gesamtdarstellung)

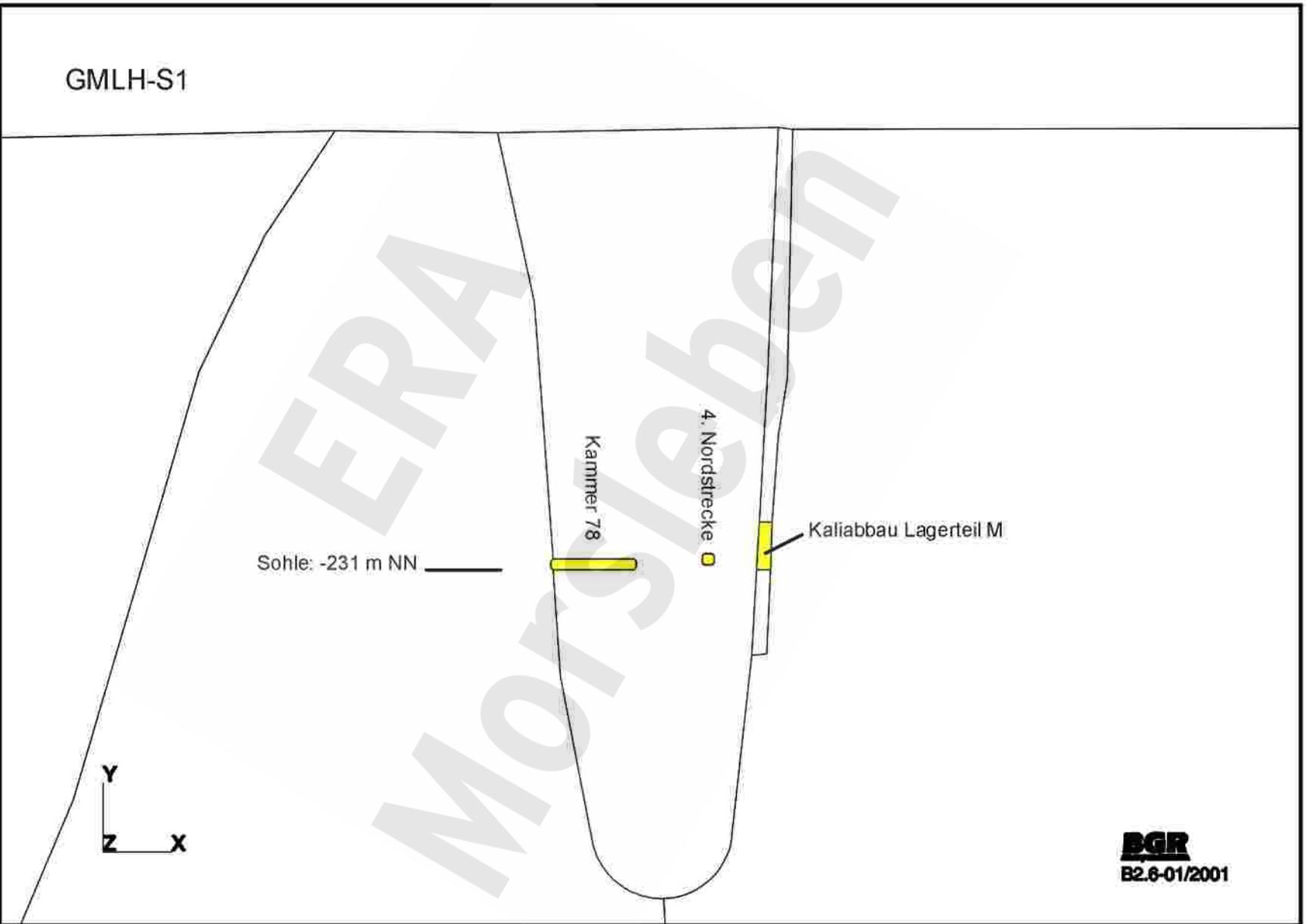


BGR
B2.6-01/2001

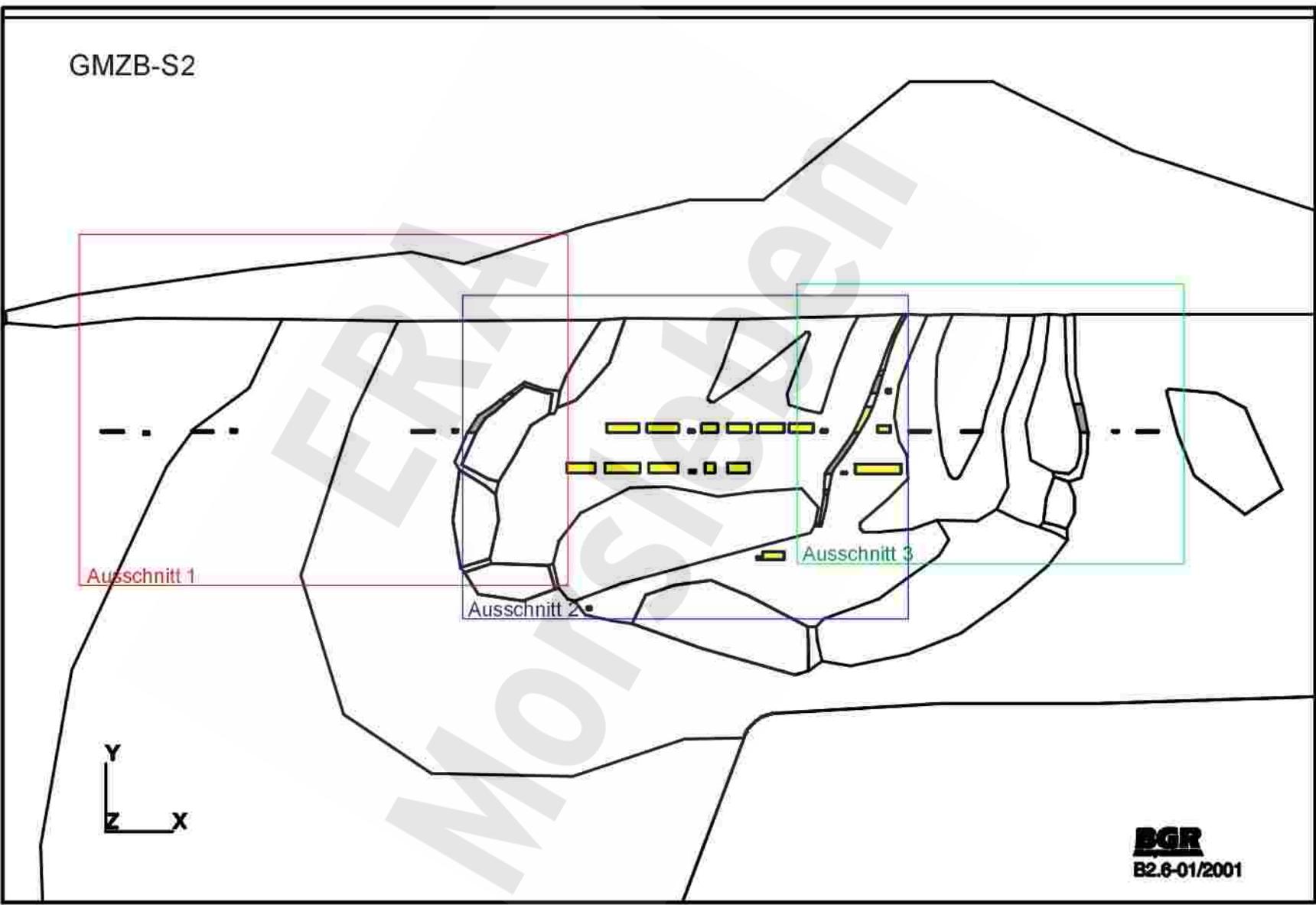
Lager H
Modellierte Abbaue, Kammern und Strecken (Ausschnitt 1)



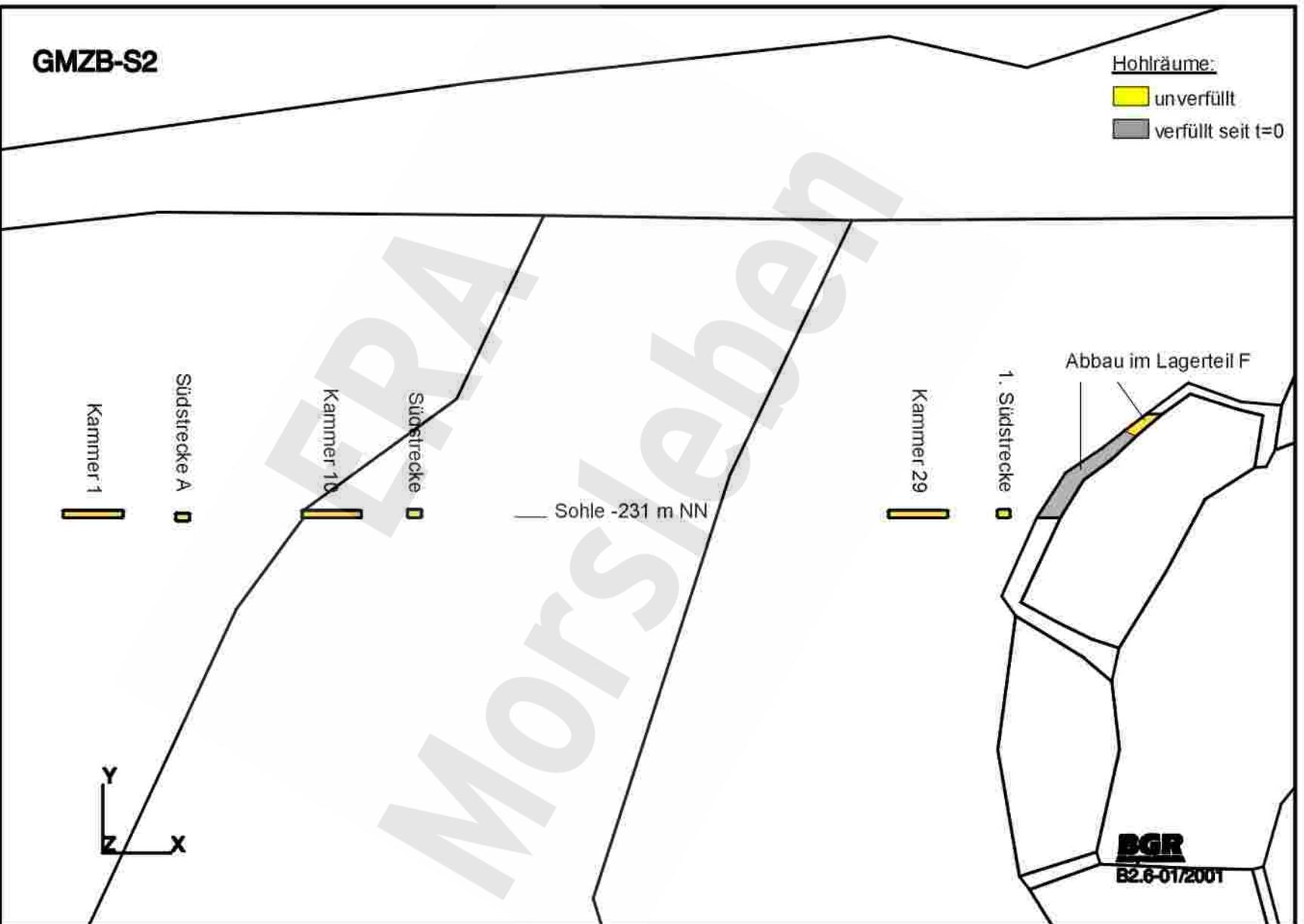
Lager H
 Modellierter Abbaue, Kammern und Strecken (Ausschnitt 2)



Lager H
Modellierte Abbaue, Kammern und Strecken (Ausschnitt 3)



Zentralbereich
Modellierte Abbaue, Kammern und Strecken (Gesamtdarstellung)

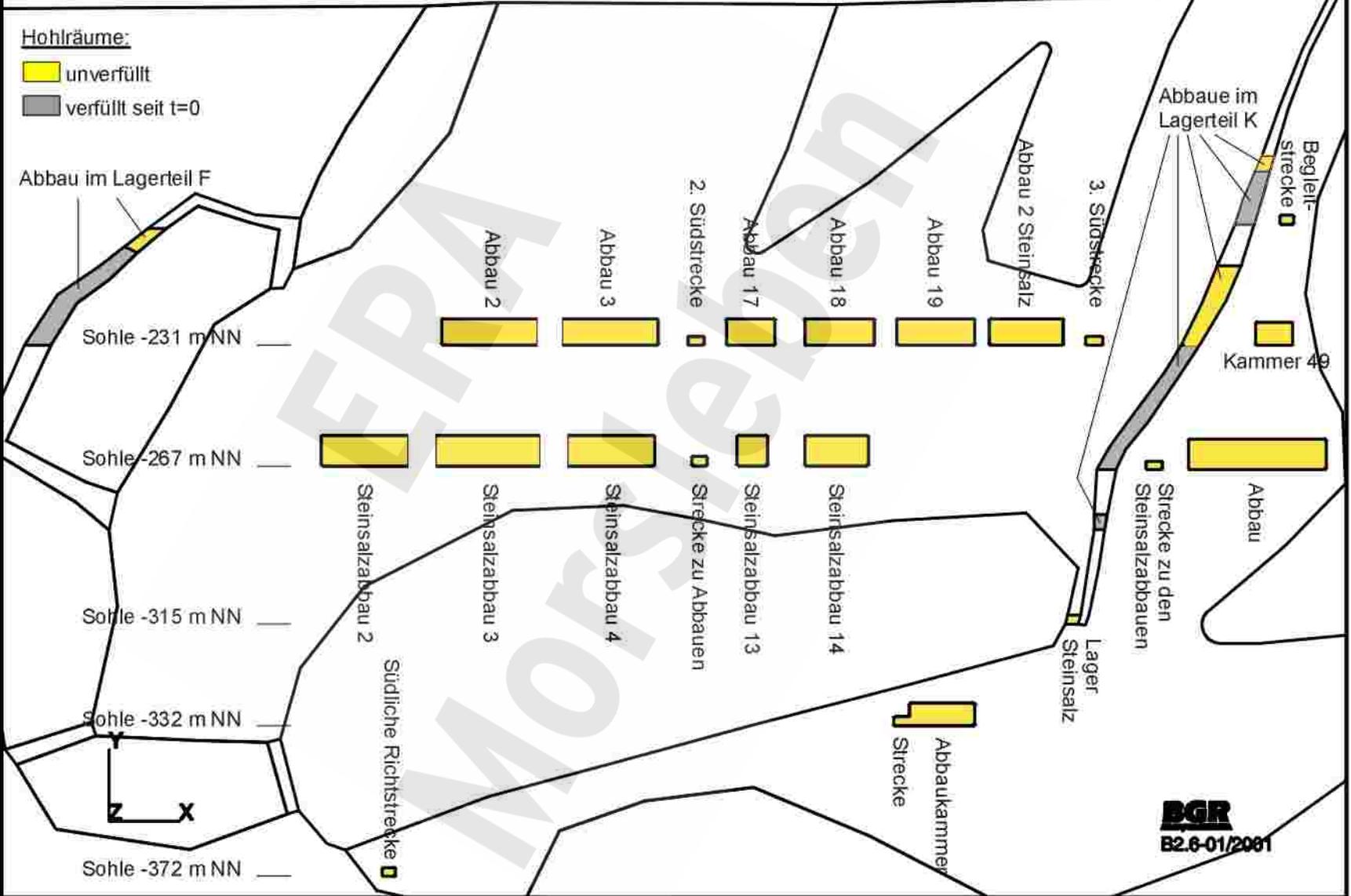


Zentralbereich
 Modellierter Abbaue, Kammern und Strecken (Ausschnitt 1)

GMZB-S2

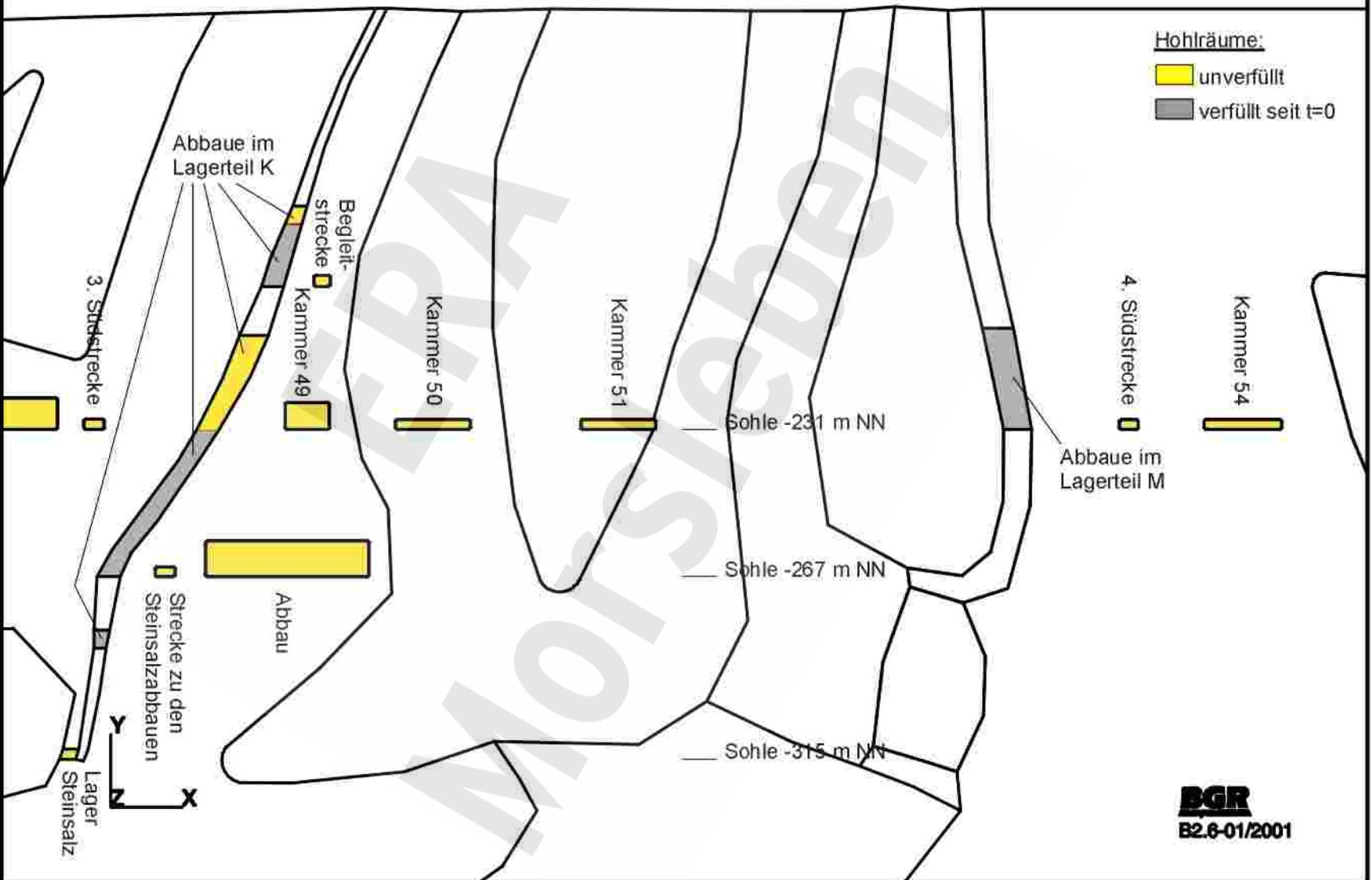
Hohlräume:

- unverfüllt
- verfüllt seit t=0

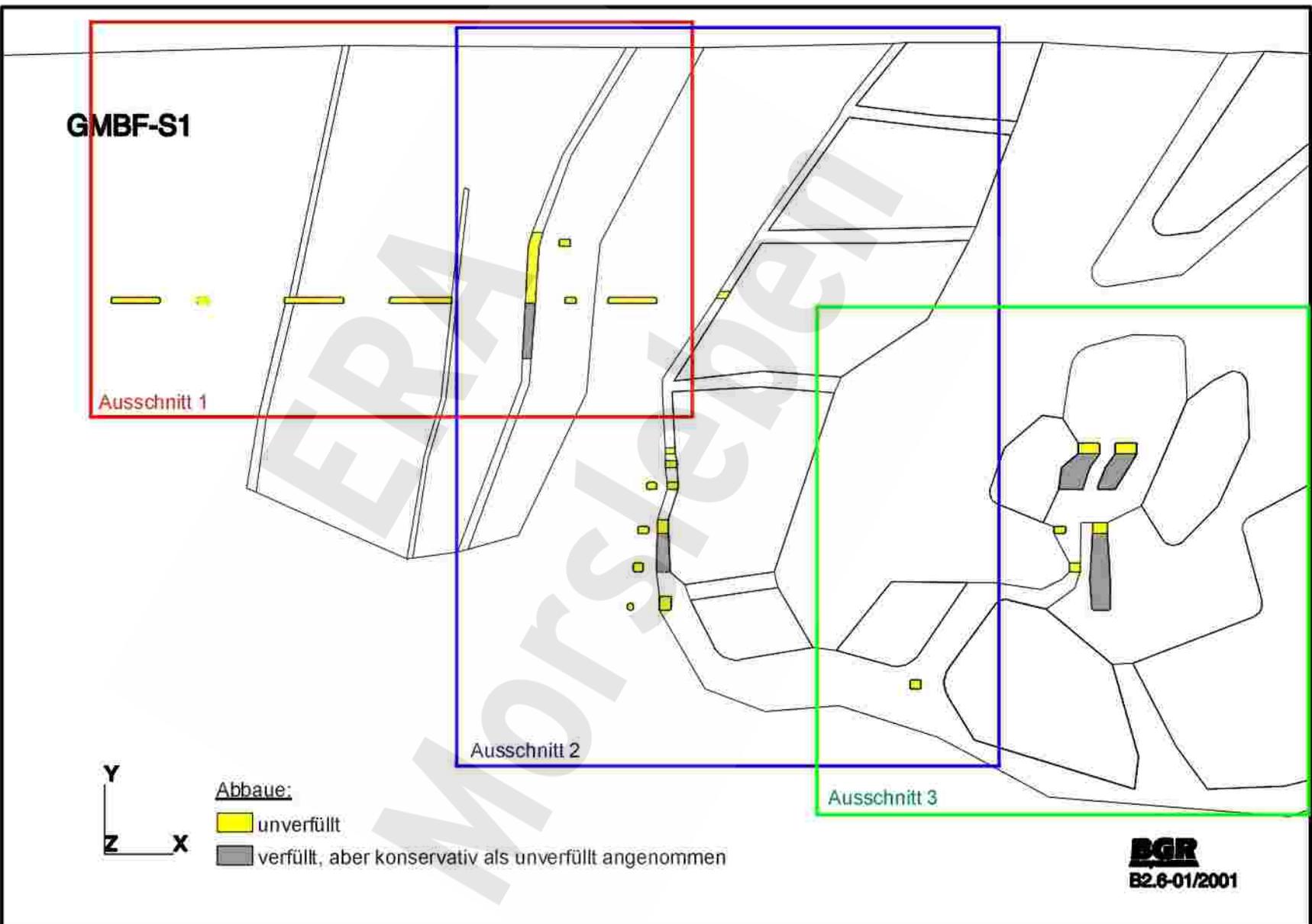


Zentralbereich
Modellierte Abbaue, Kammern und Strecken (Ausschnitt 2)

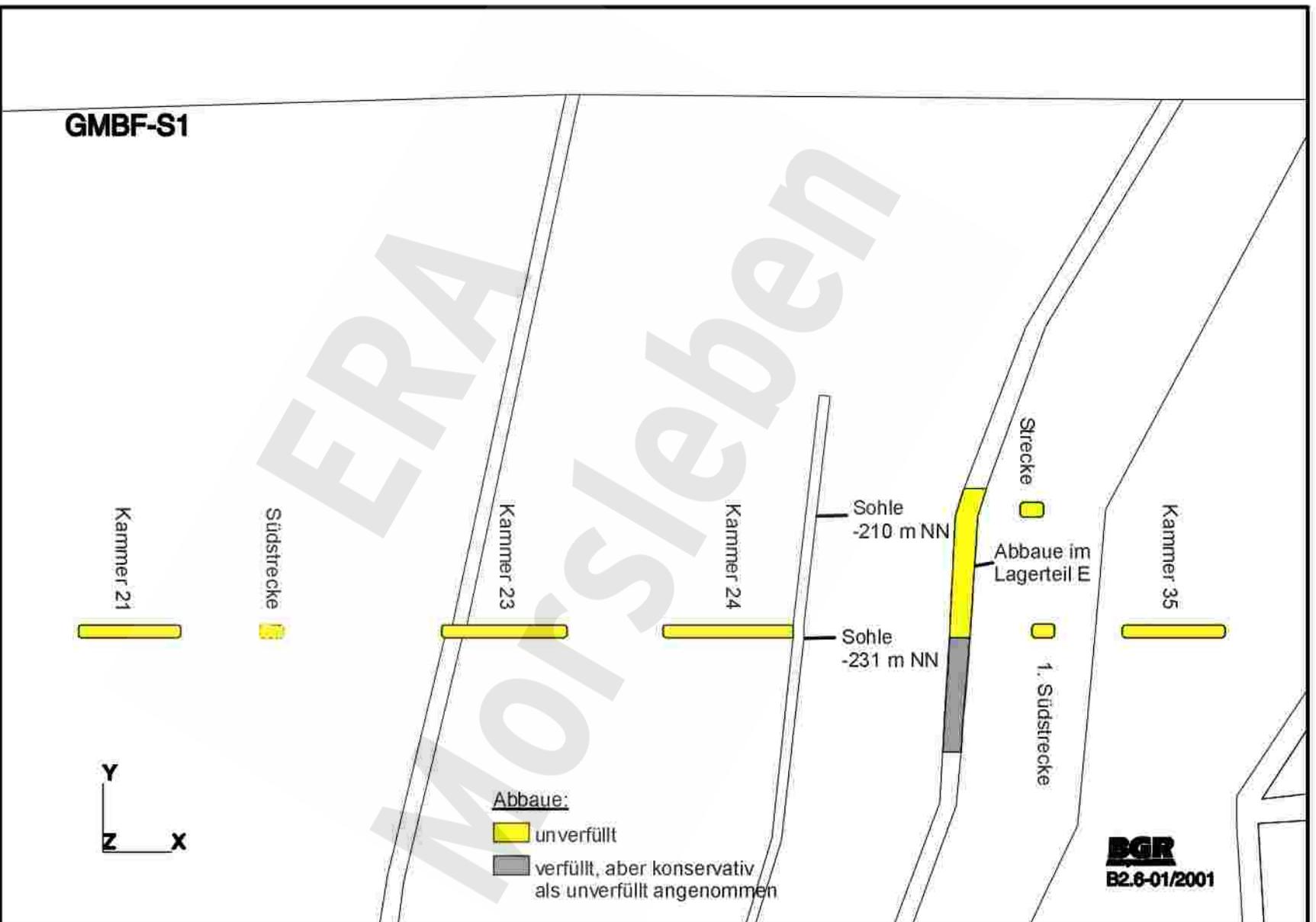
GMZB-S2



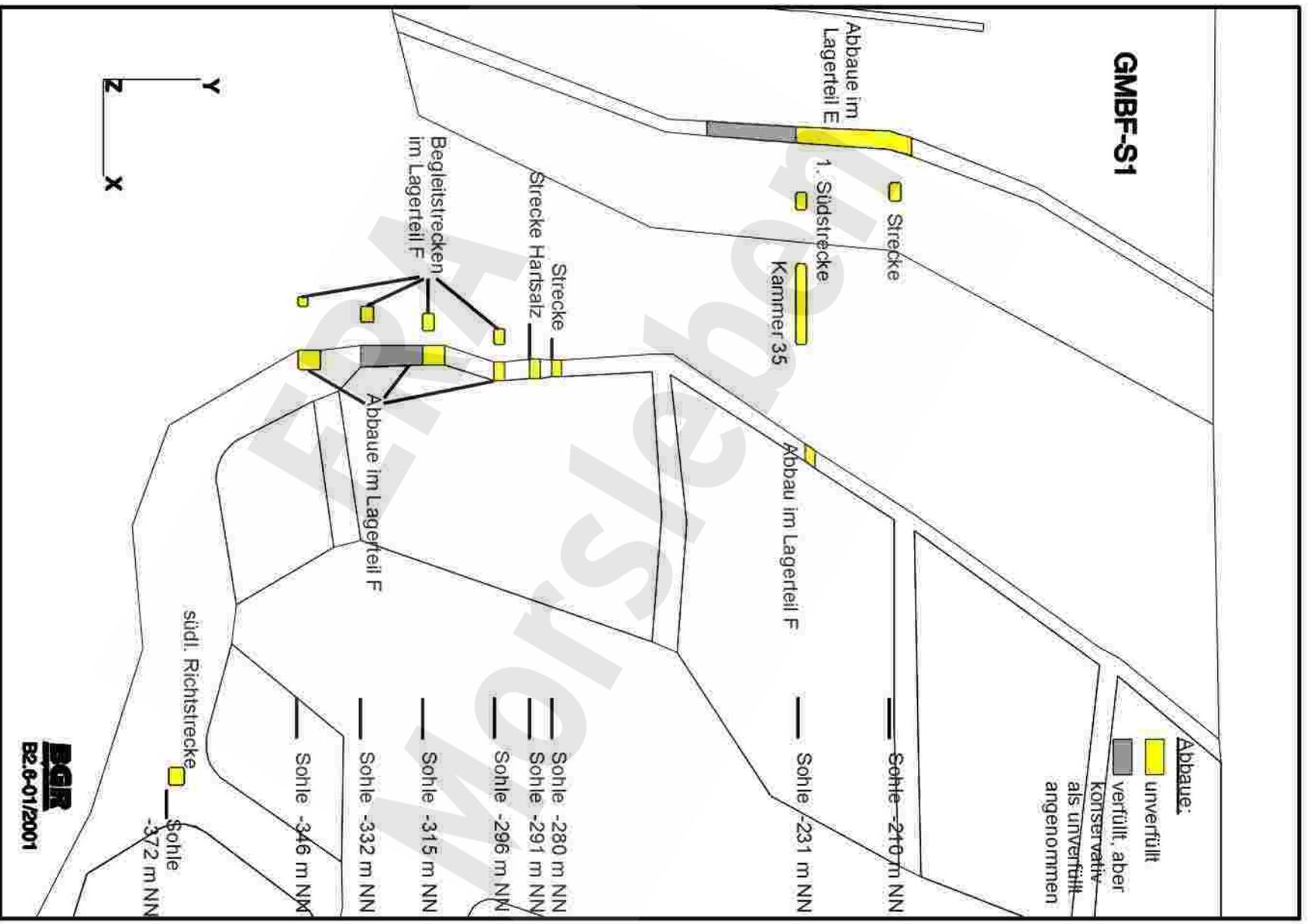
Zentralbereich
Modellierte Abbaue, Kammern und Strecken (Ausschnitt 3)



Bunte First
 Modellierter Abbaue, Kammern und Strecken (Gesamtdarstellung)

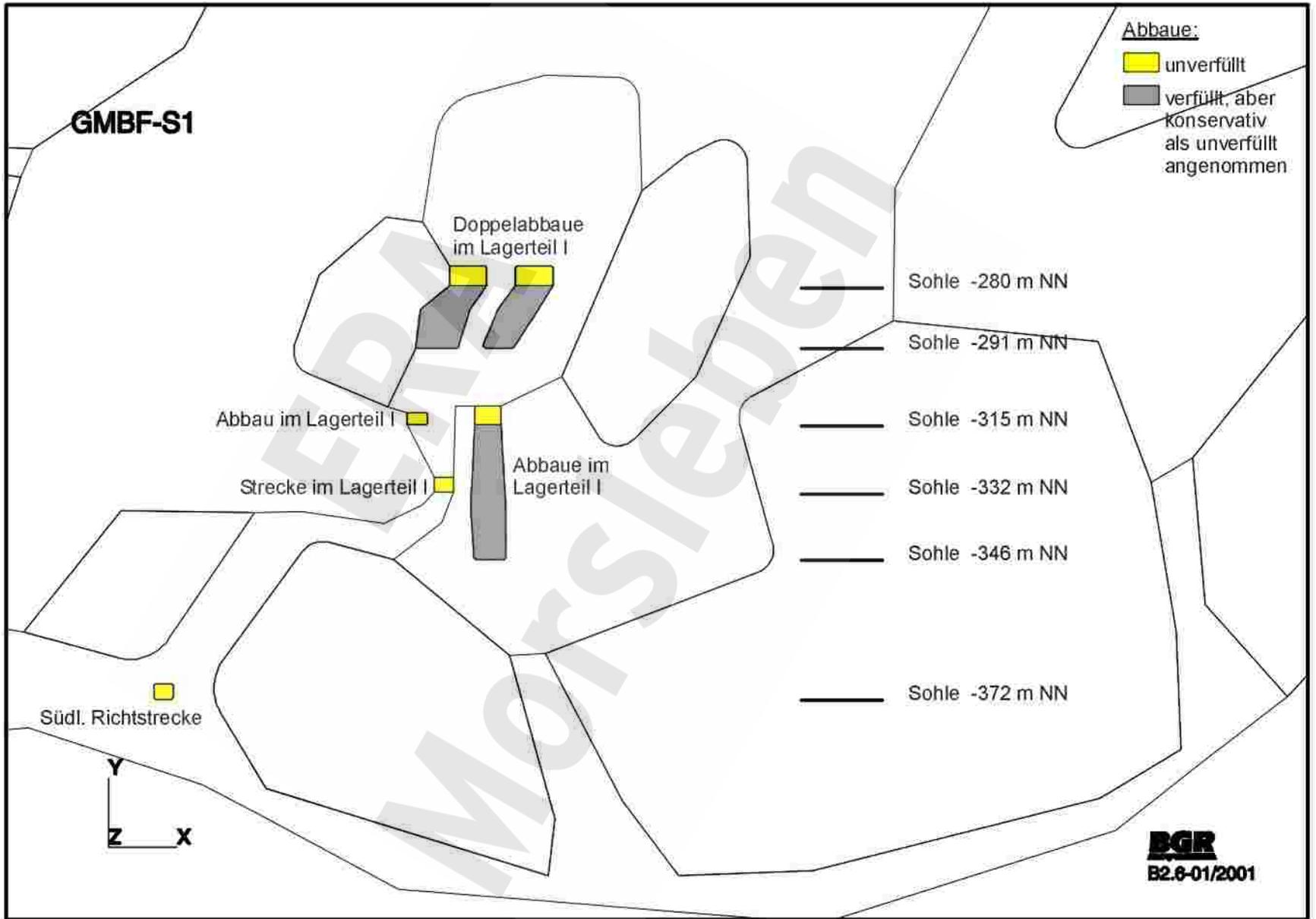


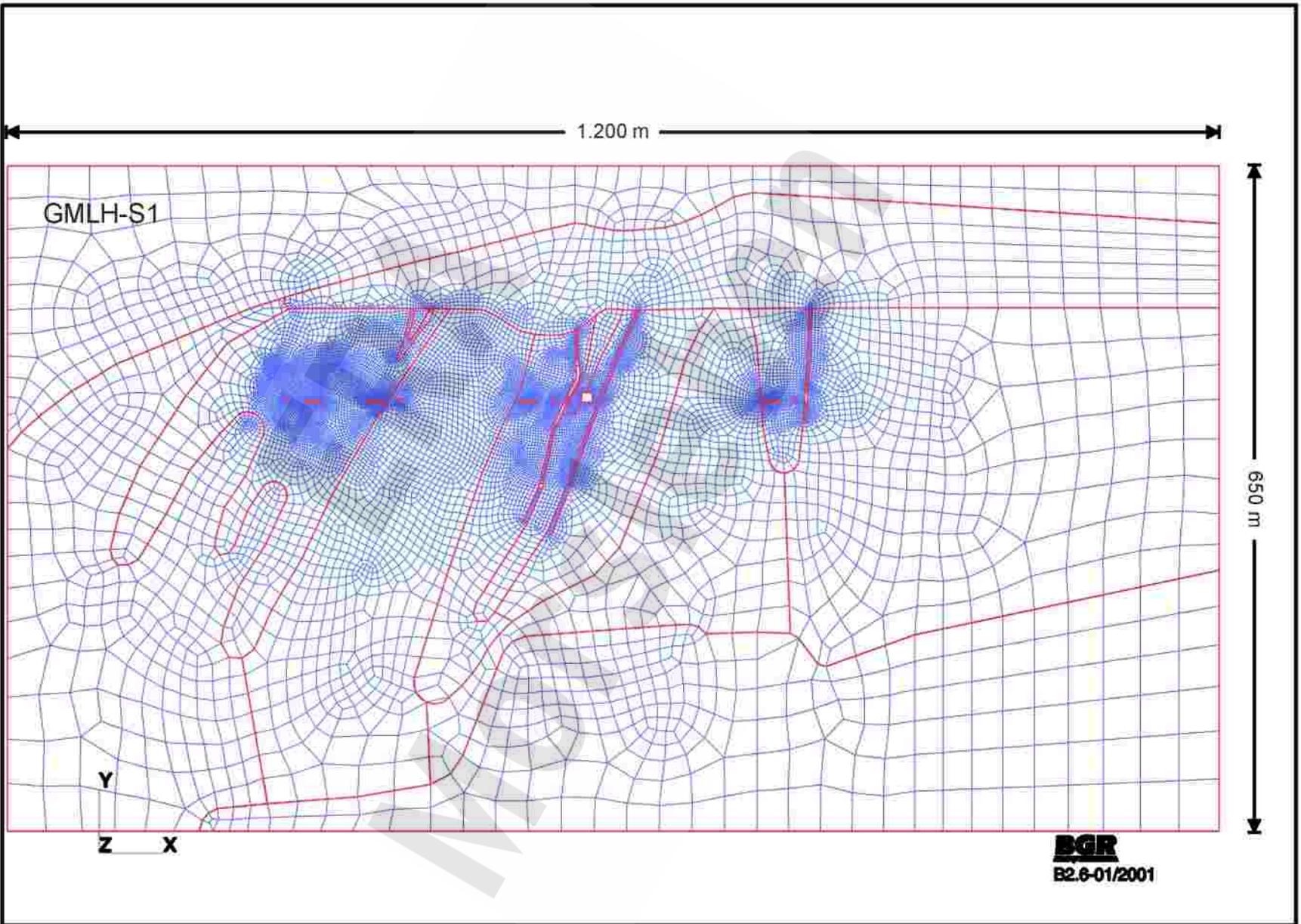
Bunte First
 Modellierter Abbaue, Kammern und Strecken (Ausschnitt 1)



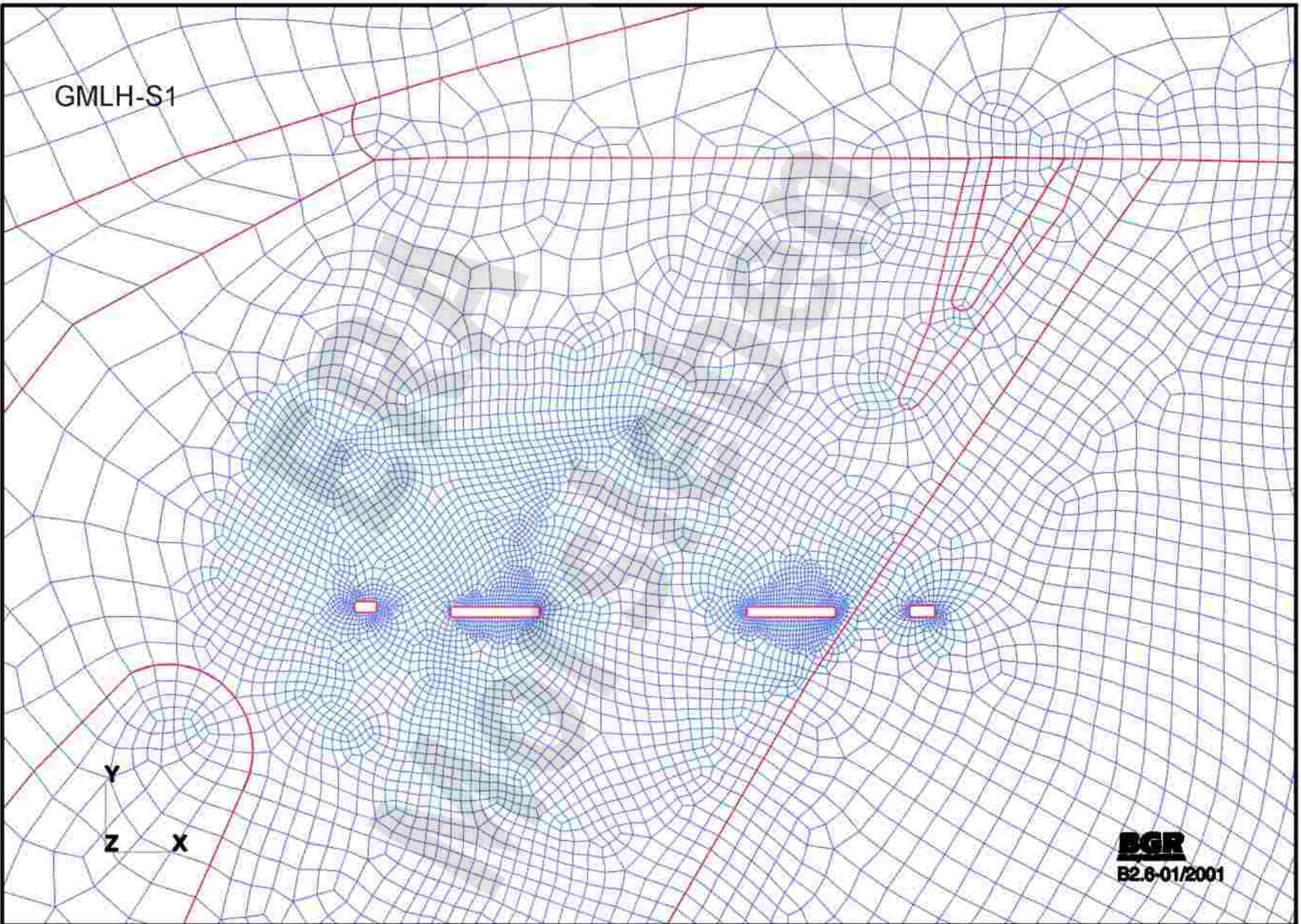
Bunte First
 Modellierte Abbaue, Kammern und Strecken (Ausschnitt 2)

Bunte First
Modellierte Abbaue, Kammern und Strecken (Ausschnitt 3)

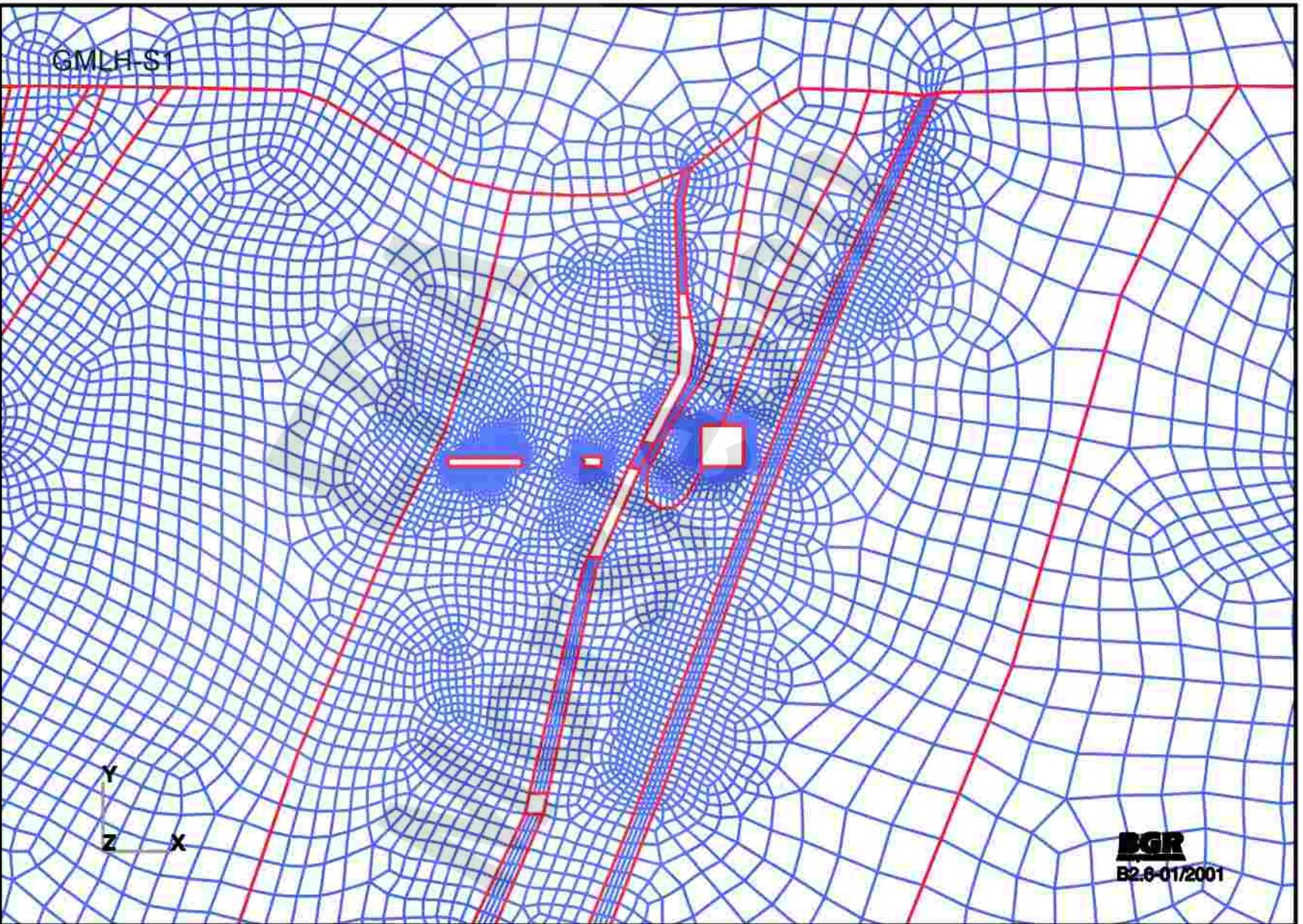




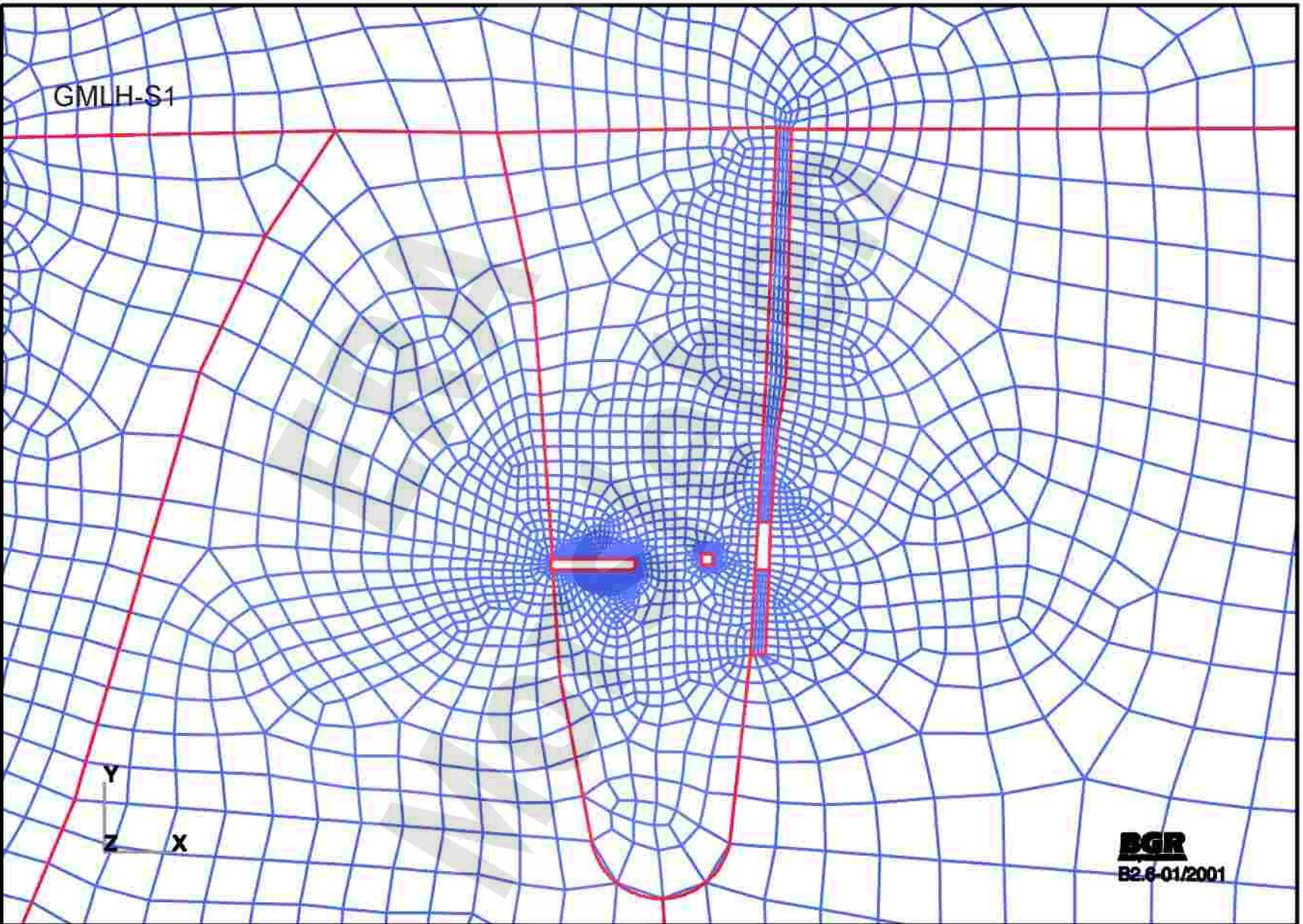
Lager H
FE-Modell GMLH-S1 (Gesamtdarstellung)



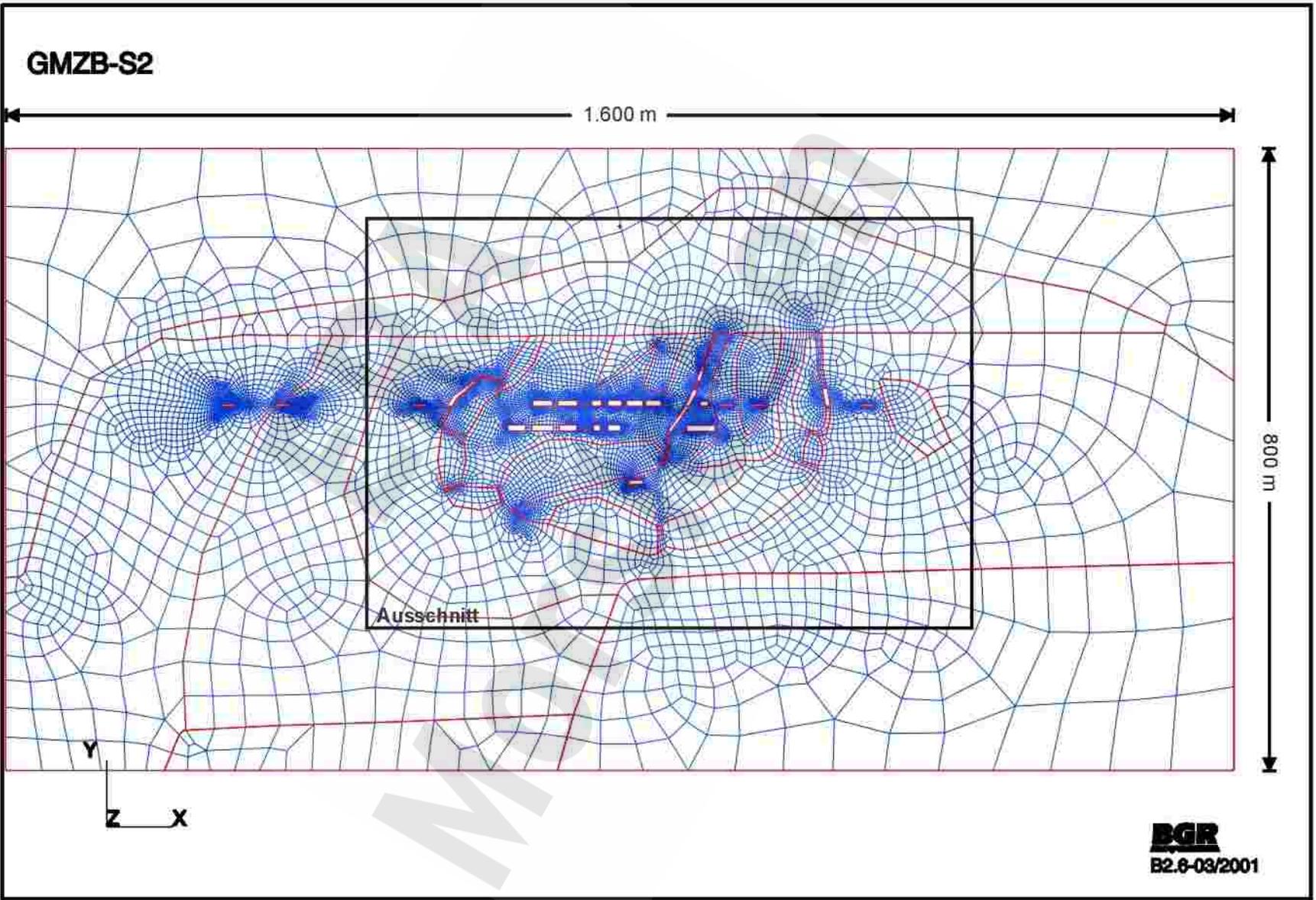
Lager H
FE-Modell GMLH-S1 (Ausschnitt 1)



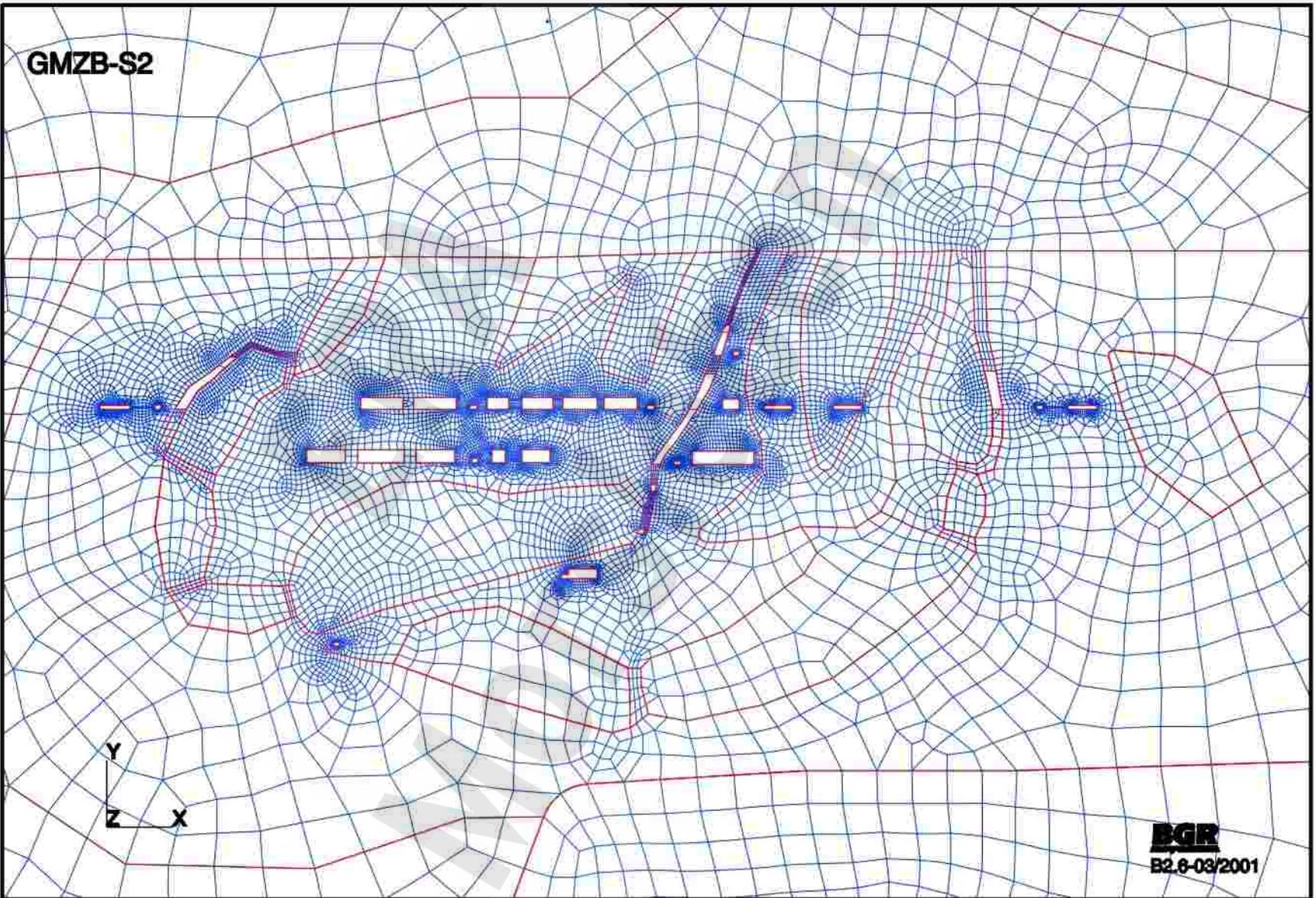
Lager H
FE-Modell GMLH-S1 (Ausschnitt 2)



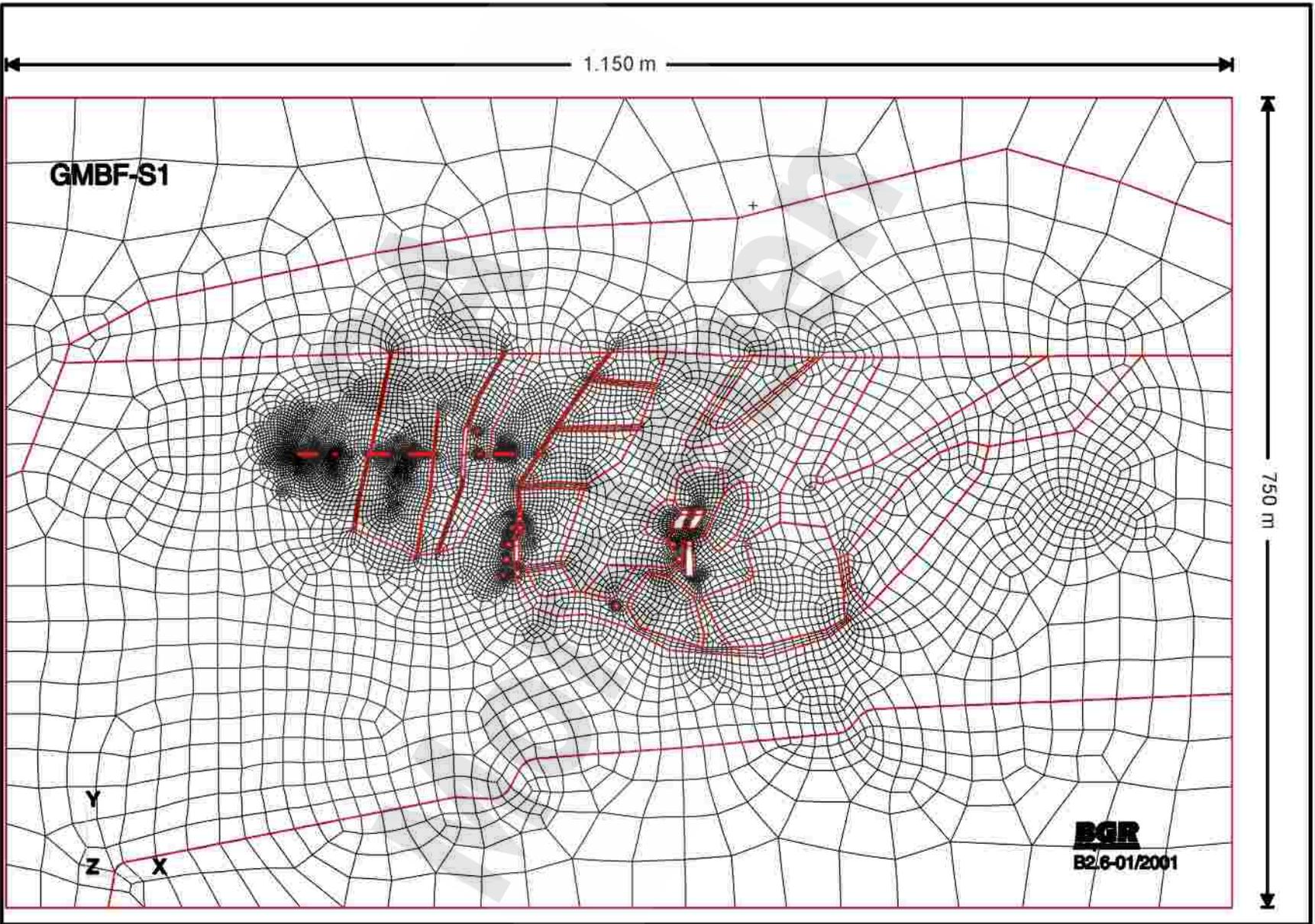
Lager H
FE-Modell GMLH-S1 (Ausschnitt 3)



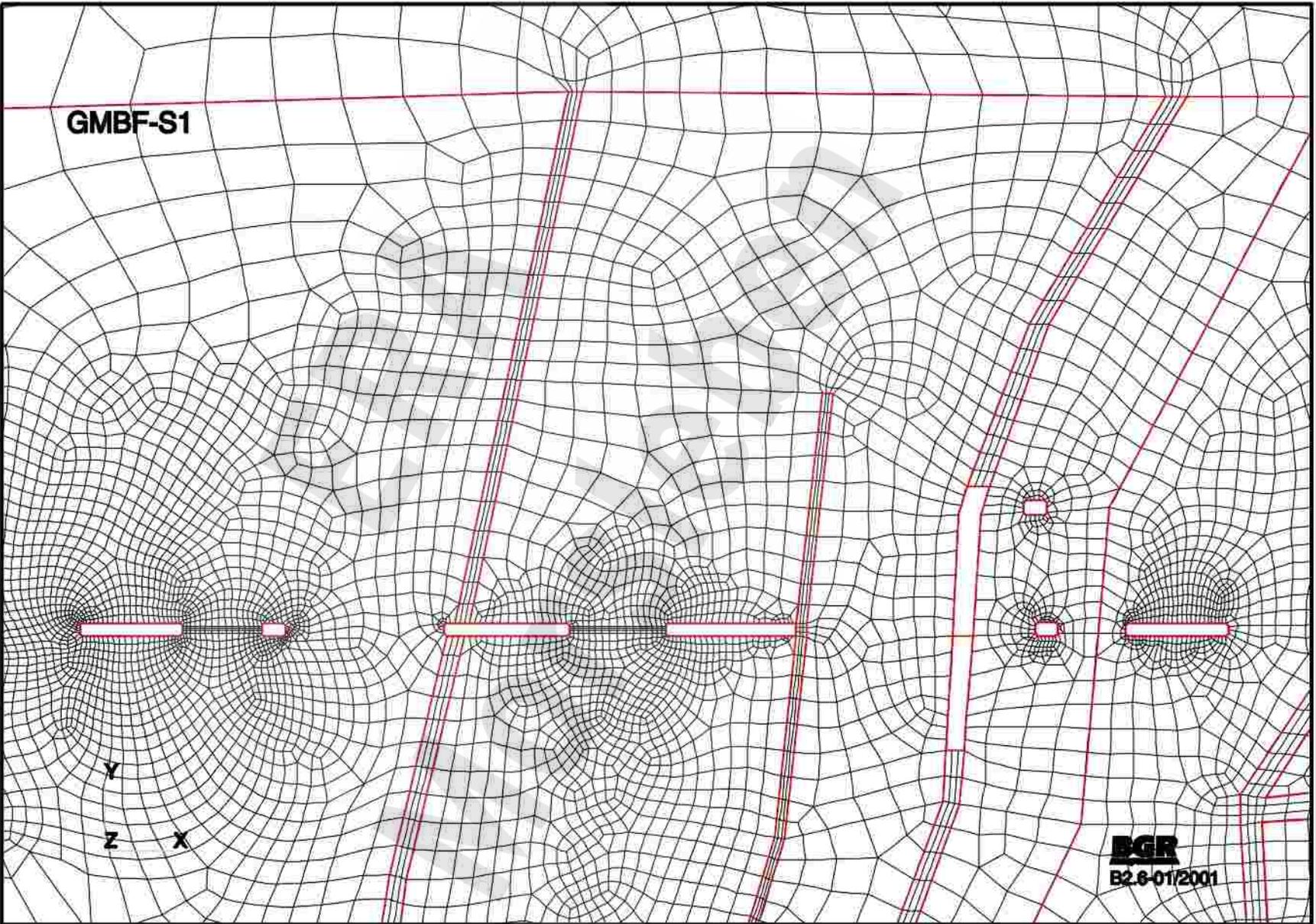
Zentralbereich
FE-Modell GMZB-S2 (Gesamtdarstellung)



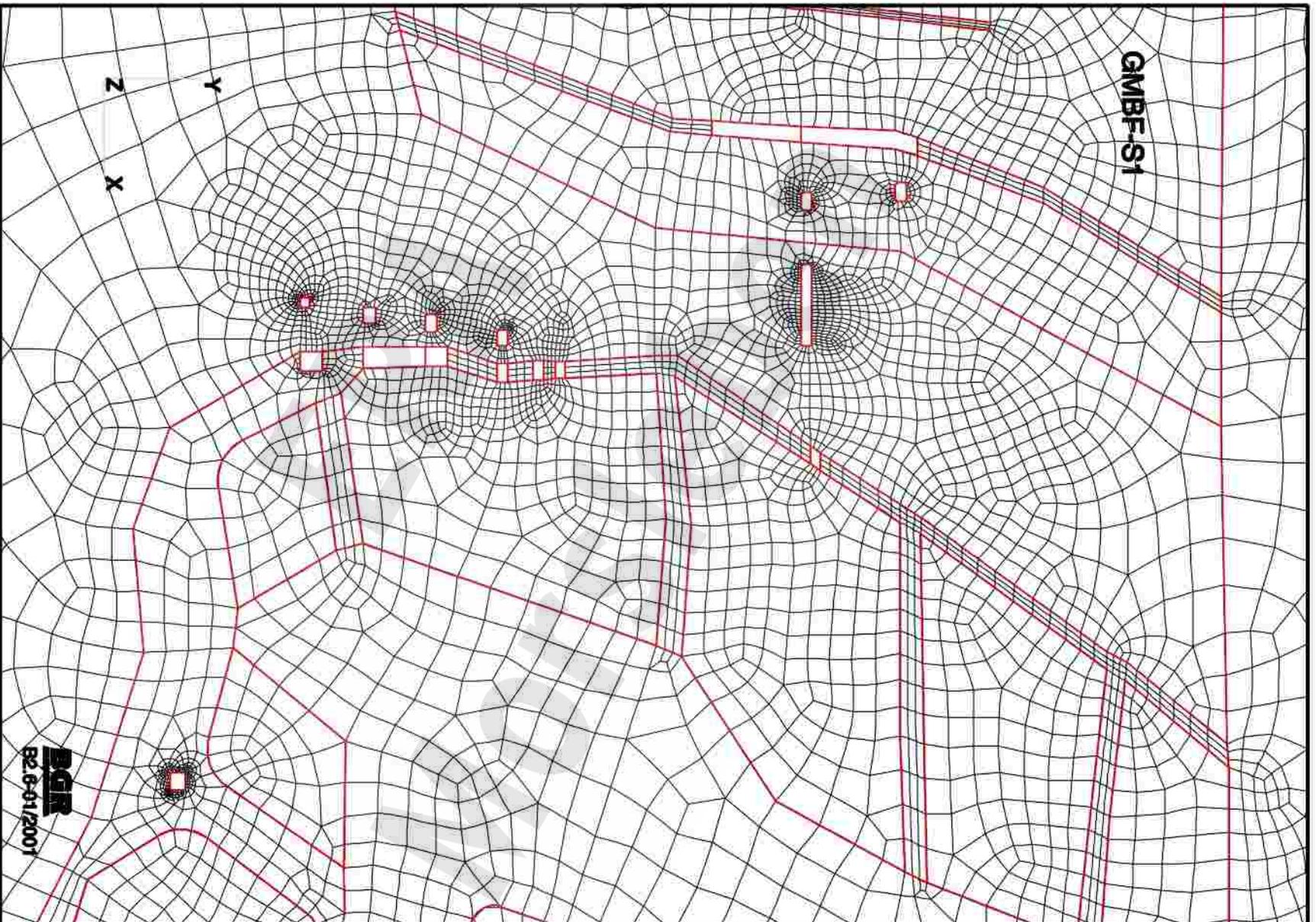
Zentralbereich
FE-Modell GMZB-S2 (Ausschnitt)



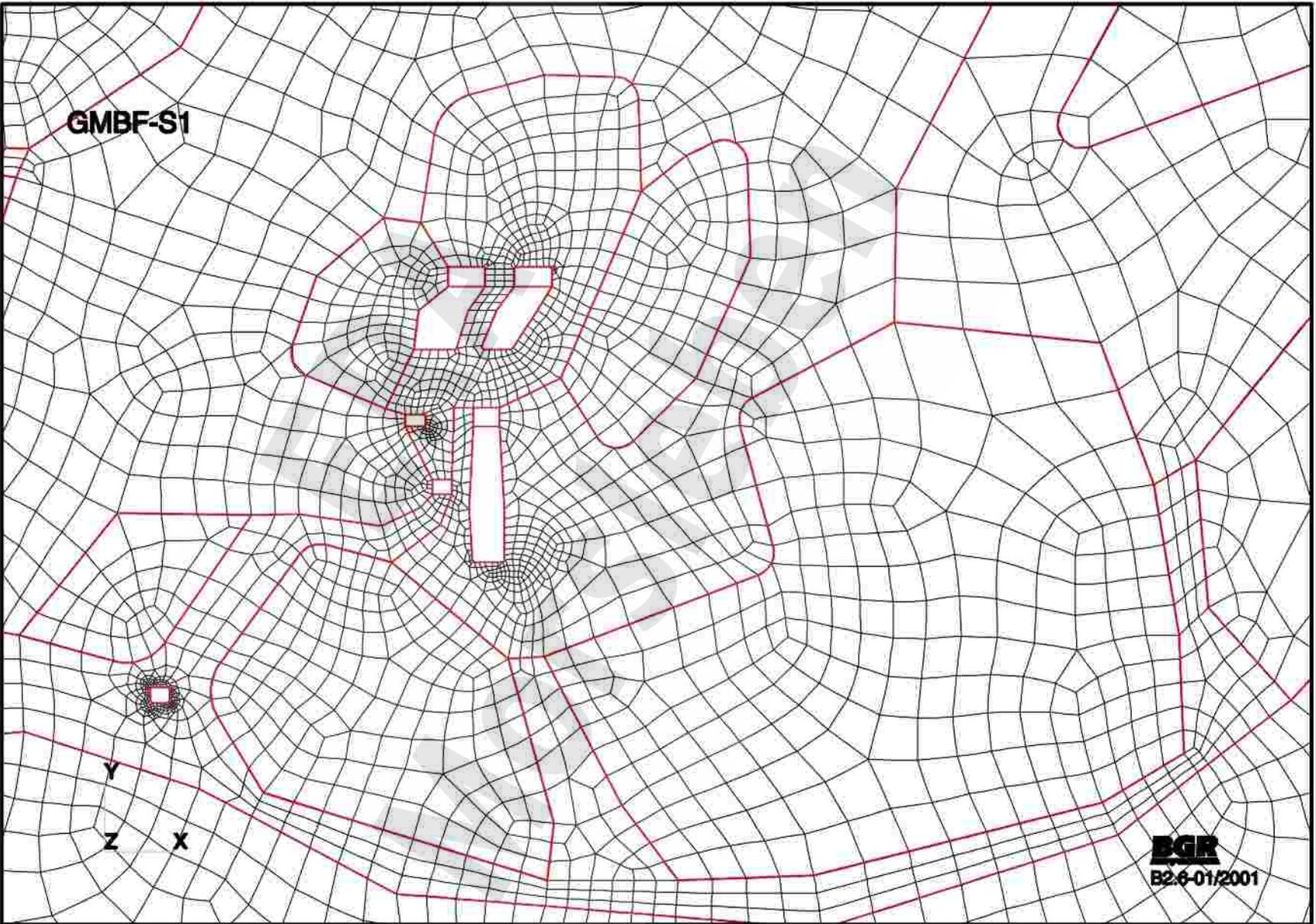
Bunte First
FE-Modell GMBF-S1 (Gesamtdarstellung)



Bunte First
FE-Modell GMBF-S1 (Ausschnitt 1)



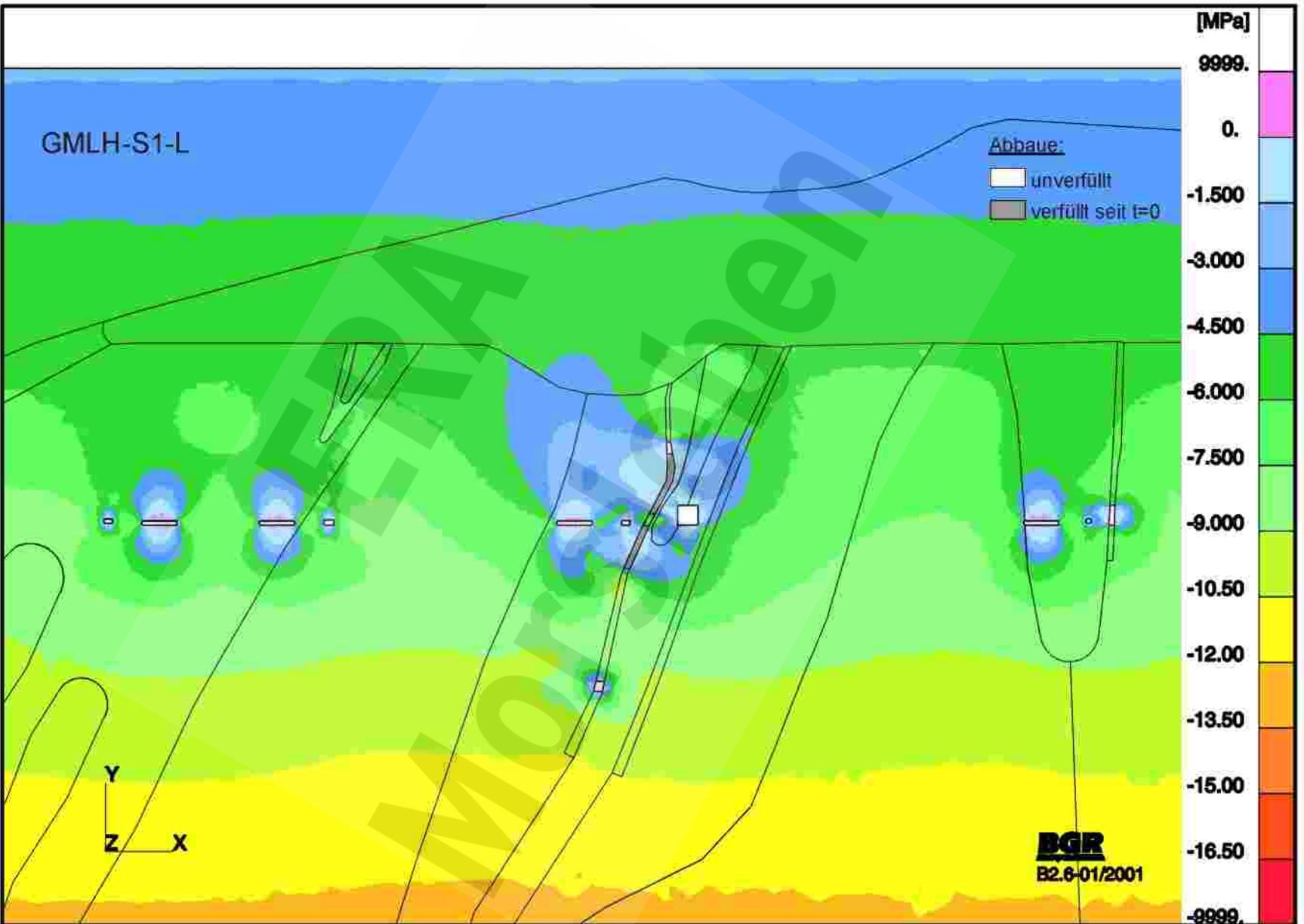
Bunte First
FE-Modell GMBF-S1 (Ausschnitt 2)

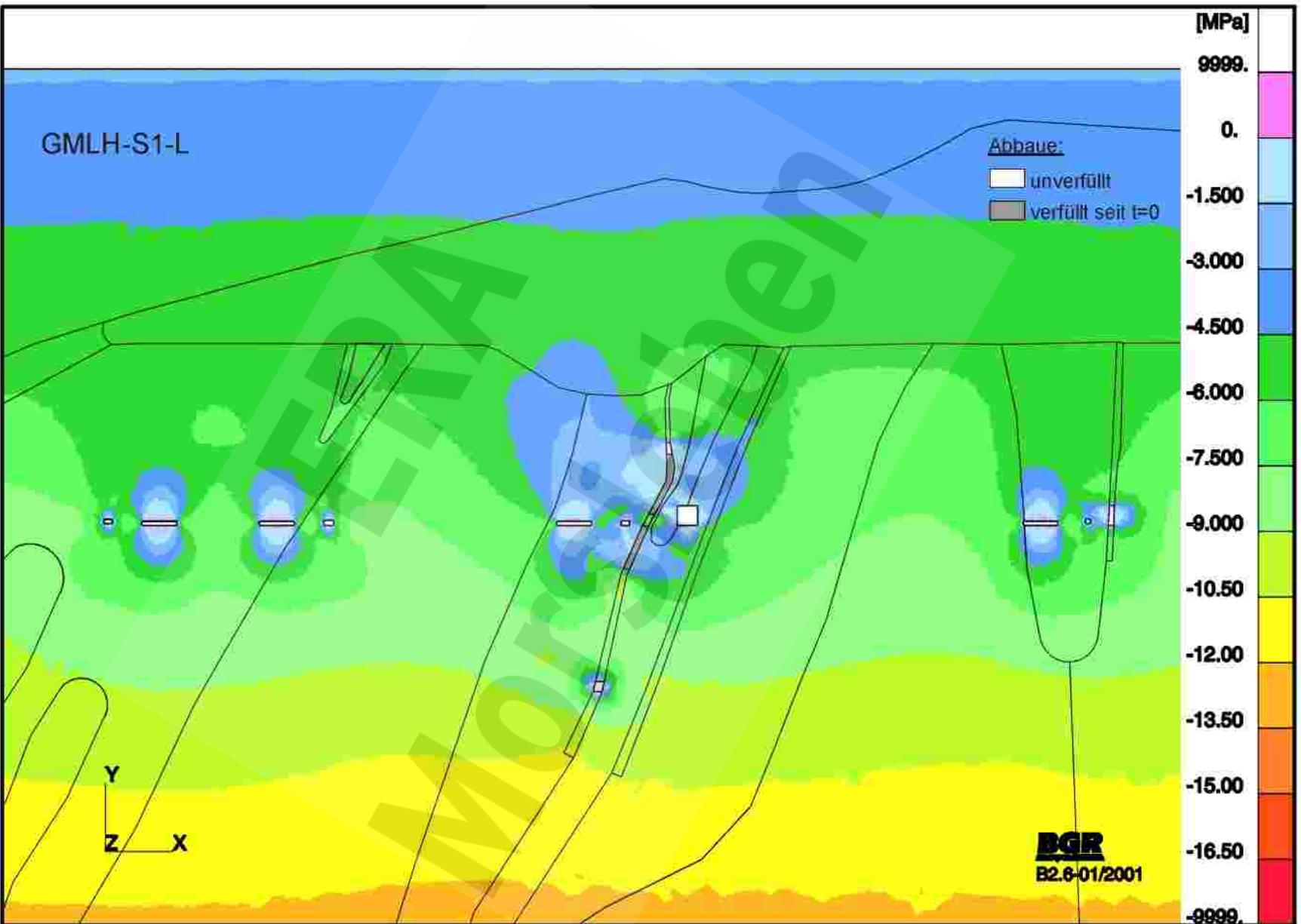


GMBF-S1

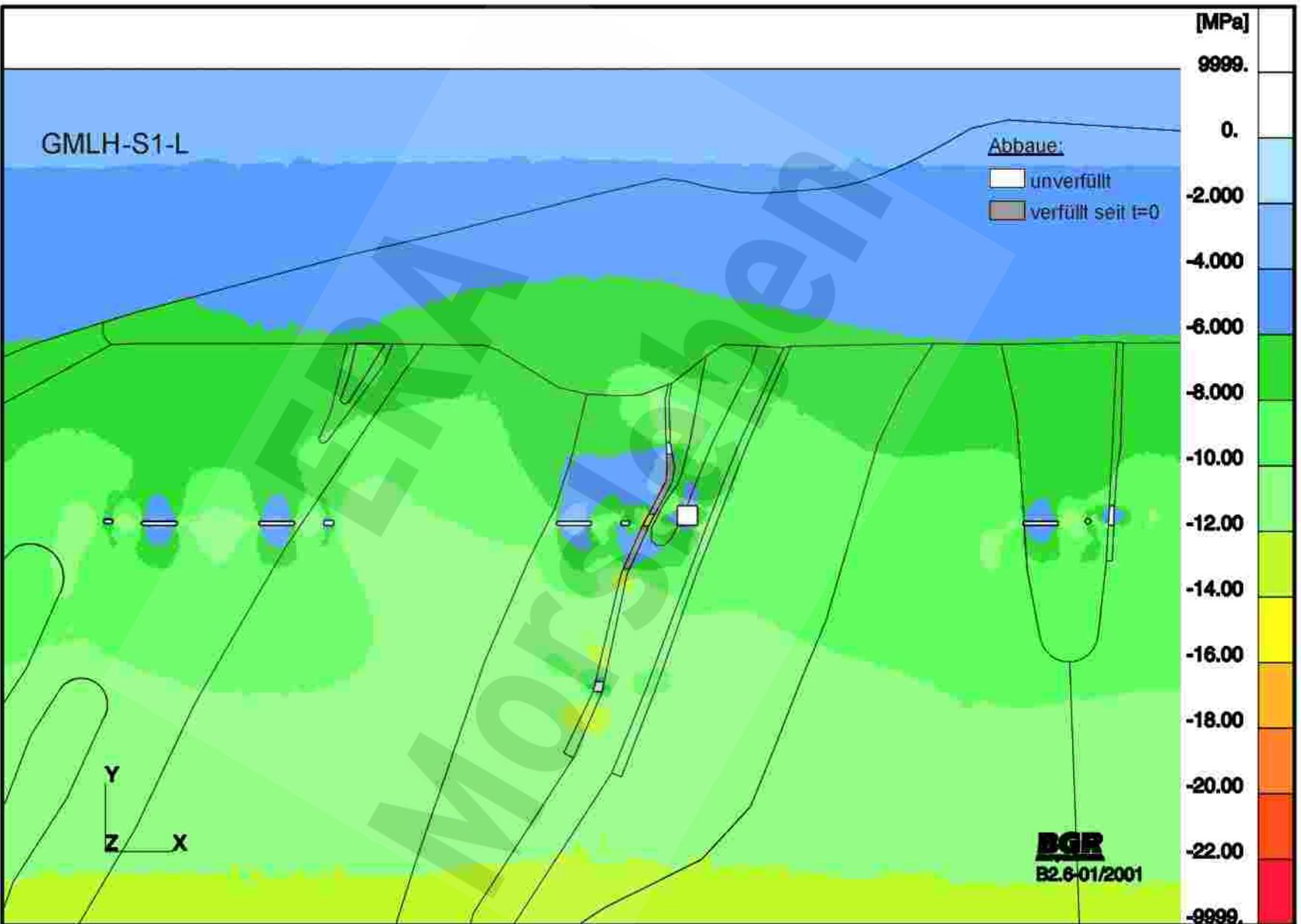
BGR
B2.6-01/2001

Bunte First
FE-Modell GMBF-S1 (Ausschnitt 3)

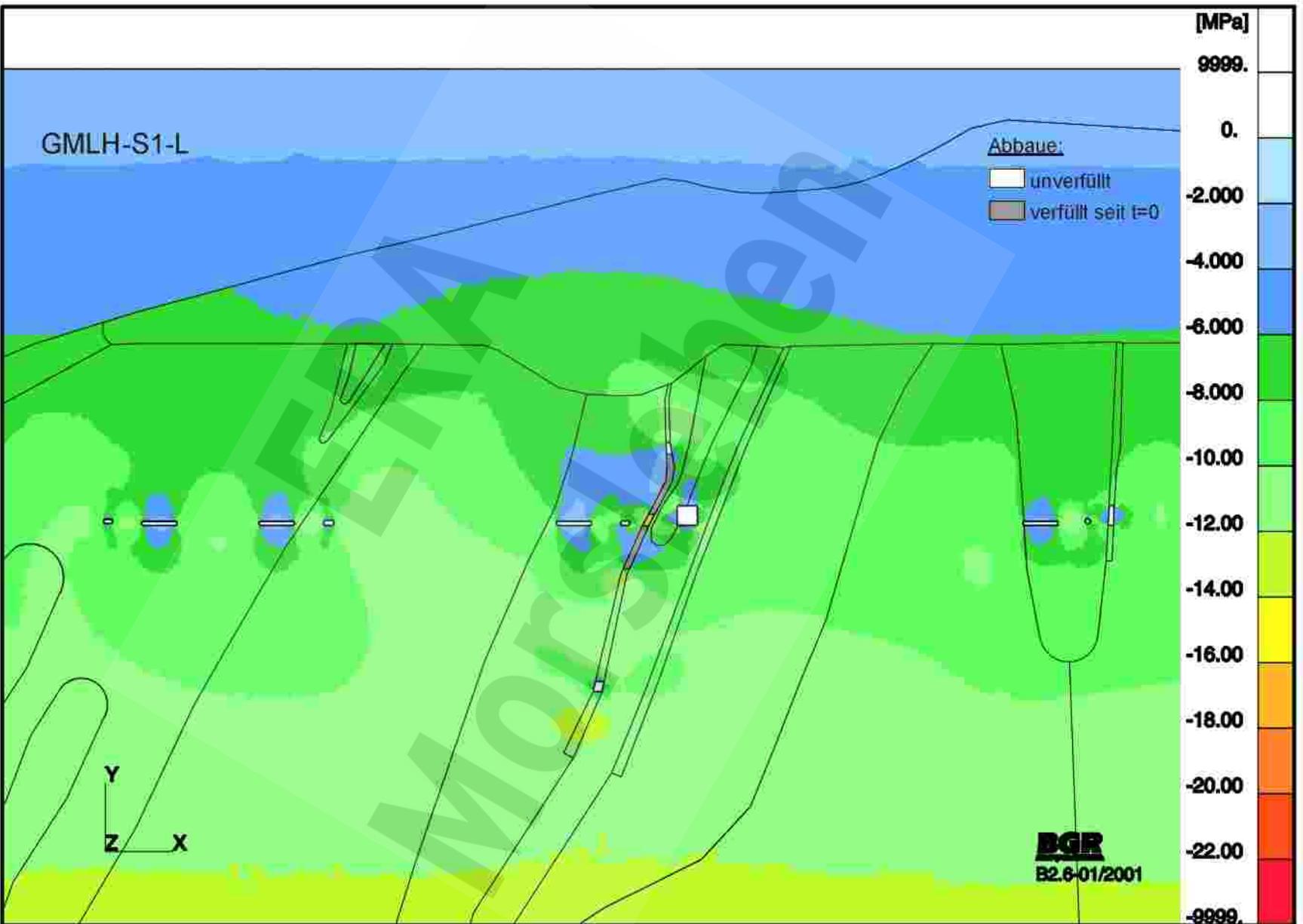




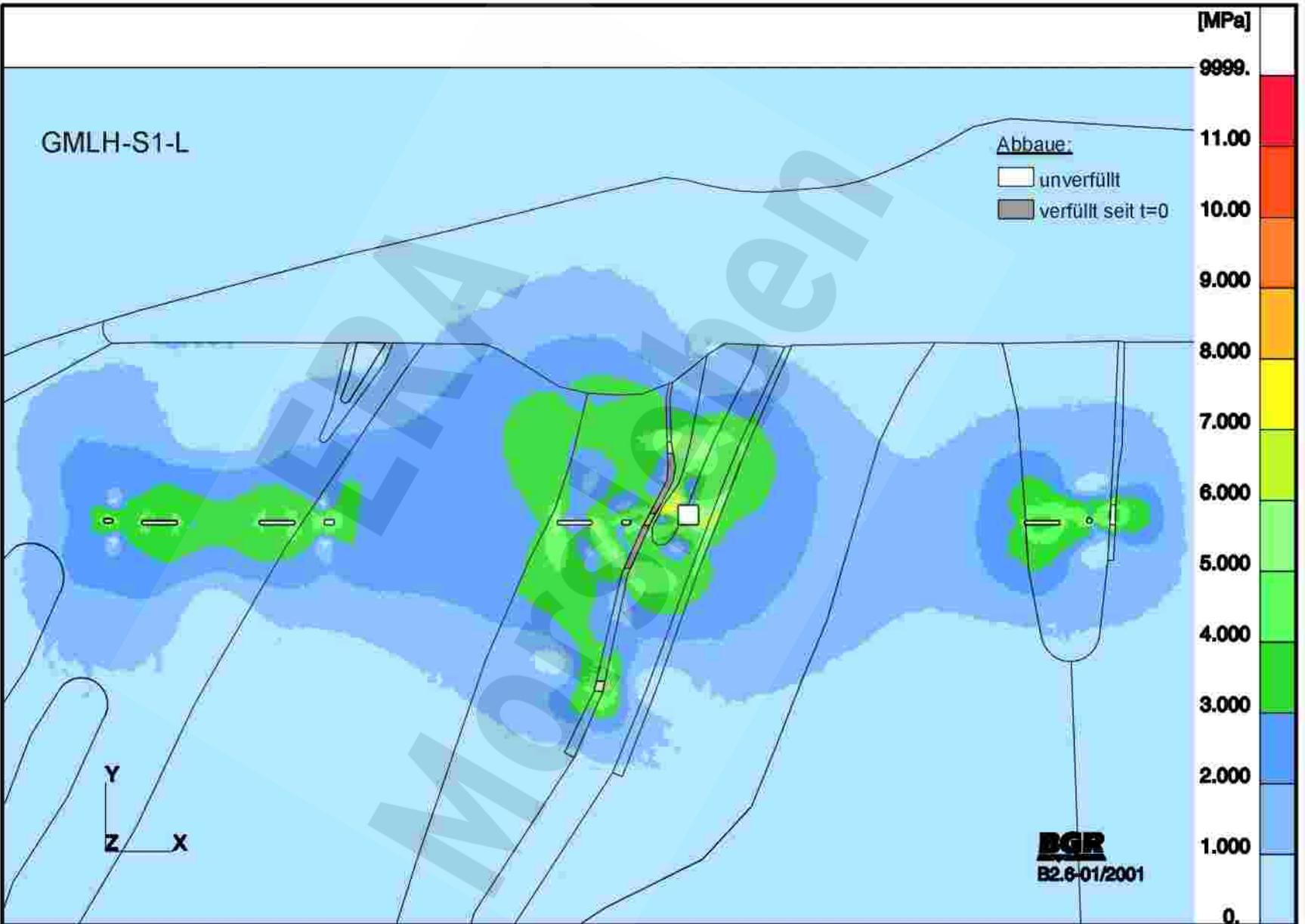
GMLH-S1-L: Referenzmodell
 Kleinste Hauptdruckspannungen S1 nach 150 Jahren



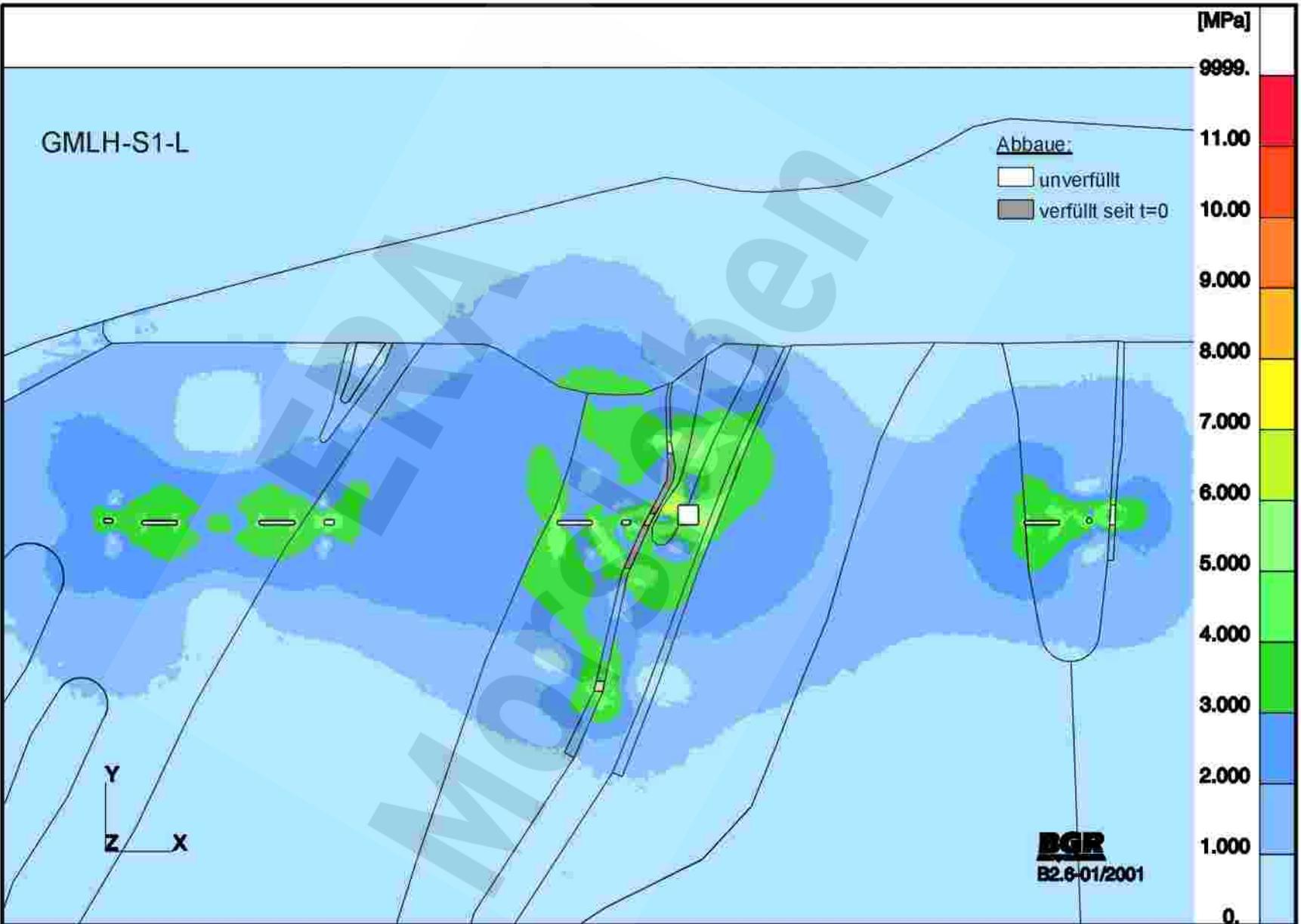
GMLH-S1-L: Referenzmodell
Grossste Hauptdruckspannungen S2 nach 80 Jahren



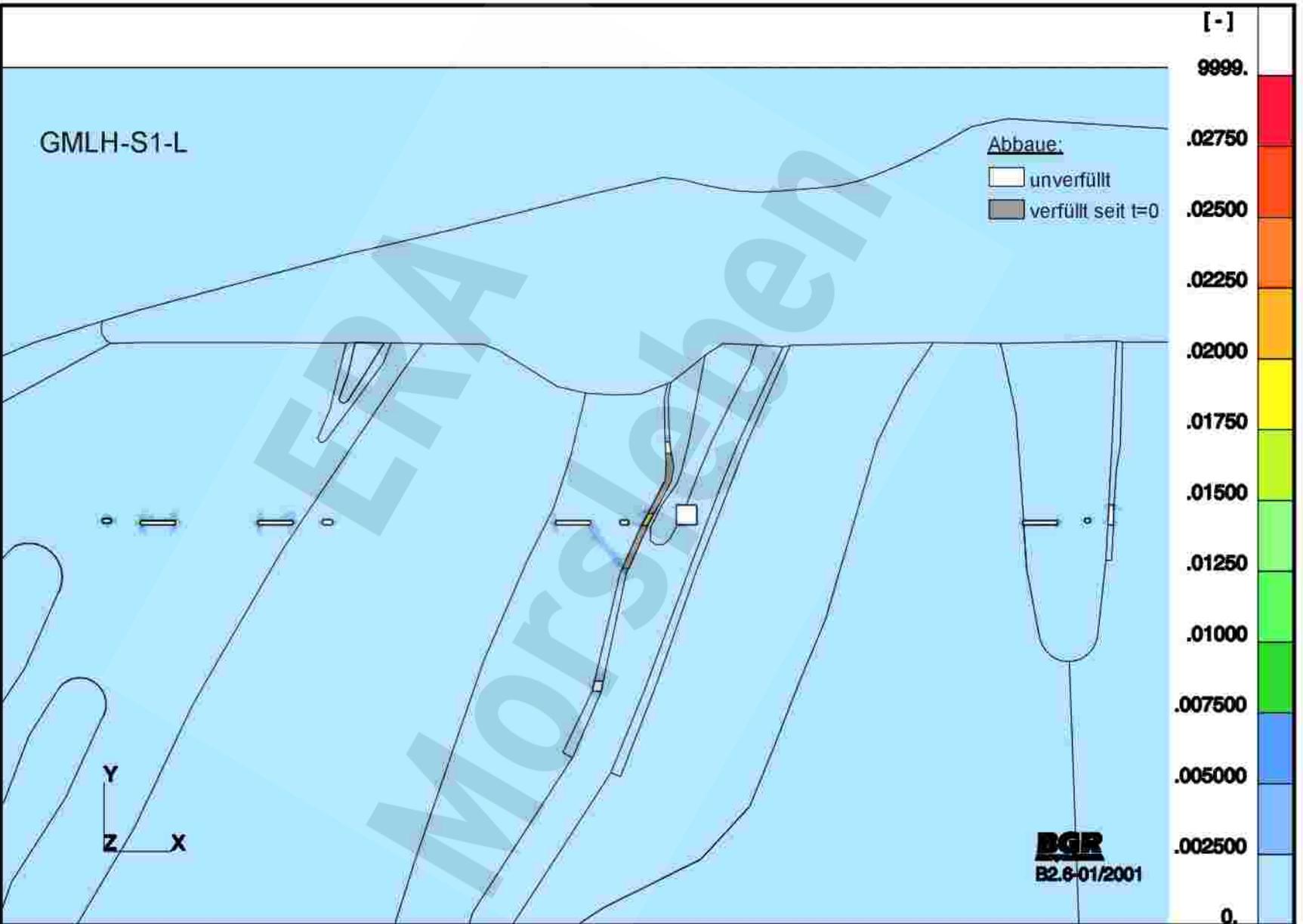
GMLH-S1-L: Referenzmodell
 Groesste Hauptdruckspannungen S2 nach 150 Jahren



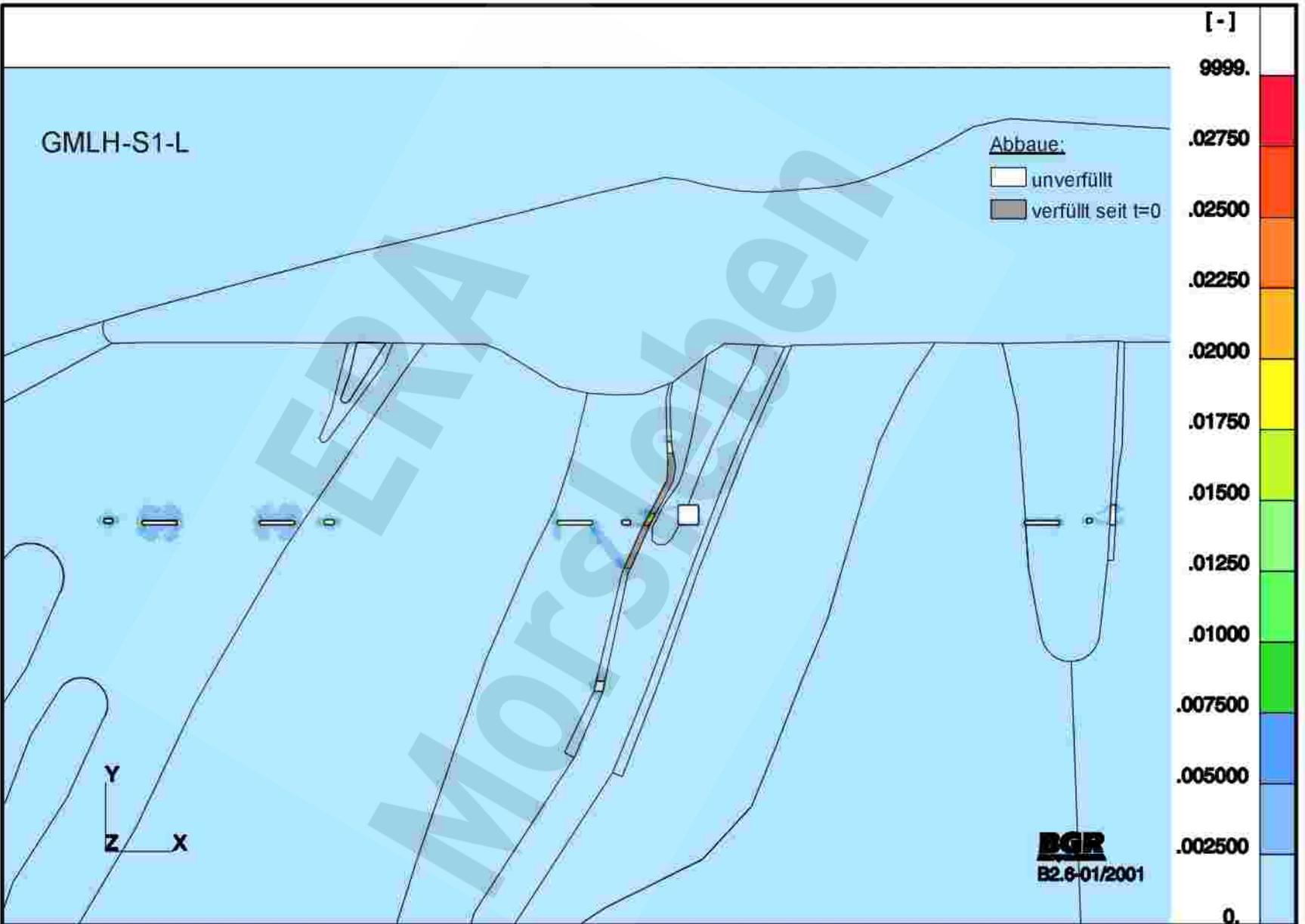
GMLH-S1-L: Referenzmodell
 Effektivspannungen nach 80 Jahren



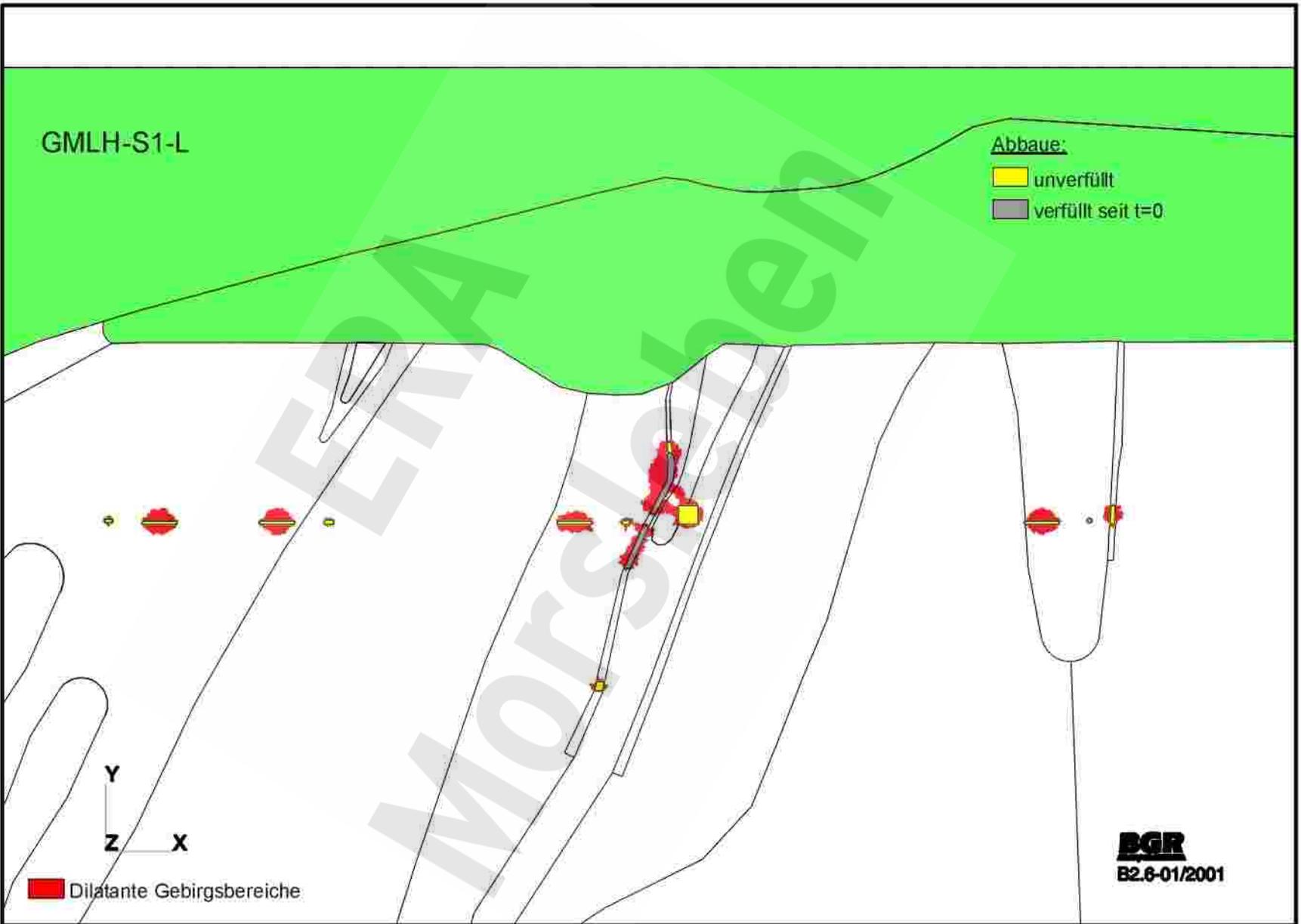
GMLH-S1-L: Referenzmodell
 Effektivspannungen nach 150 Jahren



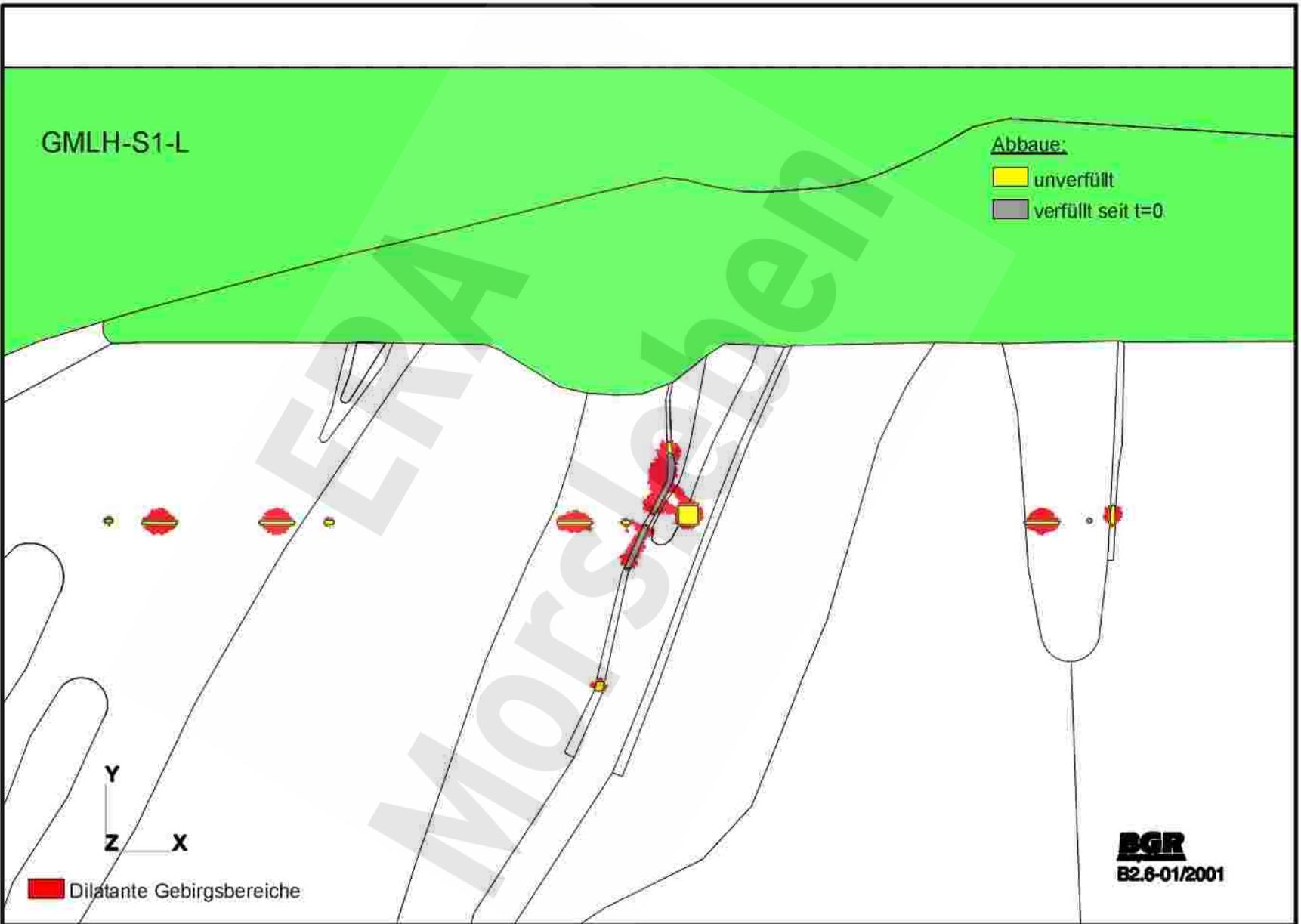
GMLH-S1-L: Referenzmodell
Effektivverzerrungen nach 80 Jahren



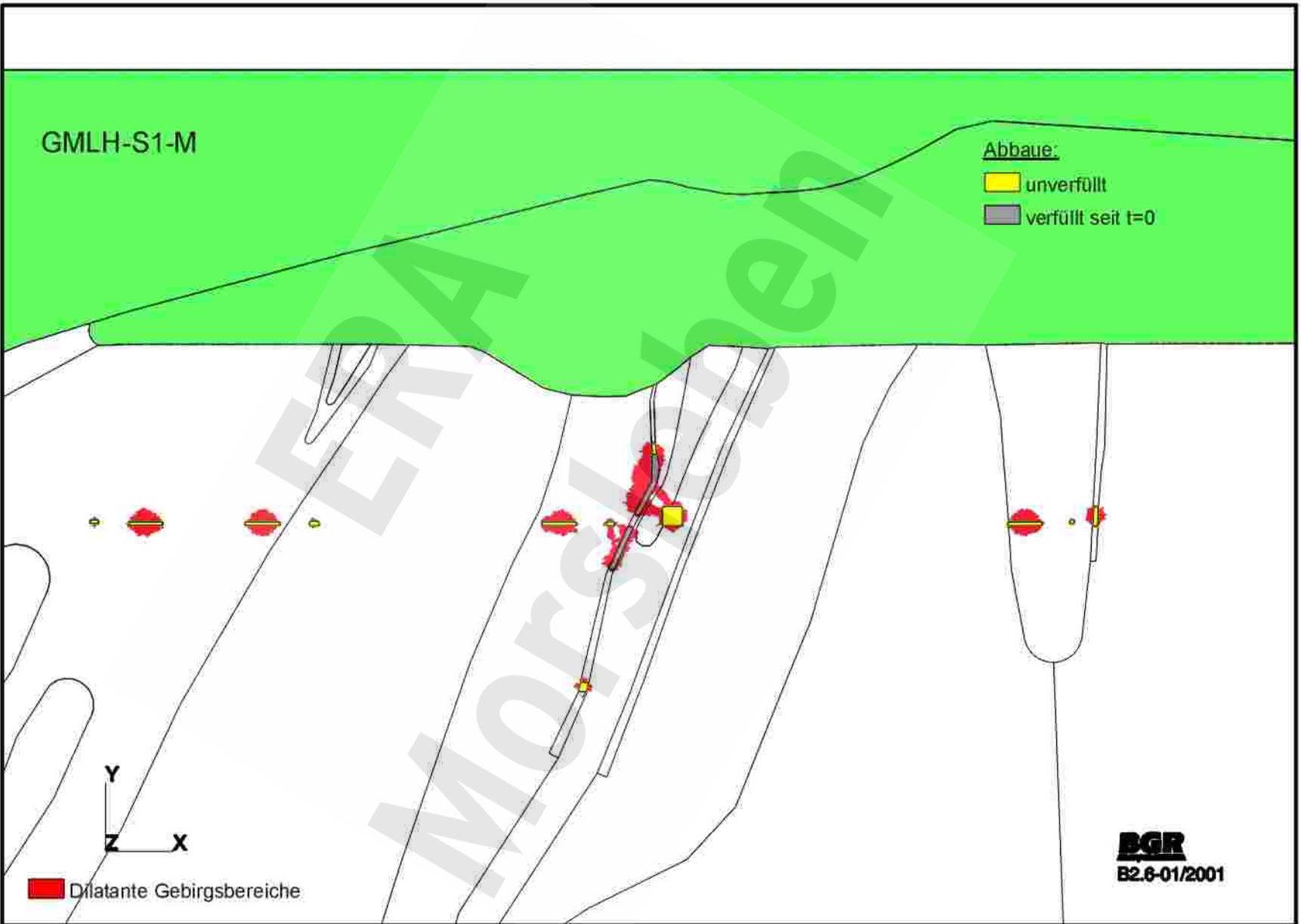
GMLH-S1-L: Referenzmodell
 Effektivverzerrungen nach 150 Jahren



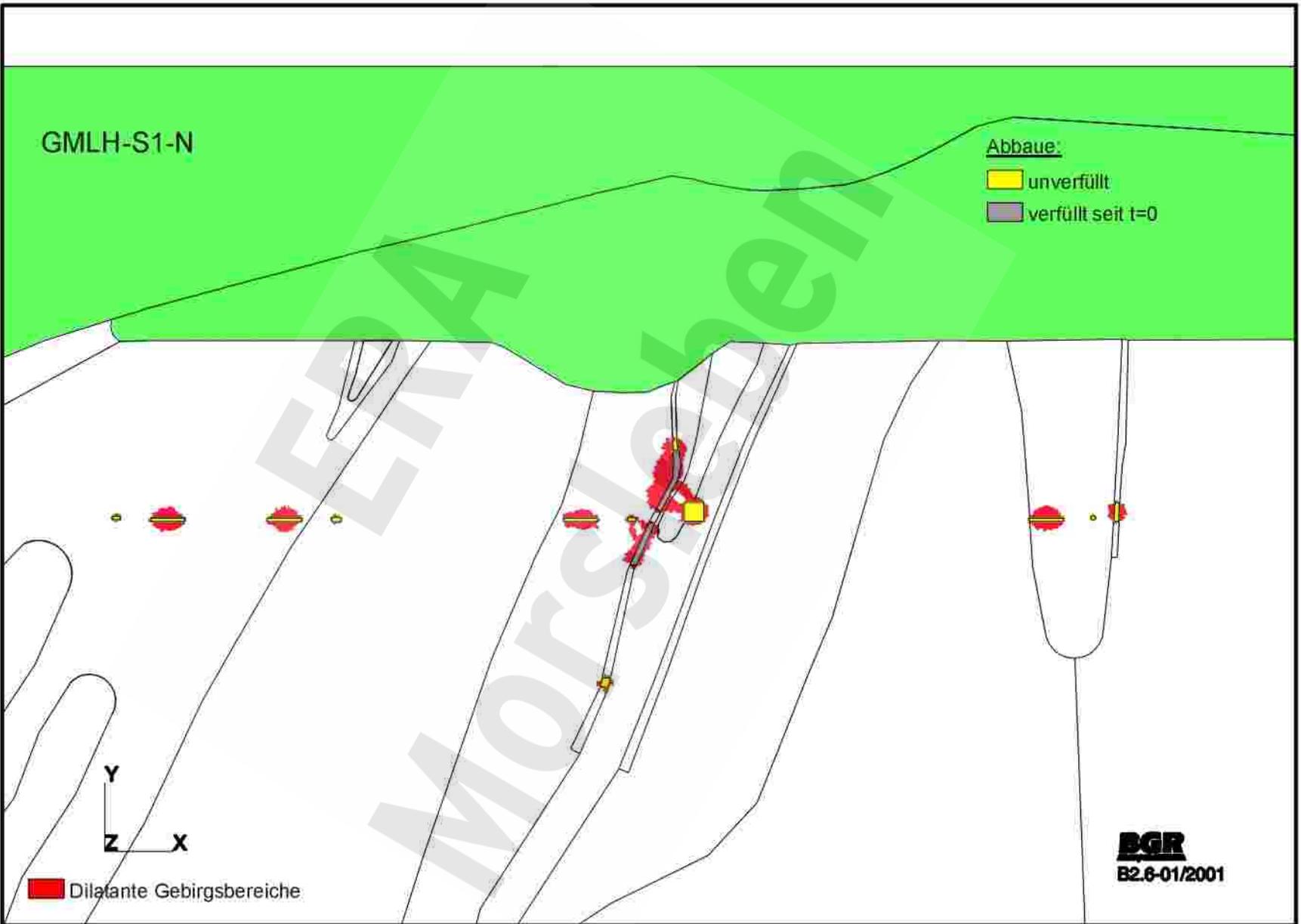
GMLH-S1-L: Referenzmodell
 Dilatante Gebirgsbereiche nach 80 Jahren



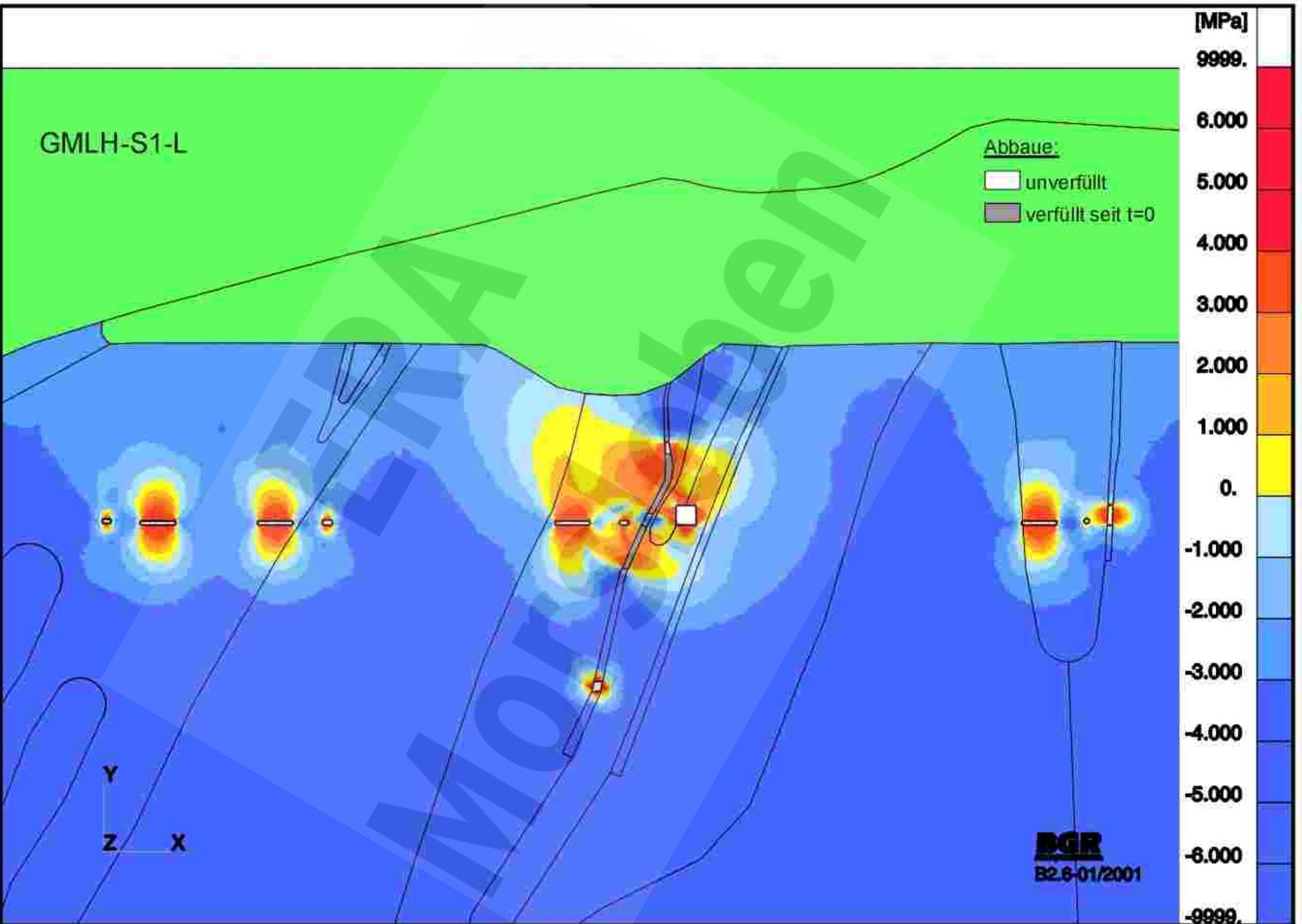
GMLH-S1-L: Referenzmodell
 Dilatante Gebirgsbereiche nach 150 Jahren



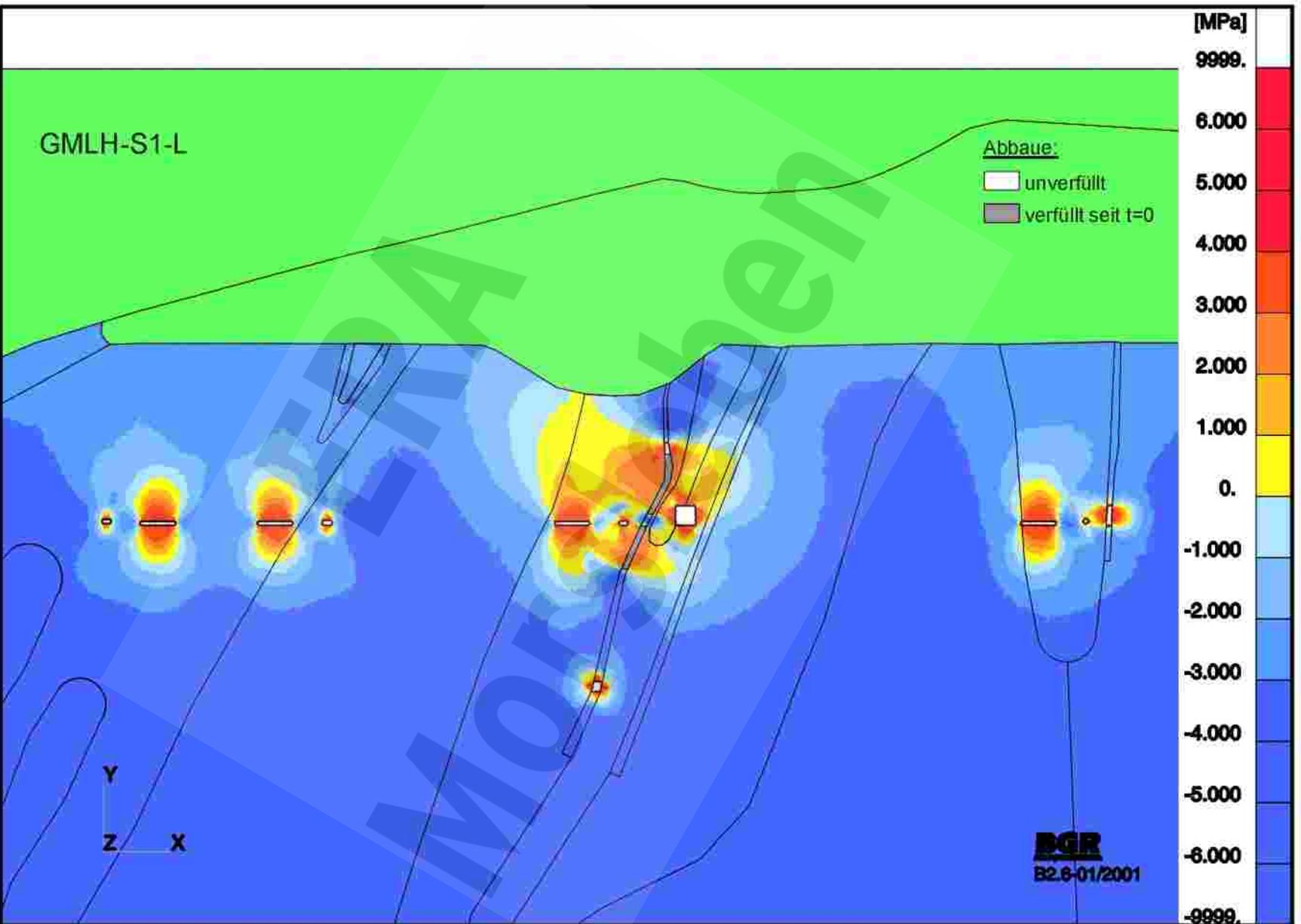
GMLH-S1-M: Verminderte Duktilitaet
 Dilatante Gebirgsbereiche nach 150 Jahren



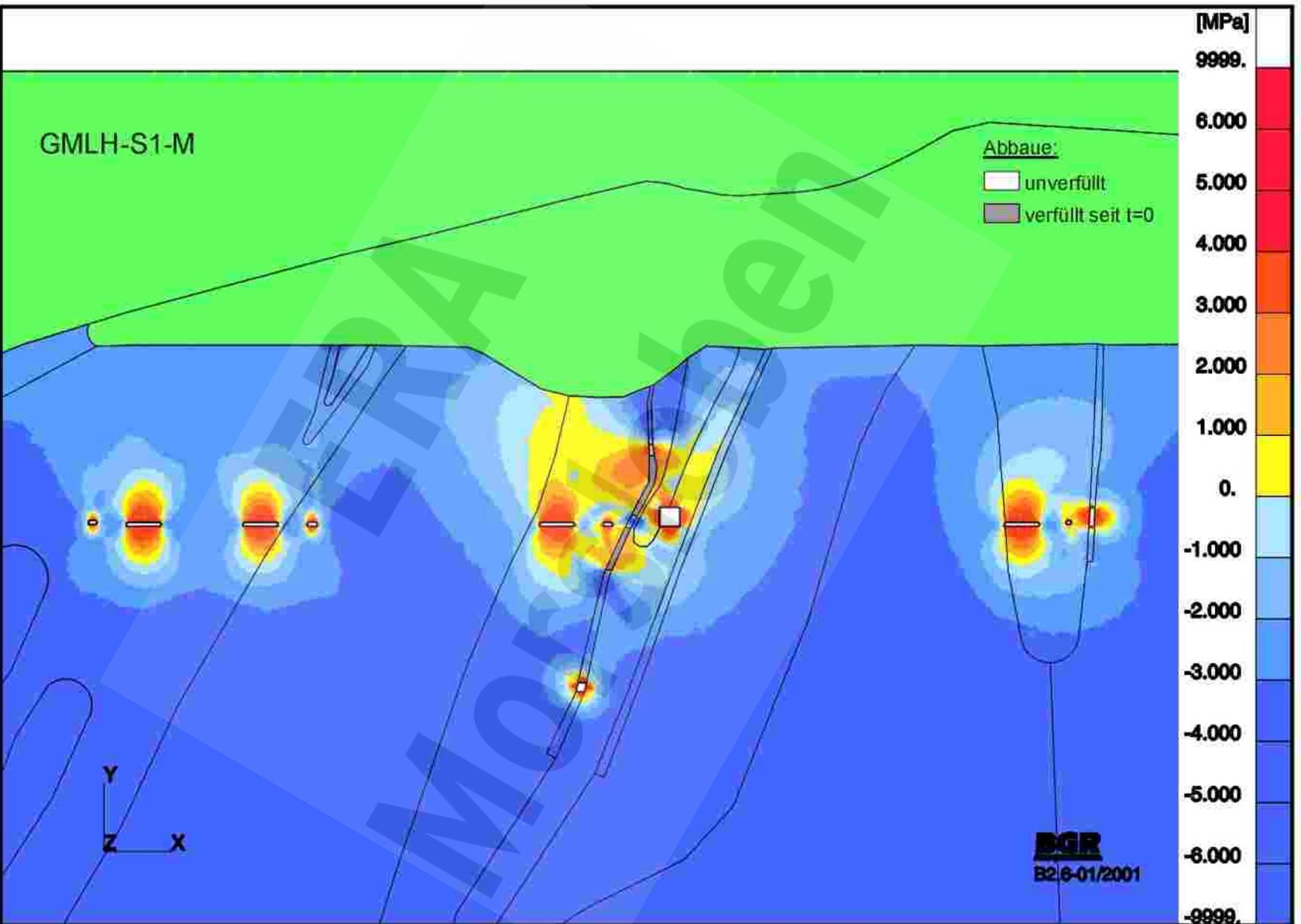
GMLH-S1-N: Verminderte Duktilitaet
 Dilatante Gebirgsbereiche nach 150 Jahren



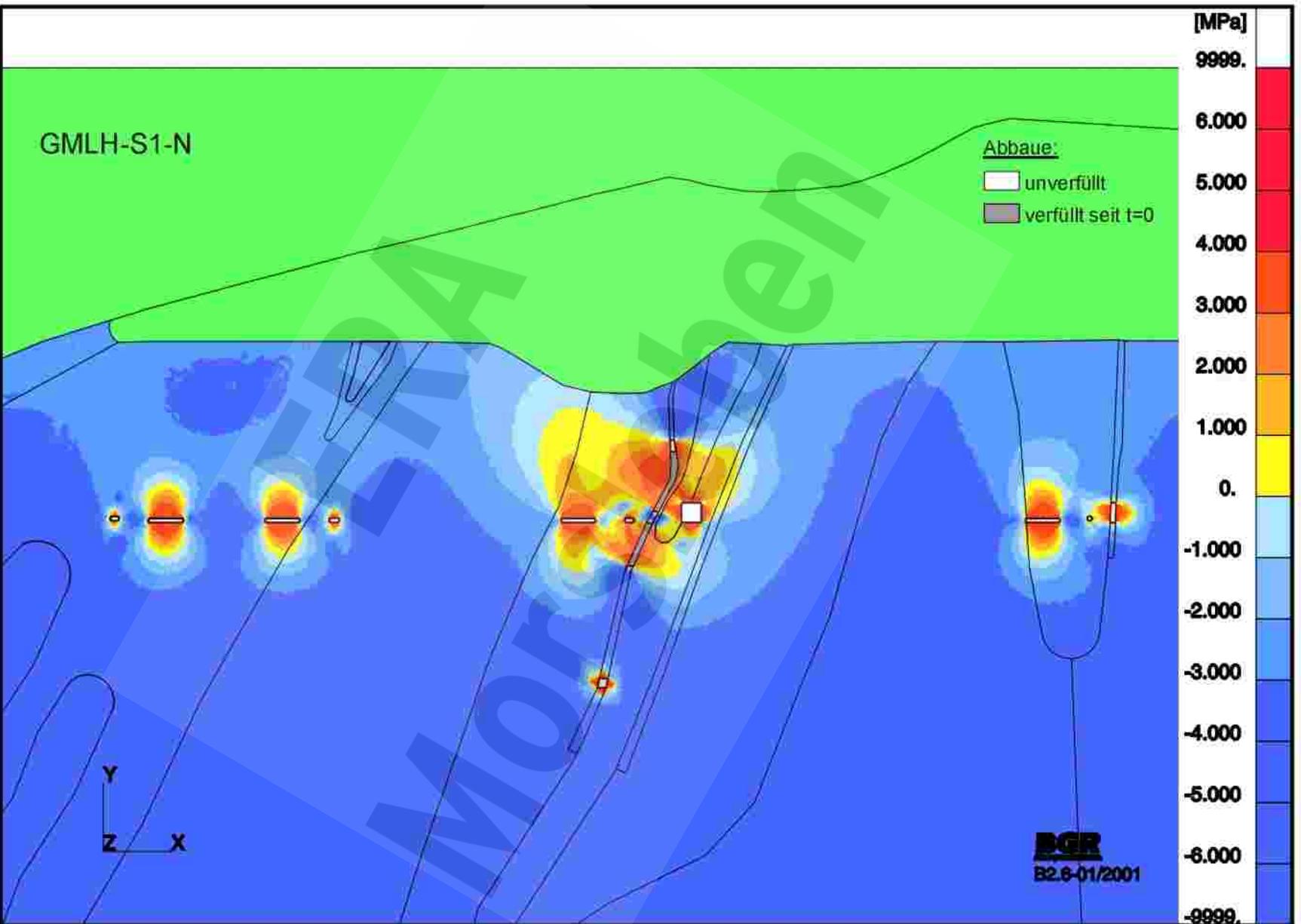
GMLH-S1-L: Referenzmodell
 Hypothetisch laugendruckgefaehrte Bereiche nach 80 Jahren



GMLH-S1-L: Referenzmodell
 Hypothetisch laugendruckgefaehrte Bereiche nach 150 Jahren

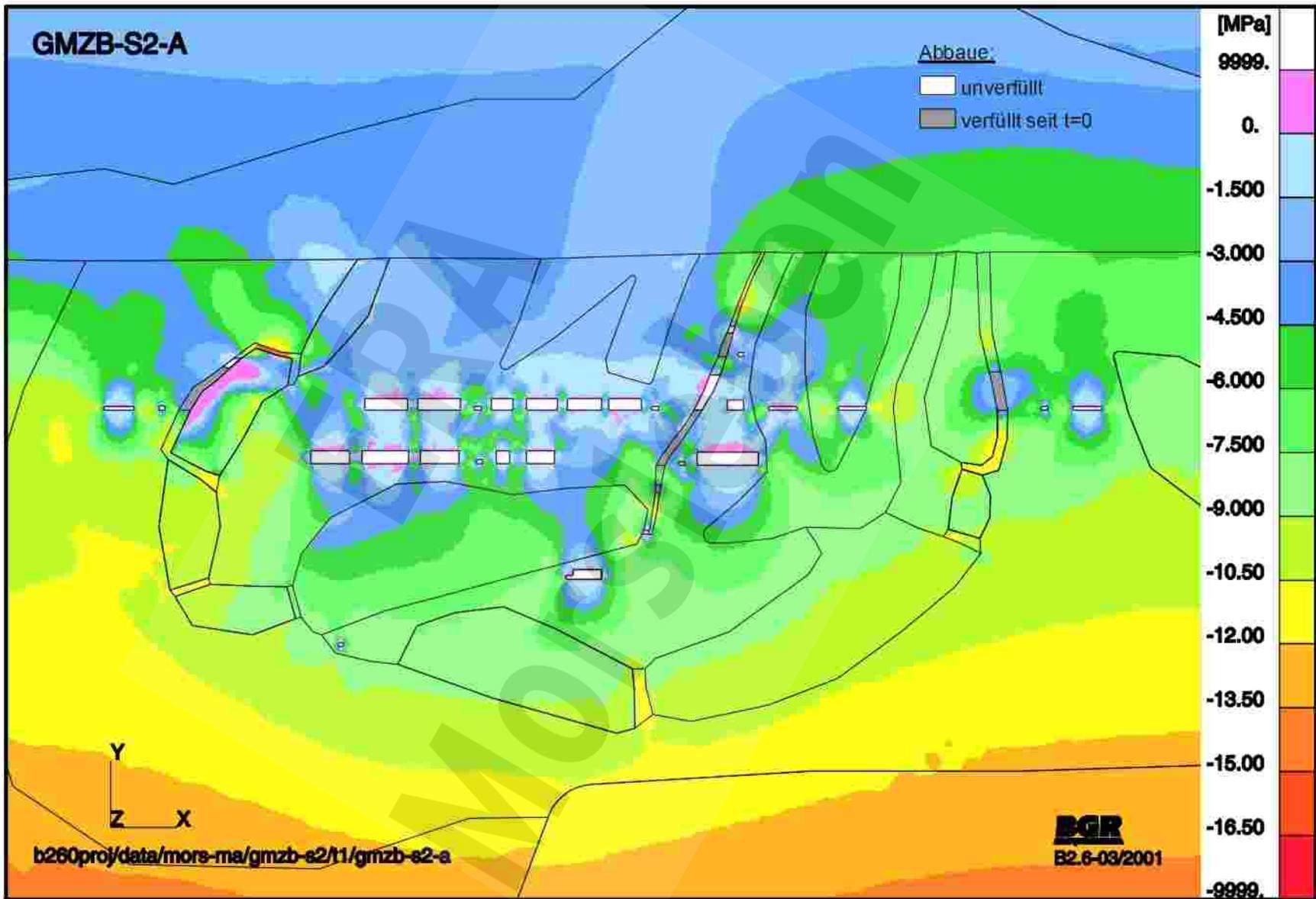


GMLH-S1-M: Erhoehnte Duktilitaet
 Hypothetisch laugendruckgefaehrdete Bereiche nach 150 Jahren

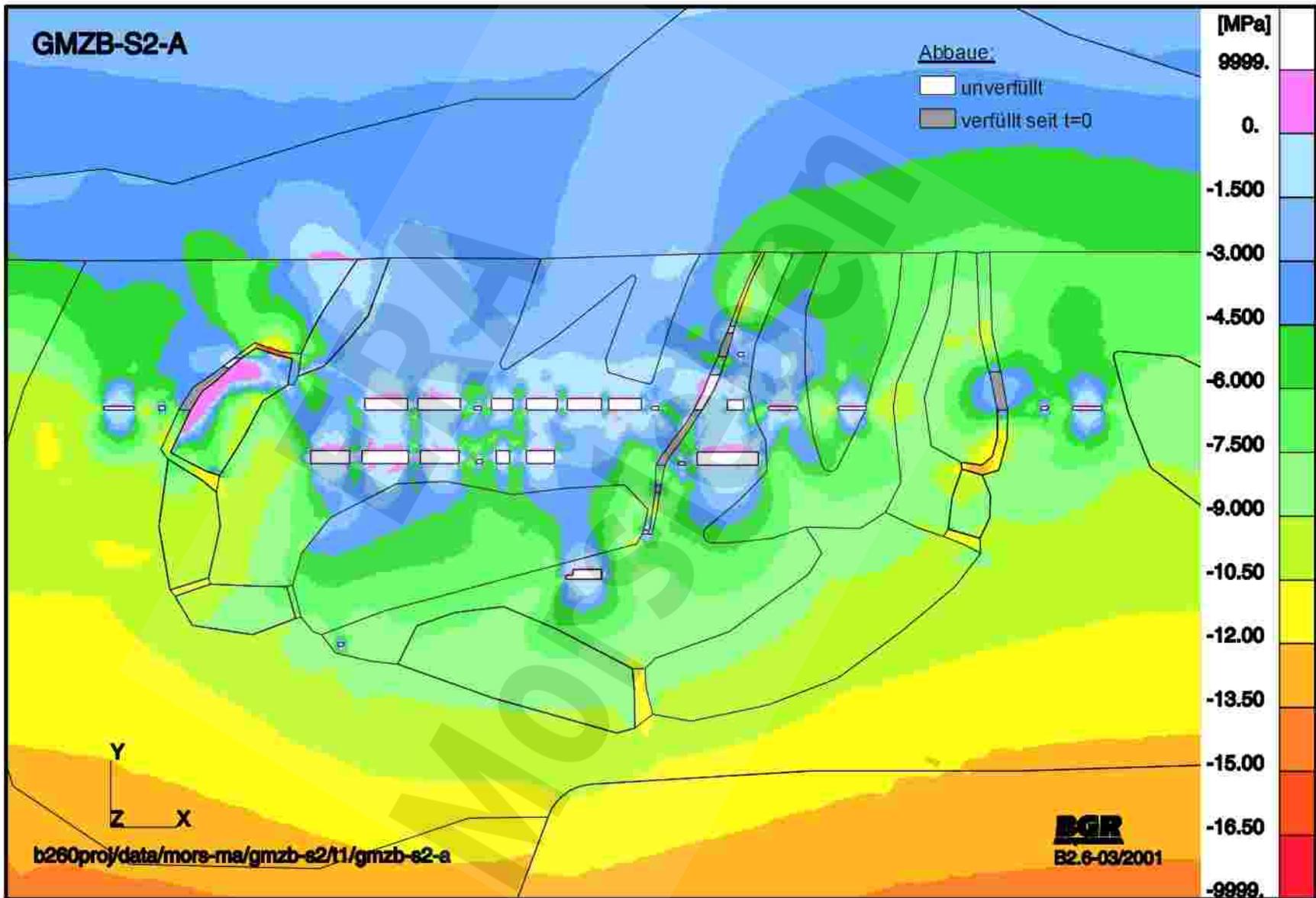


GMLH-S1-N: Verminderte Duktilitaet
Hypothetisch laugendruckgefaehrdete Bereiche nach 150 Jahren

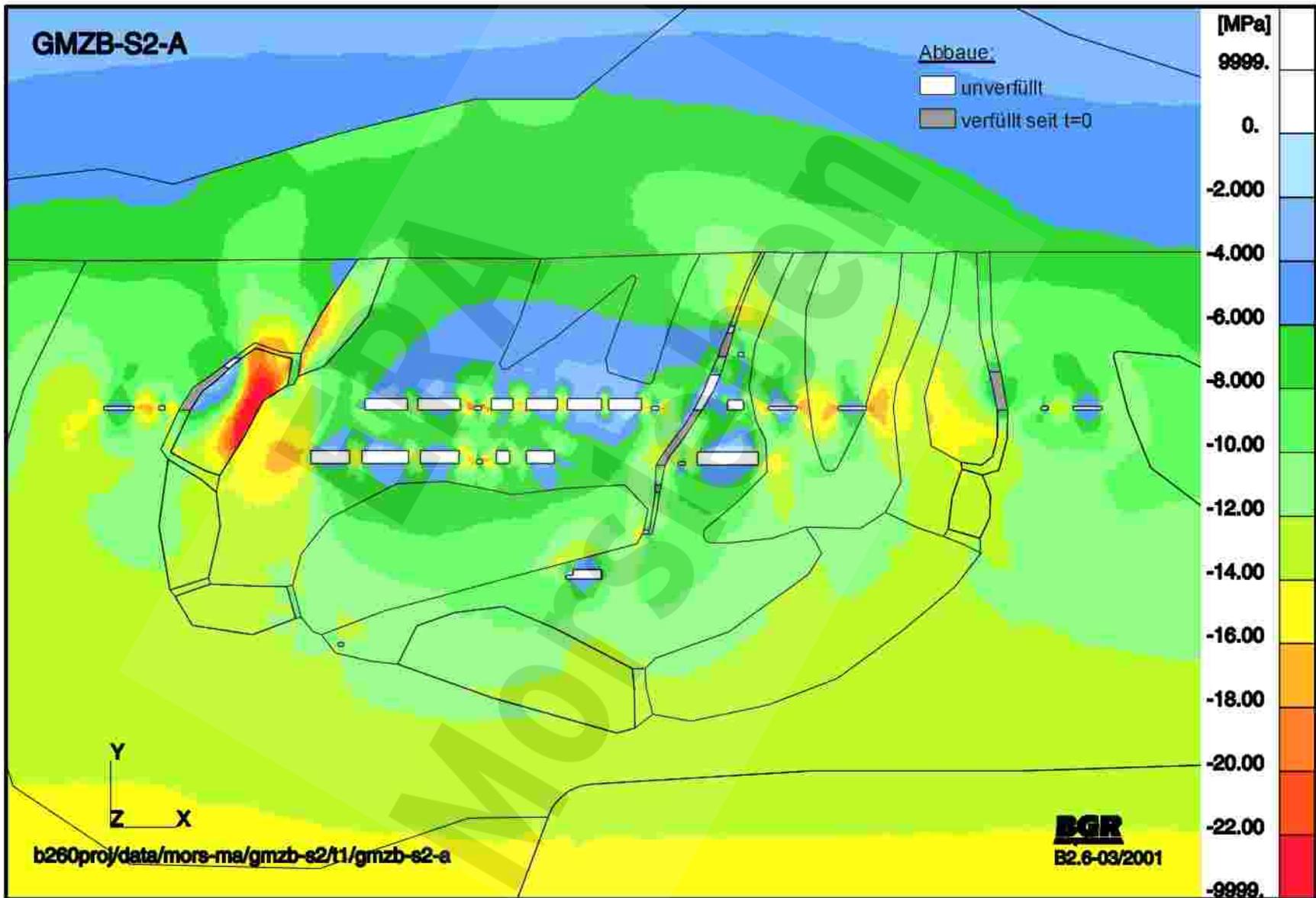
GMZB-S2-A: Referenzmodell
Kleinste Hauptdruckspannungen S_1 nach 80 Jahren



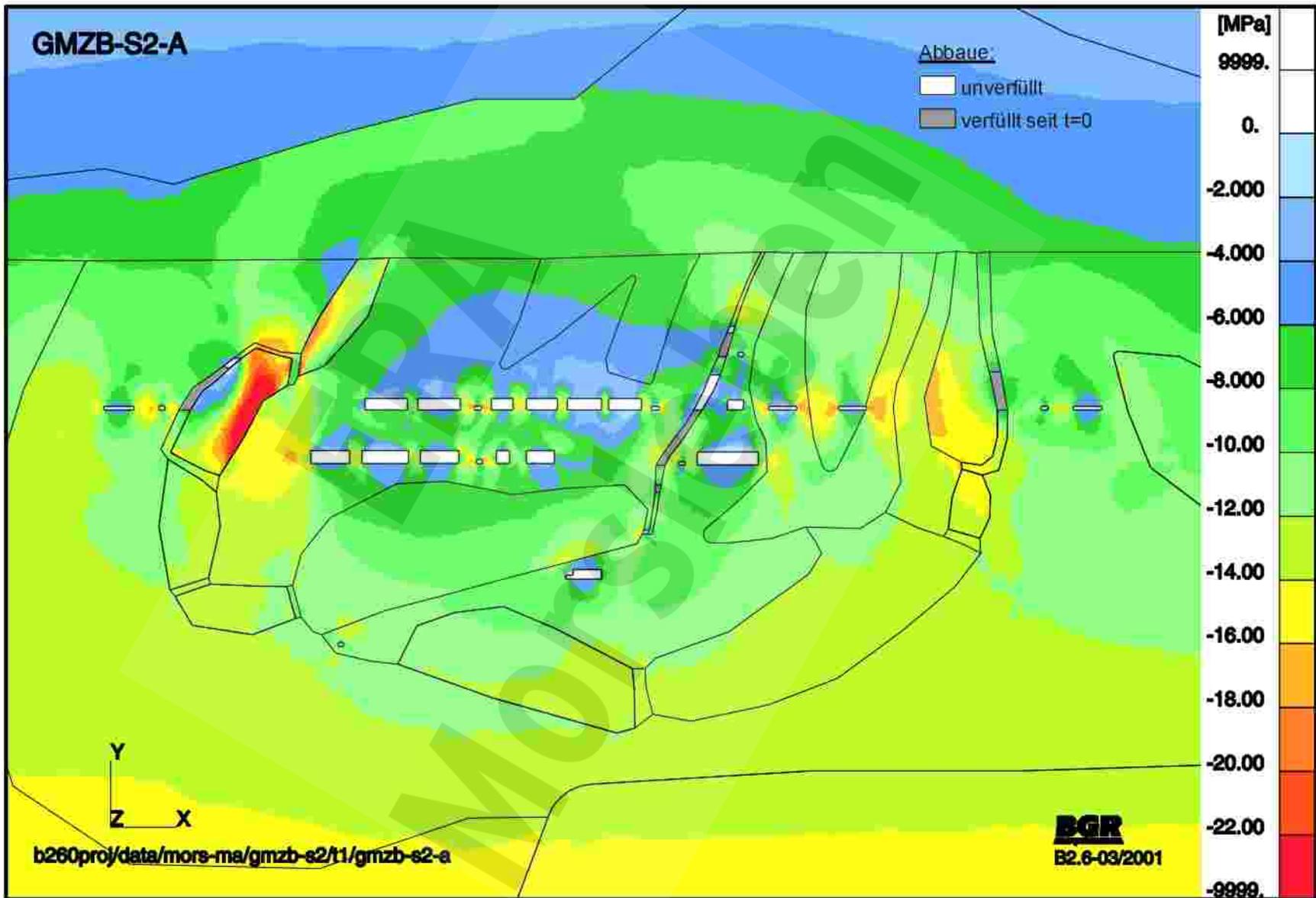
GMZB-S2-A: Referenzmodell
Kleinste Hauptdruckspannungen S_1 nach 130 Jahren



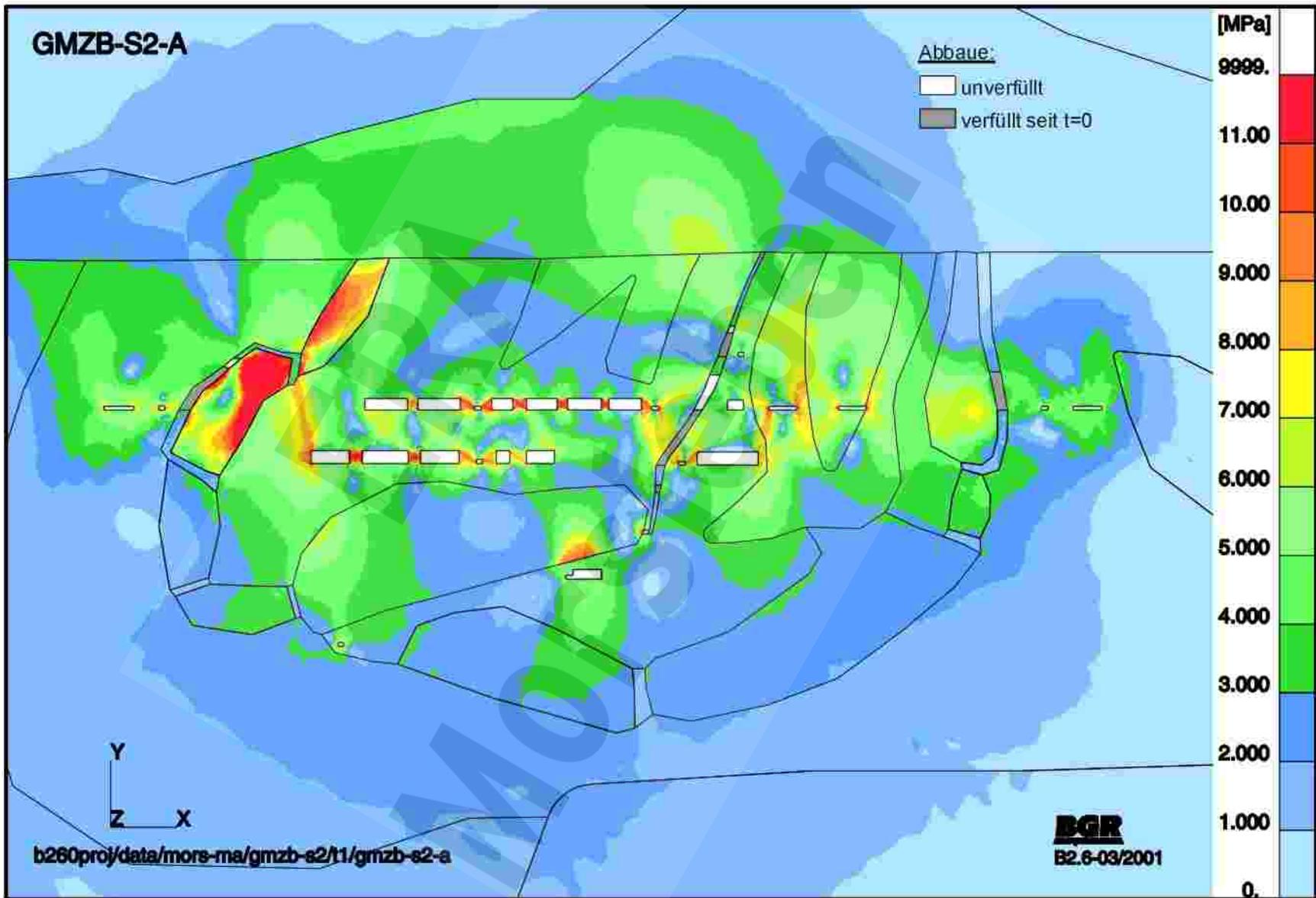
GMZB-S2-A: Referenzmodell
Grösste Hauptdruckspannungen S2 nach 80 Jahren



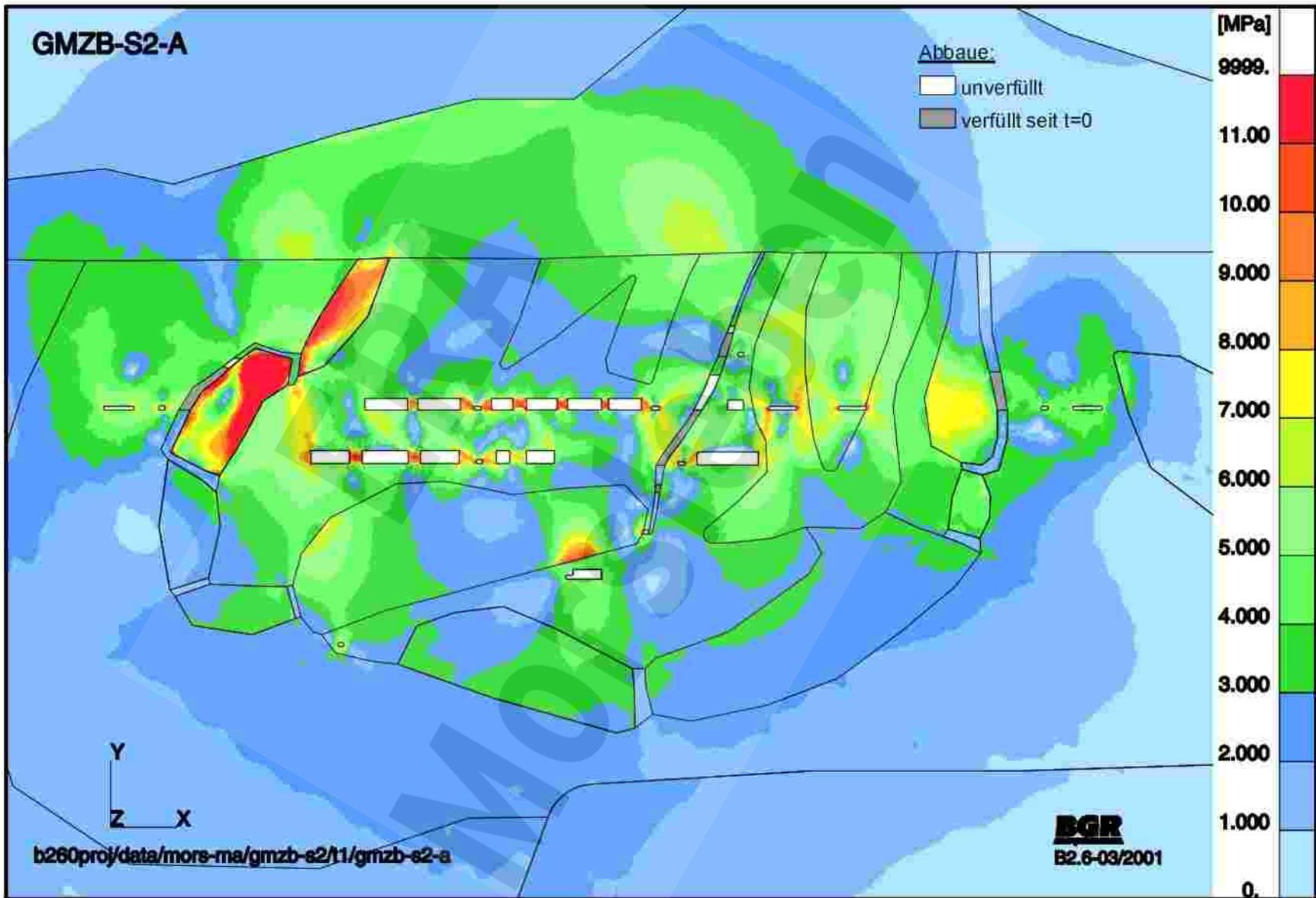
GMZB-S2-A: Referenzmodell
Grösste Hauptdruckspannungen S2 nach 130 Jahren



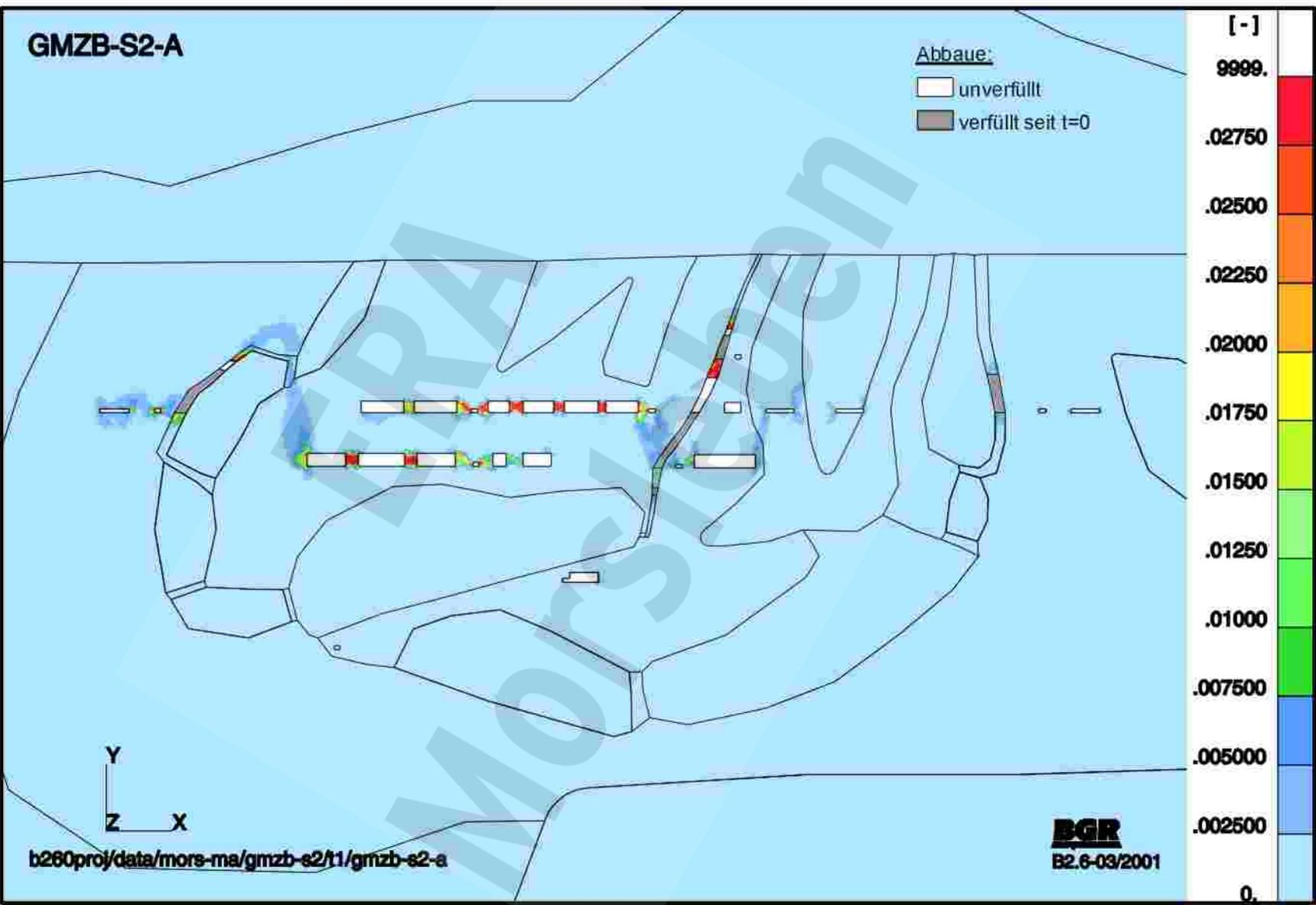
GMZB-S2-A: Referenzmodell
Effektivspannungen nach 80 Jahren



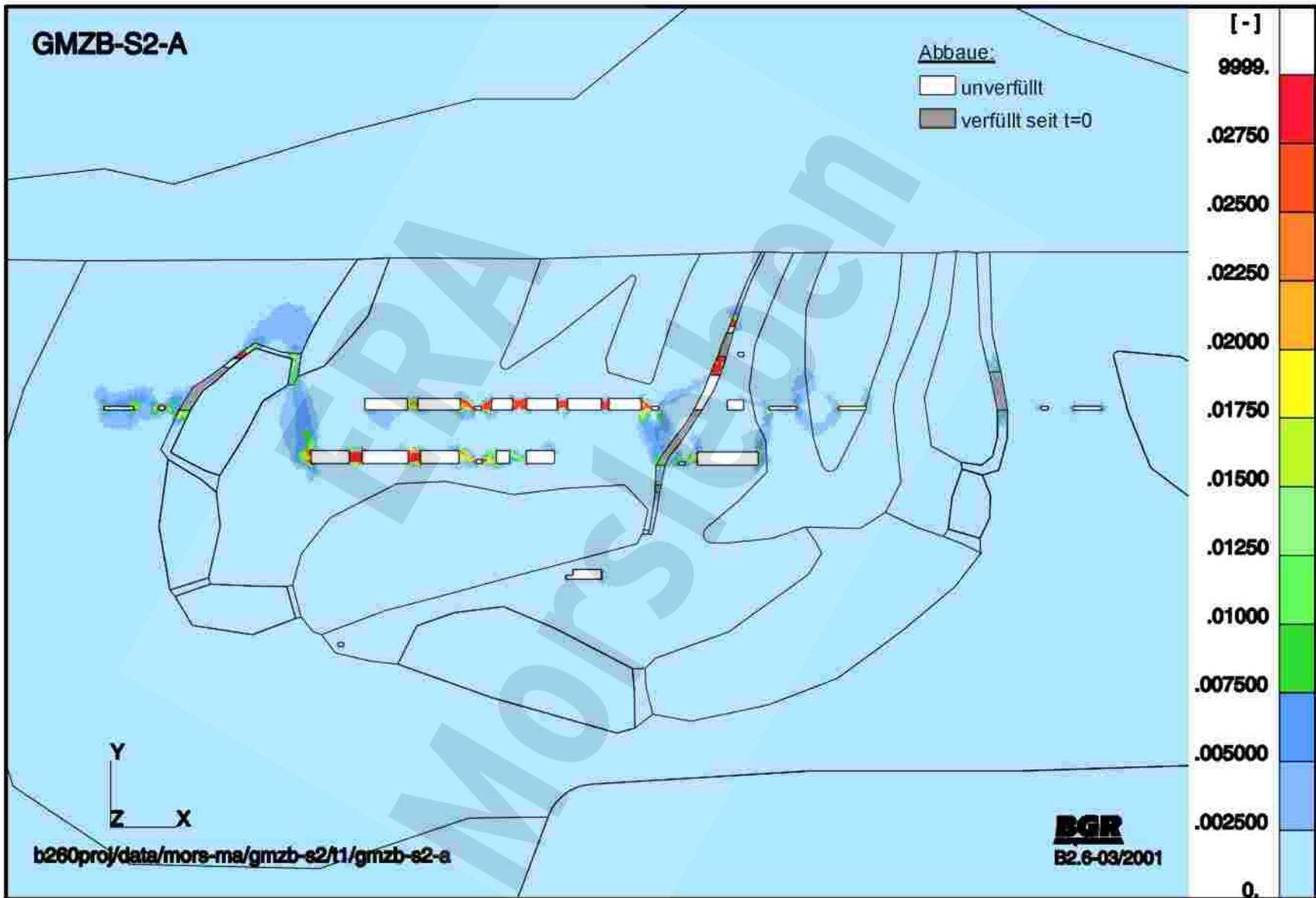
GMZB-S2-A: Referenzmodell
Effektivspannungen nach 130 Jahren



GMZB-S2-A: Referenzmodell
Effektivverzerrungen nach 80 Jahren

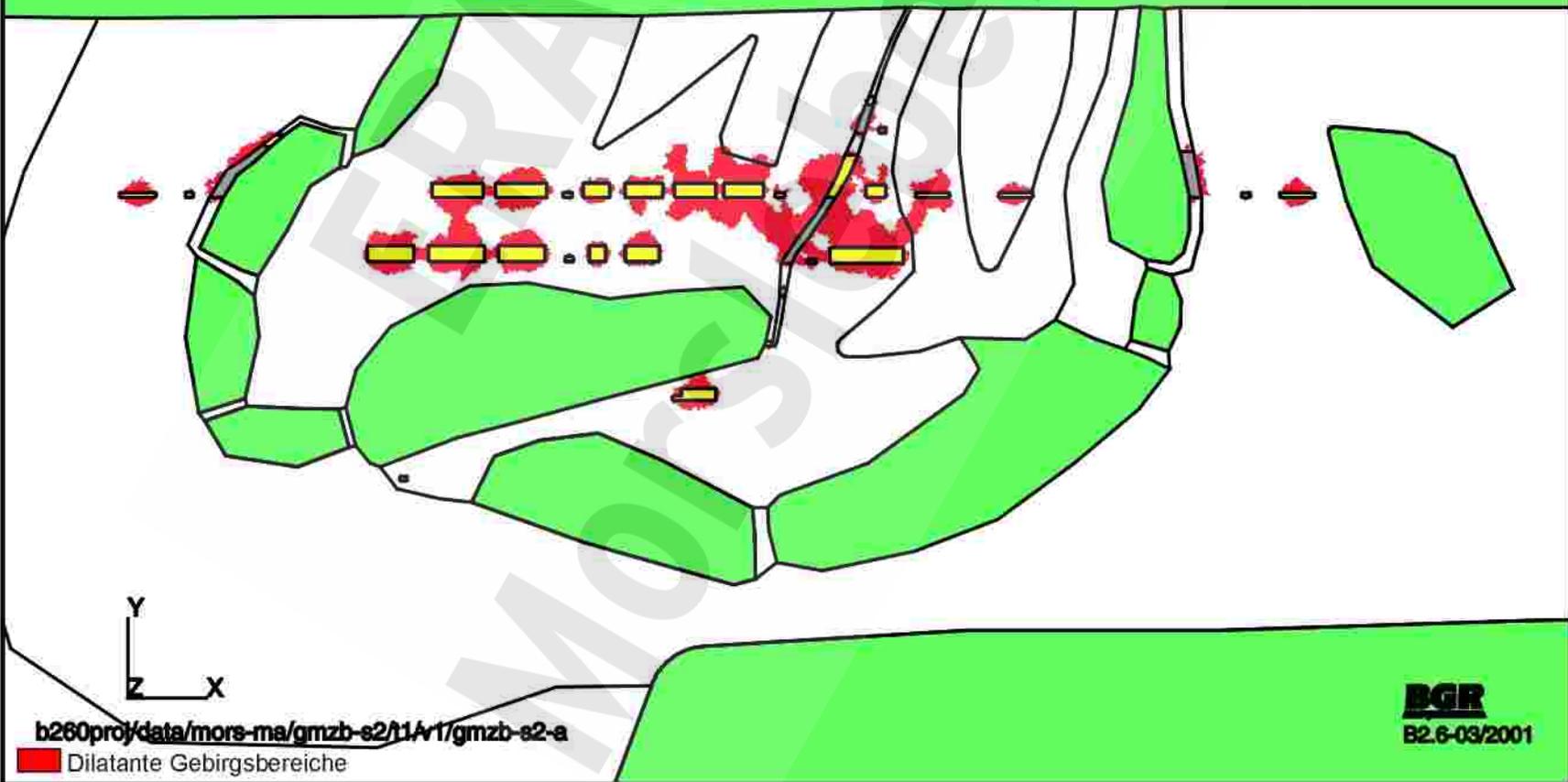


GMZB-S2-A: Referenzmodell
Effektivverzerrungen nach 130 Jahren



GMZB-S2-A

Hohlräume:
unverfüllt
verfüllt seit t=0



GMZB-S2-A: Referenzmodell
Dilatante Gebirgsbereiche nach 80 Jahren

GMZB-S2-A

Hohlräume:
unverfüllt
verfüllt seit t=0



b260proj\data/mors-ma/gmzb-s2/t1/v1/gmzb-s2-a

Dilatante Gebirgsbereiche

BGR
B2.6-03/2001

GMZB-S2-A: Referenzmodell
Dilatante Gebirgsbereiche nach 130 Jahren

GMZB-S2-B

Hohlräume:

unverfüllt

verfüllt seit t=0



b260proj/data/mors-ma/gmzb-s2/t1/v1/gmzb-s2-b

Dilatante Gebirgsbereiche

BGR
B2.6-03/2001

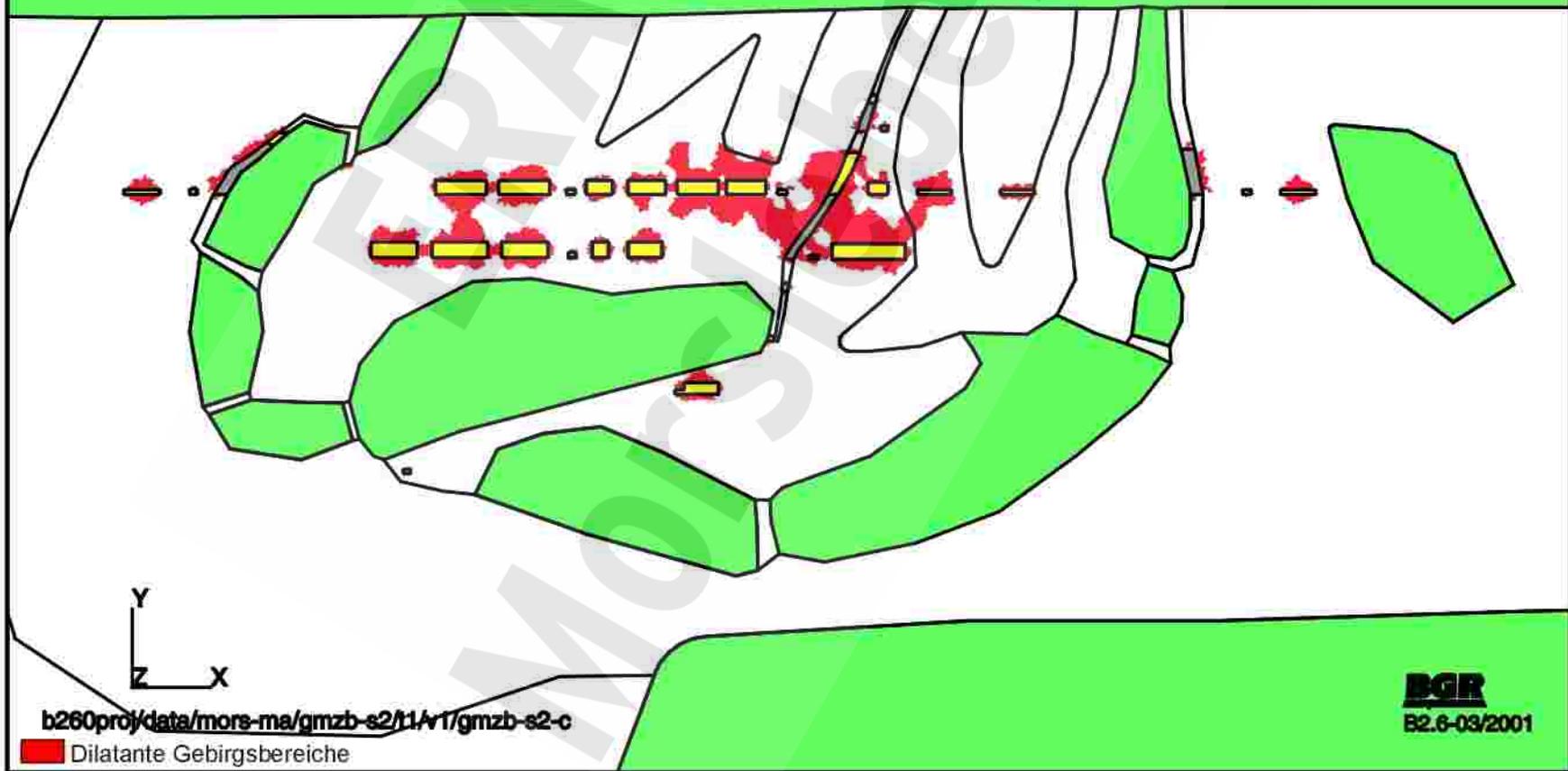
GMZB-S2-B: Erhoehnte Duktilitaet
Dilatante Gebirgsbereiche nach 130 Jahren

GMZB-S2-C

Hohlräume:

unverfüllt

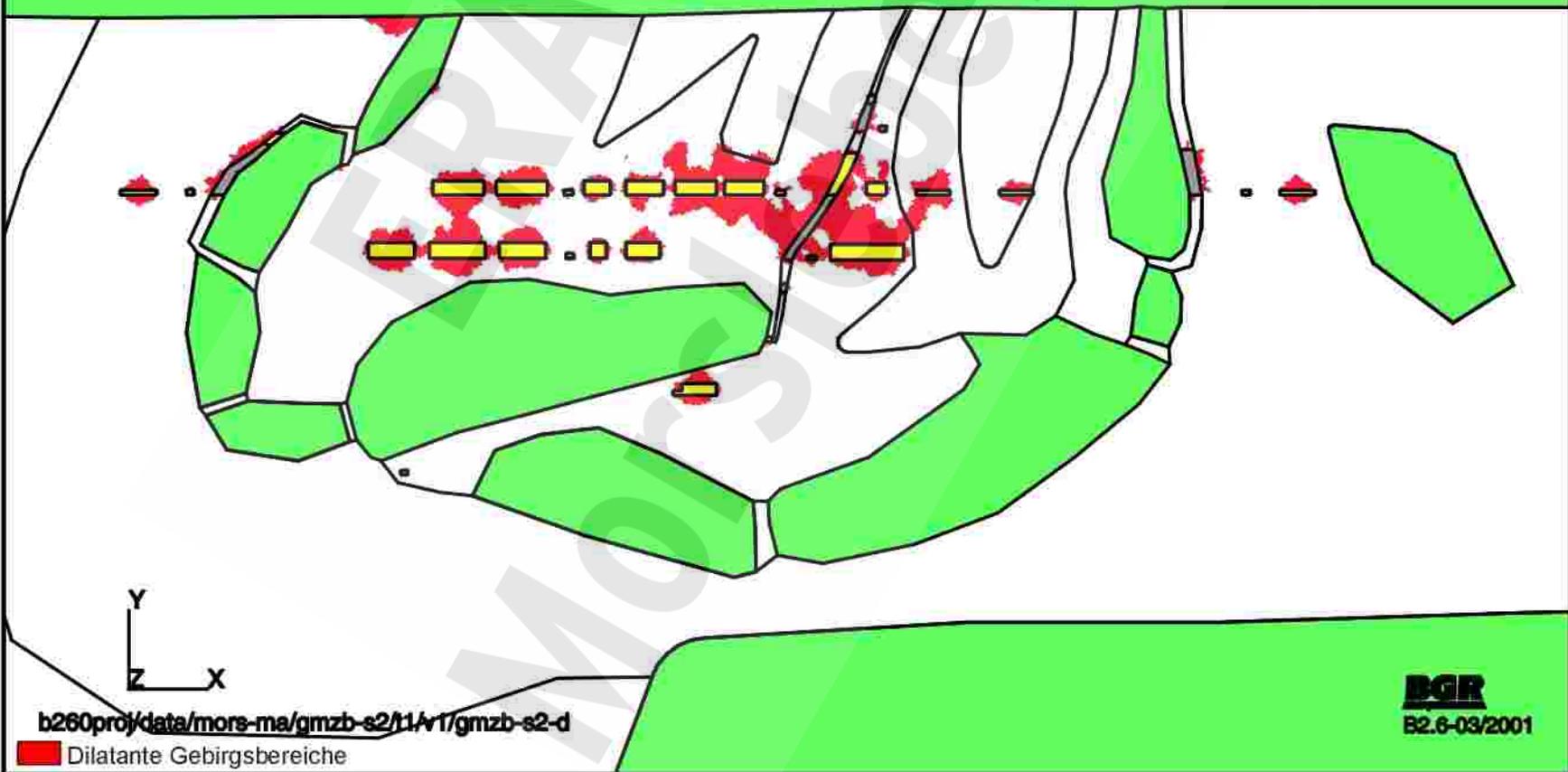
verfüllt seit t=0



GMZB-S2-C: Verminderte Duktilitaet
Dilatante Gebirgsbereiche nach 130 Jahren

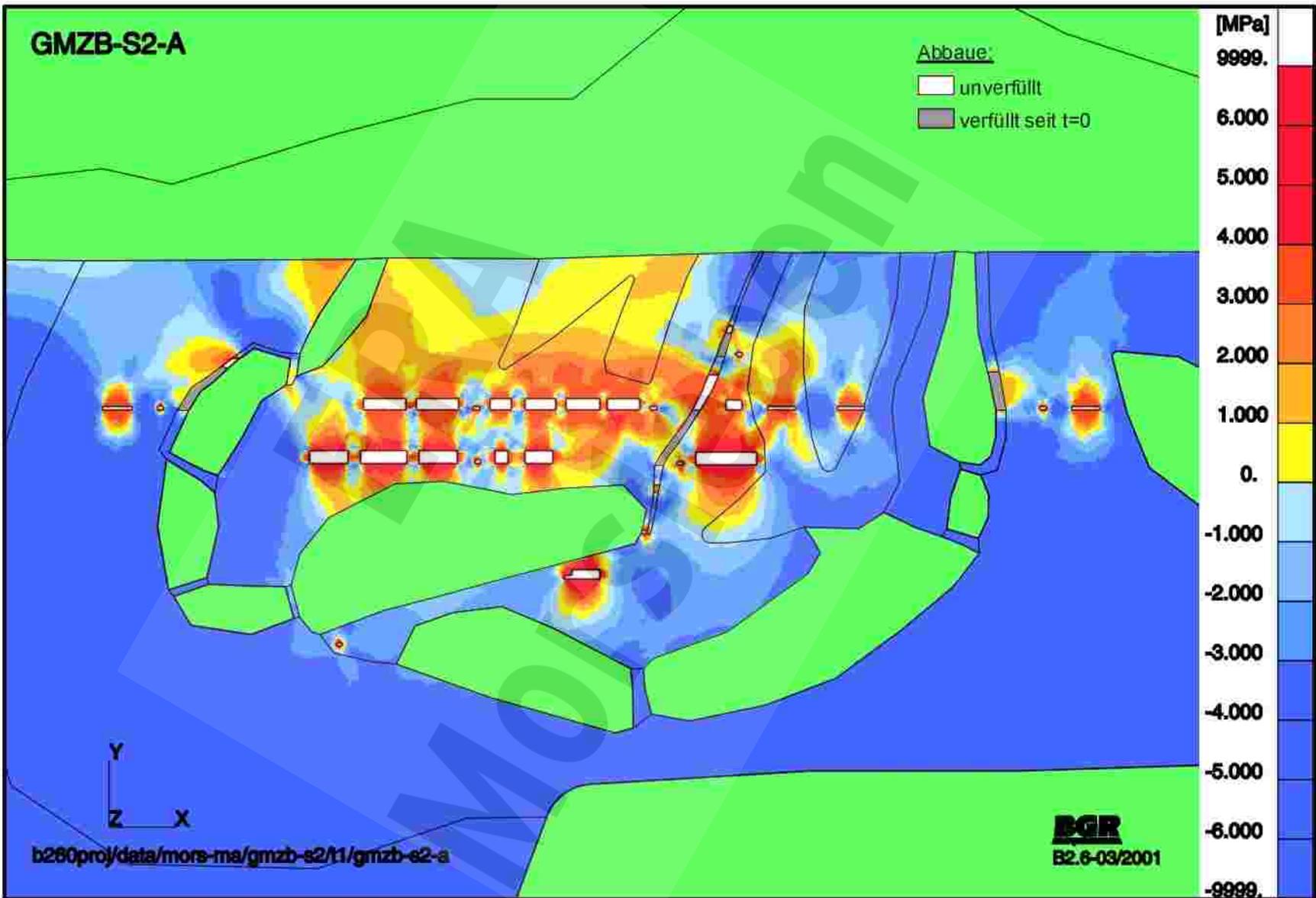
GMZB-S2-D

Hohlräume:
unverfüllt
verfüllt seit t=0

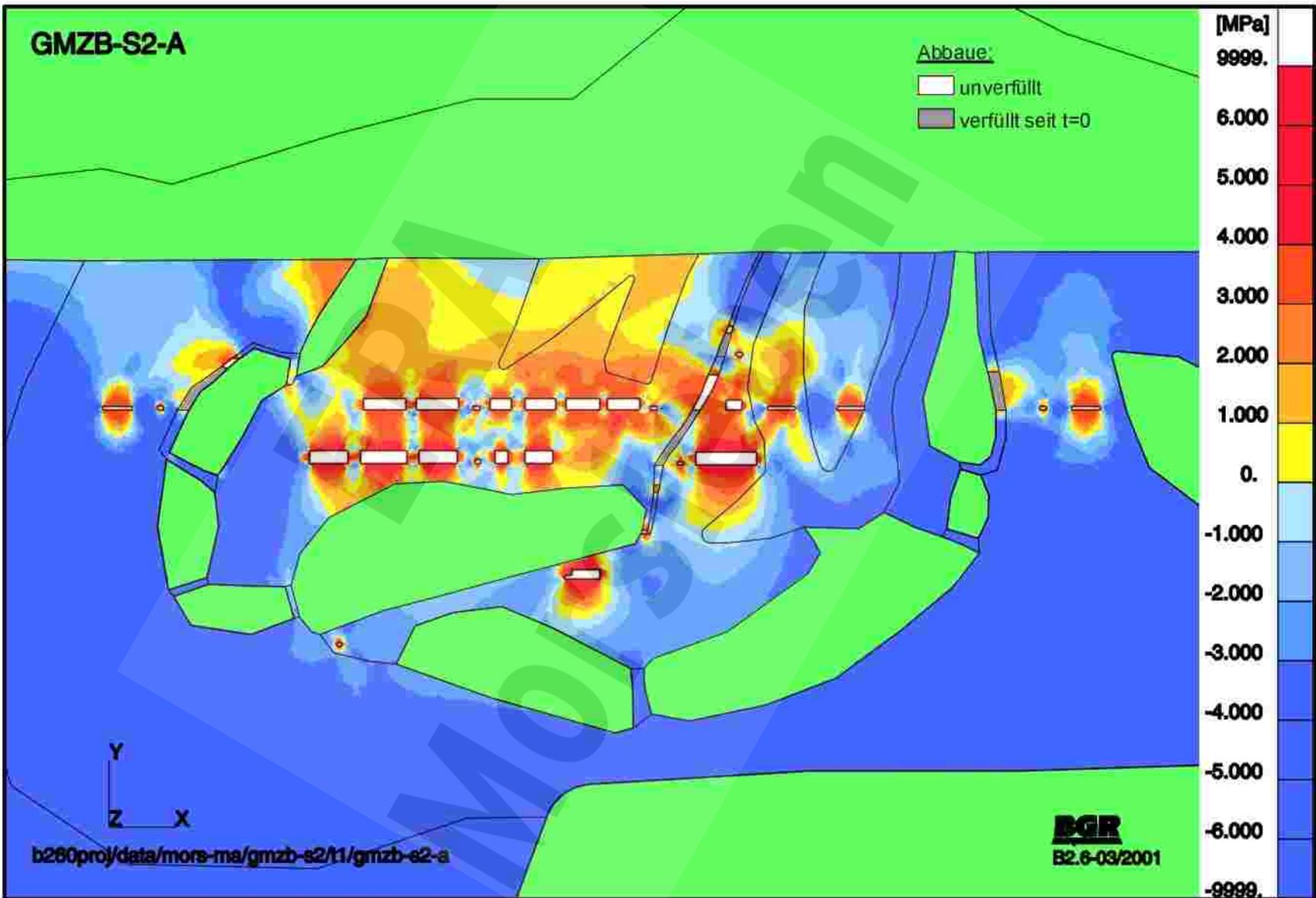


GMZB-S2-D: Erhöhte Anhydritsteifigkeit
Dilatante Gebirgsbereiche nach 130 Jahren

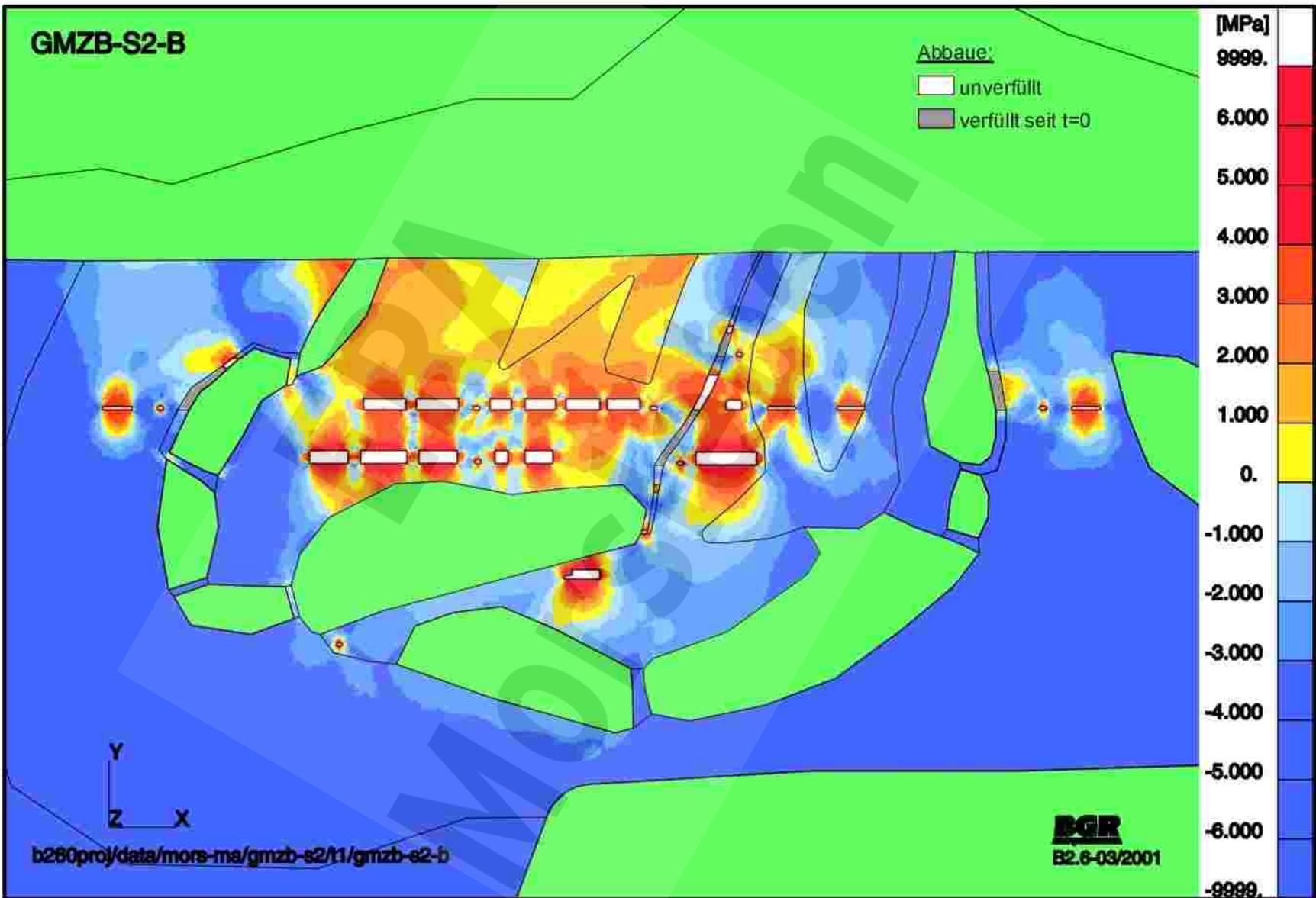
GMZB-S2-A: Referenzmodell
Hypothetisch laugendruckgefahrdete Bereiche nach 80 Jahren



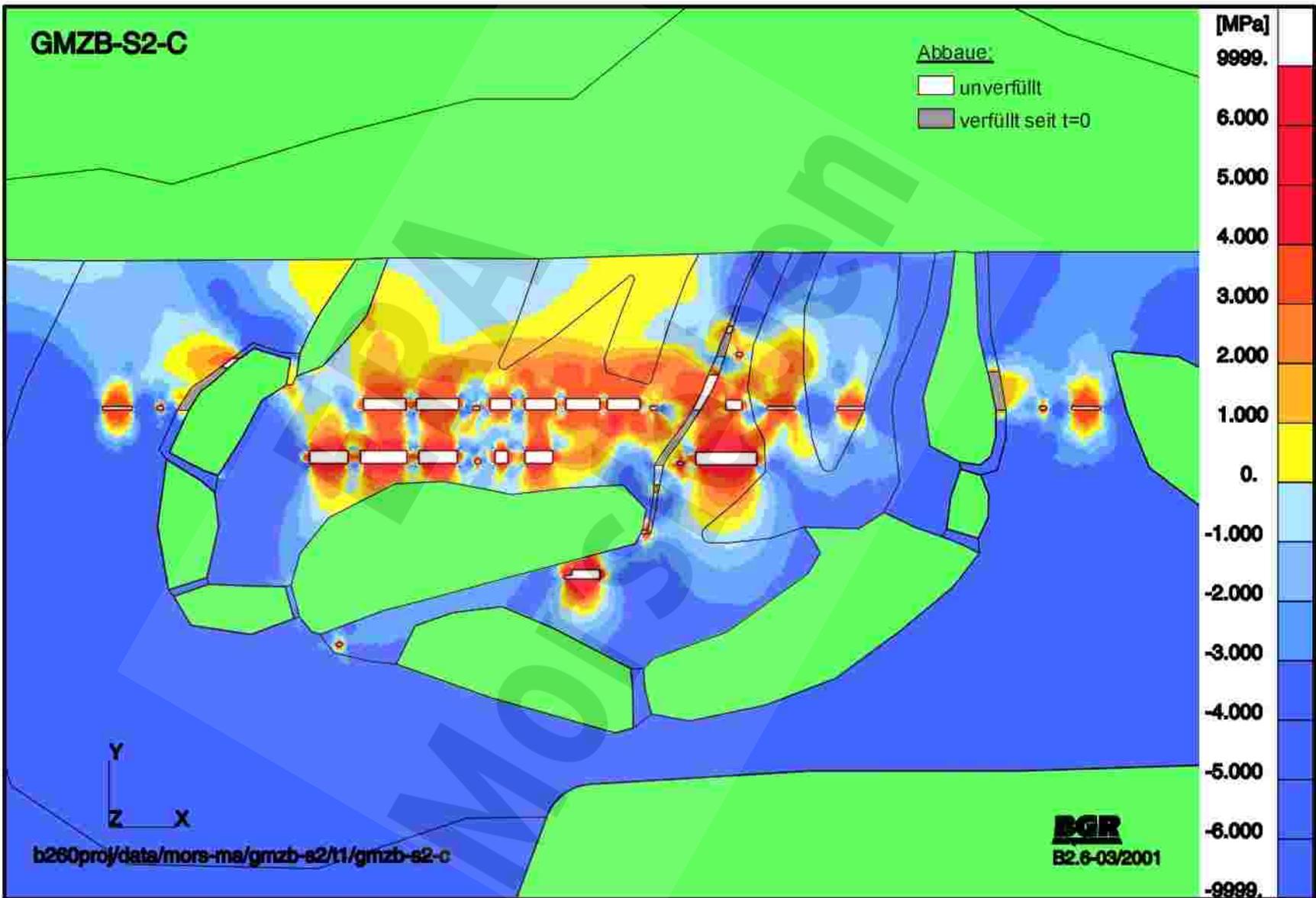
GMZB-S2-A: Referenzmodell
Hypothetisch laugendruckgefahrdate Bereiche nach 130 Jahren



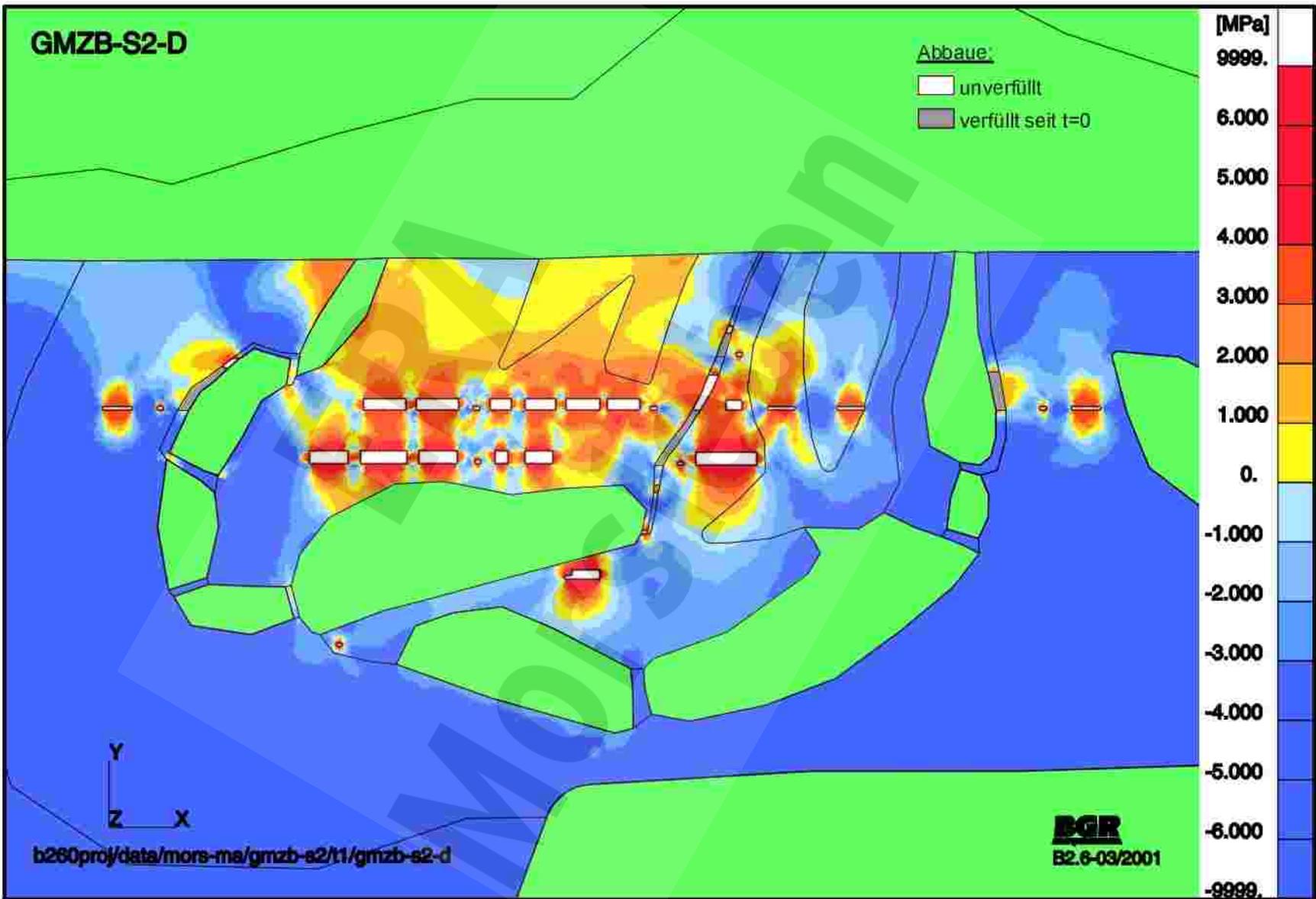
GMZB-S2-B: Erhoehnte Duktilitaet
Hypothetisch laugendruckgefaehrdete Bereiche nach 130 Jahren

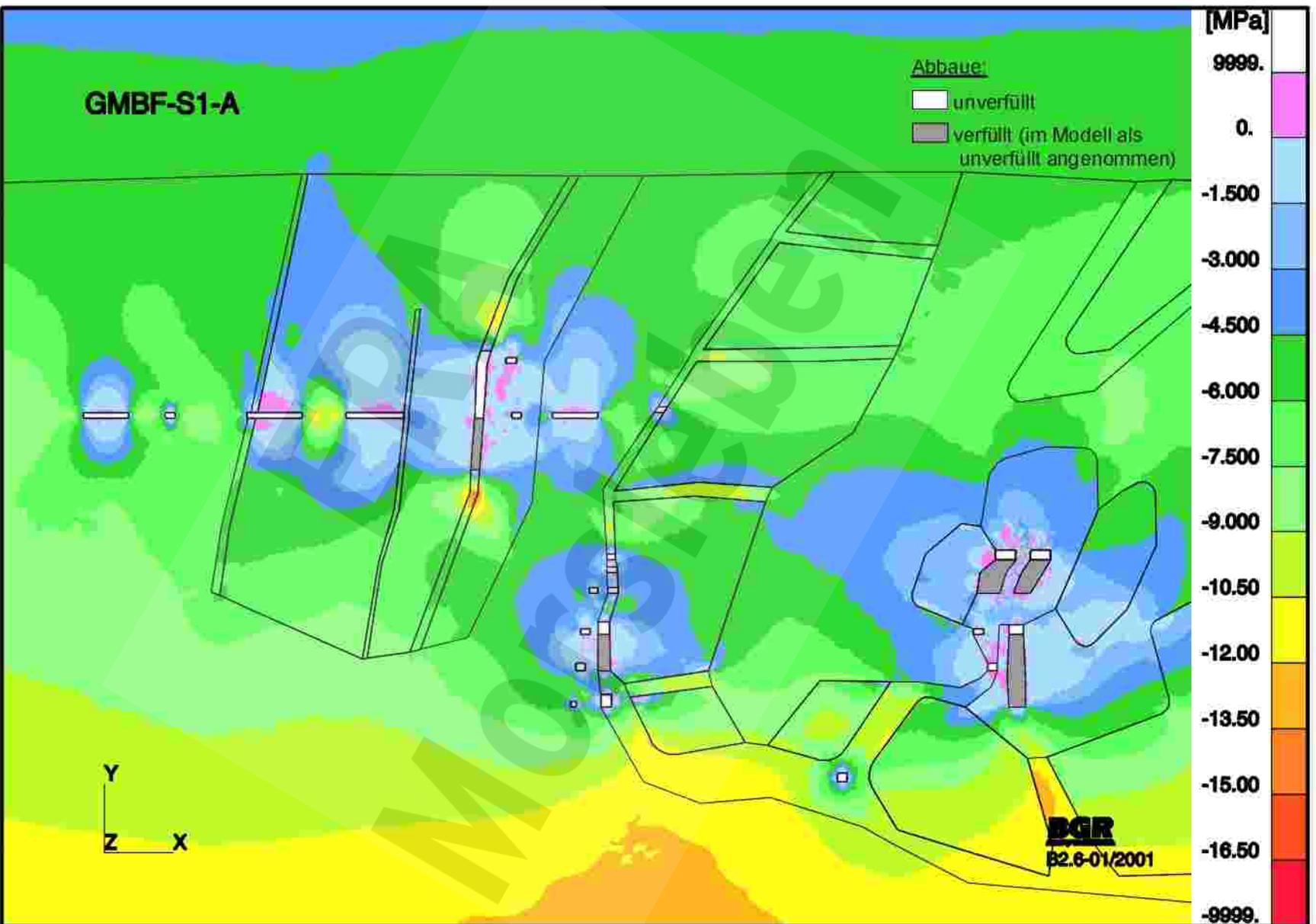


**GMZB-S2-C: Verminderte Duktilitaet
Hypothetisch laugendruckgefahrdete Bereiche nach 130 Jahren**

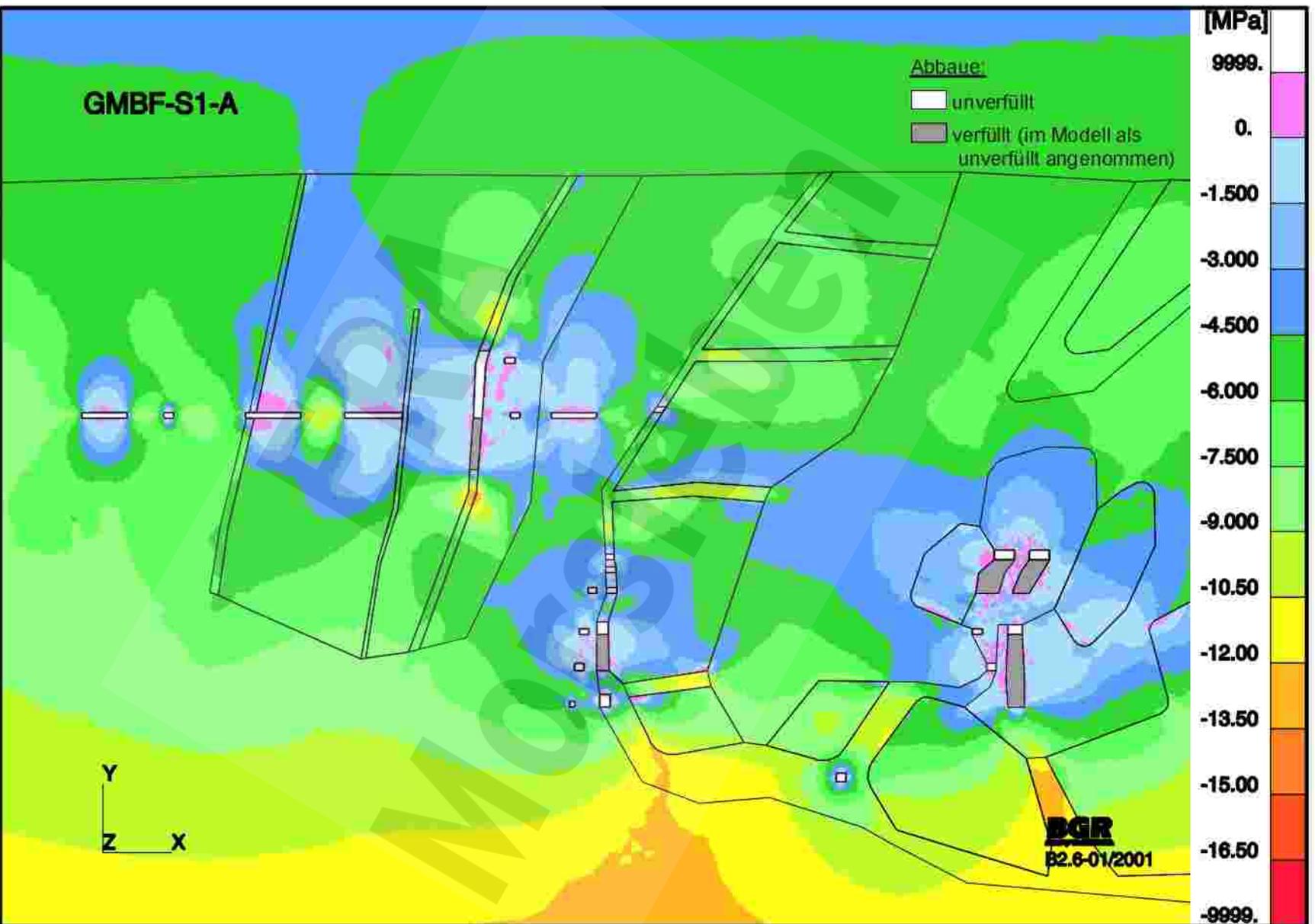


GMZB-S2-D: Erhoehnte Anhydritsteifigkeit
Hypothetisch laugendruckgefaehrdete Bereiche nach 130 Jahren



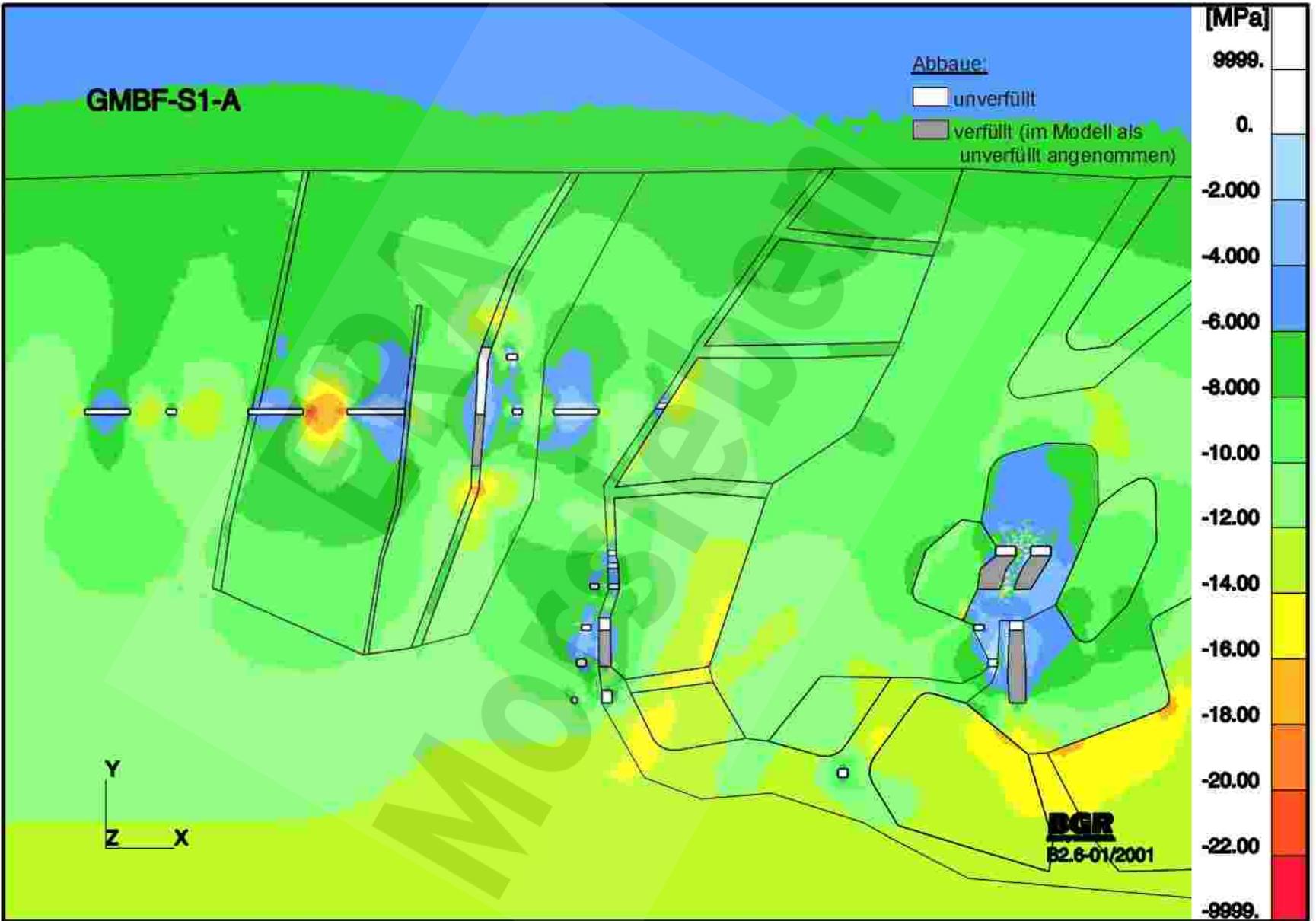


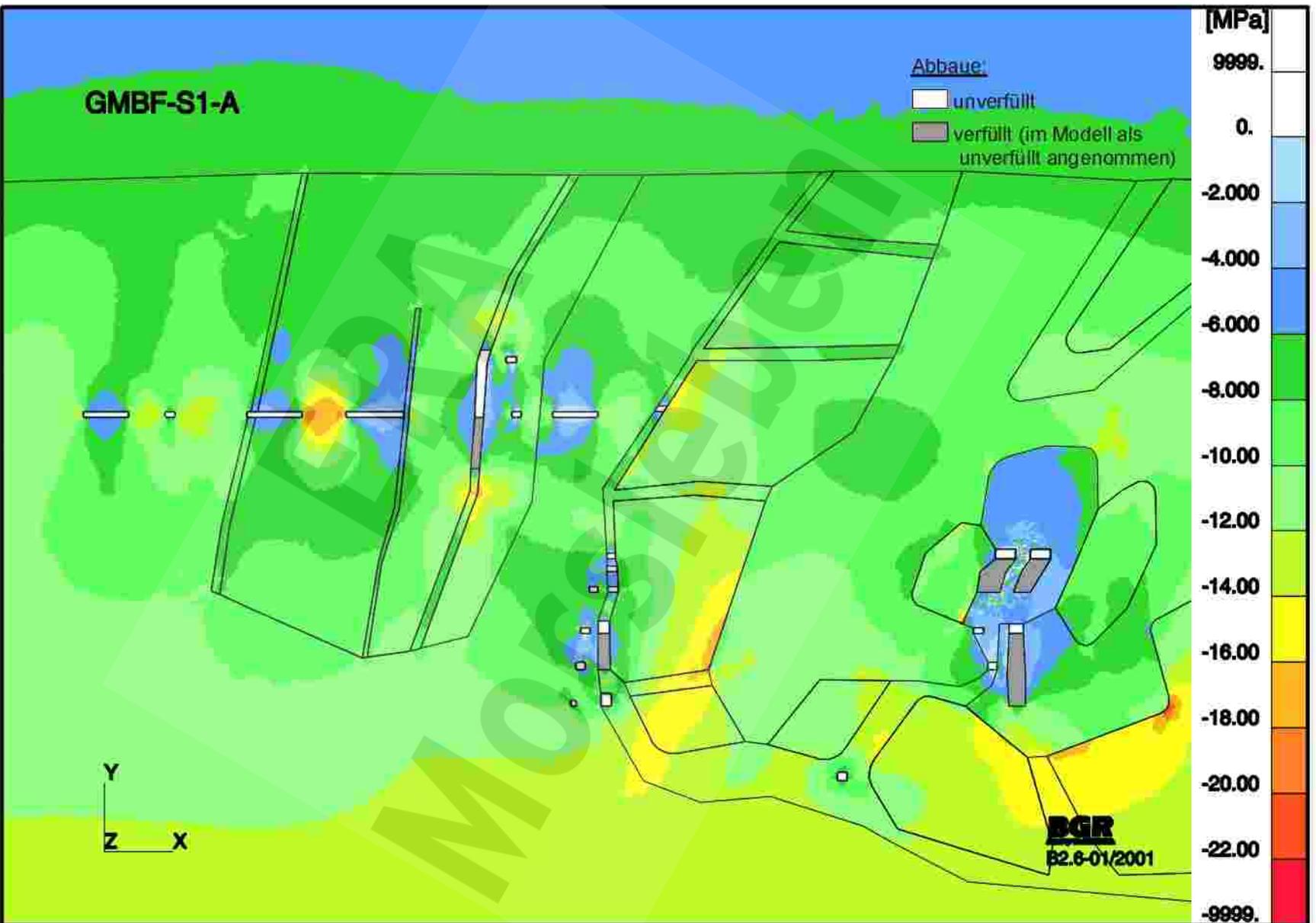
GMBF-S1-A: Referenzmodell
Kleinste Hauptdruckspannungen S1 nach 80 Jahren



**GMBF-S1-A: Referenzmodell
Kleinste Hauptdruckspannungen S1 nach 130 Jahren**

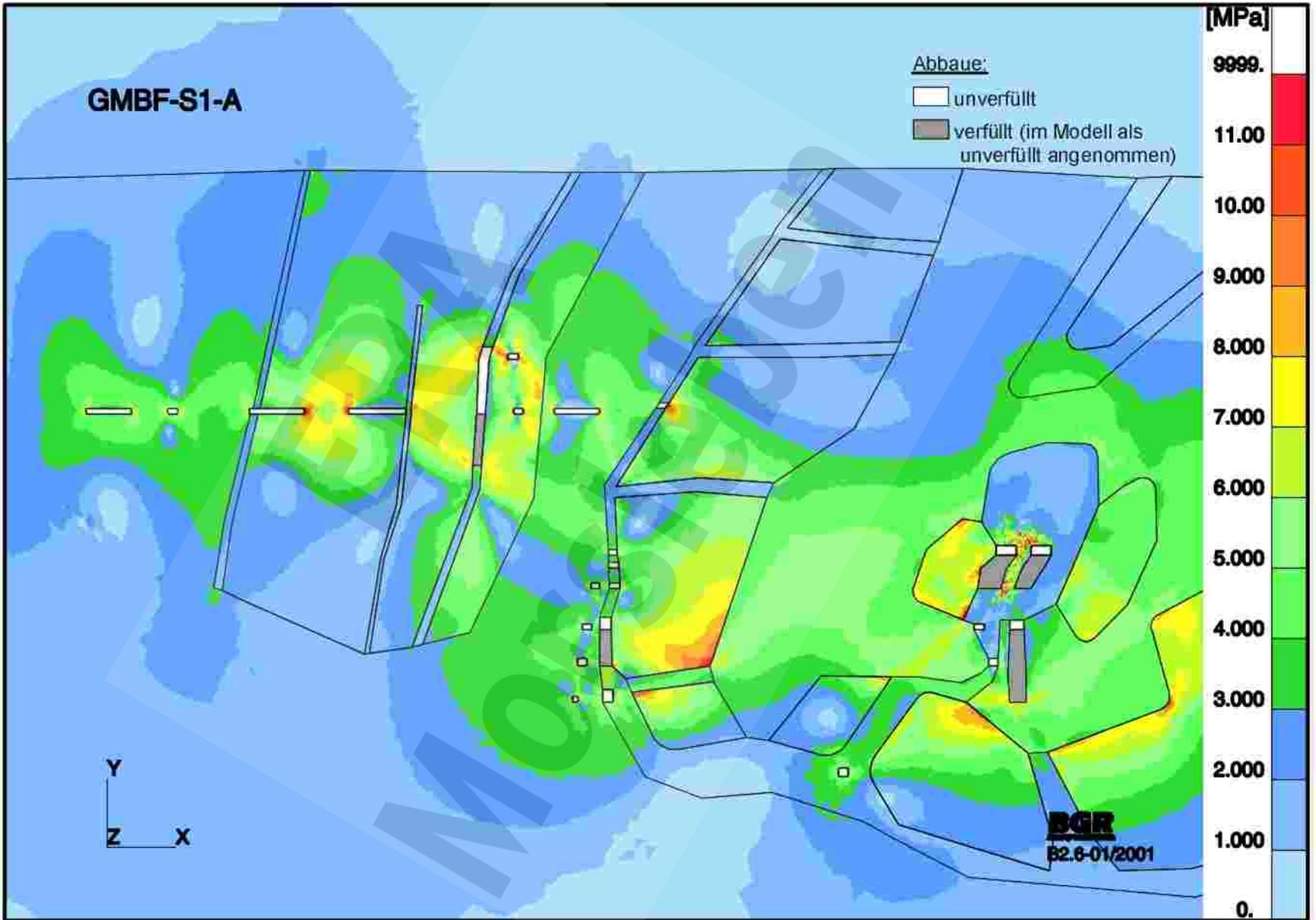
GMBF-S1-A: Referenzmodell
Groesste Hauptdruckspannungen S2 nach 80 Jahren



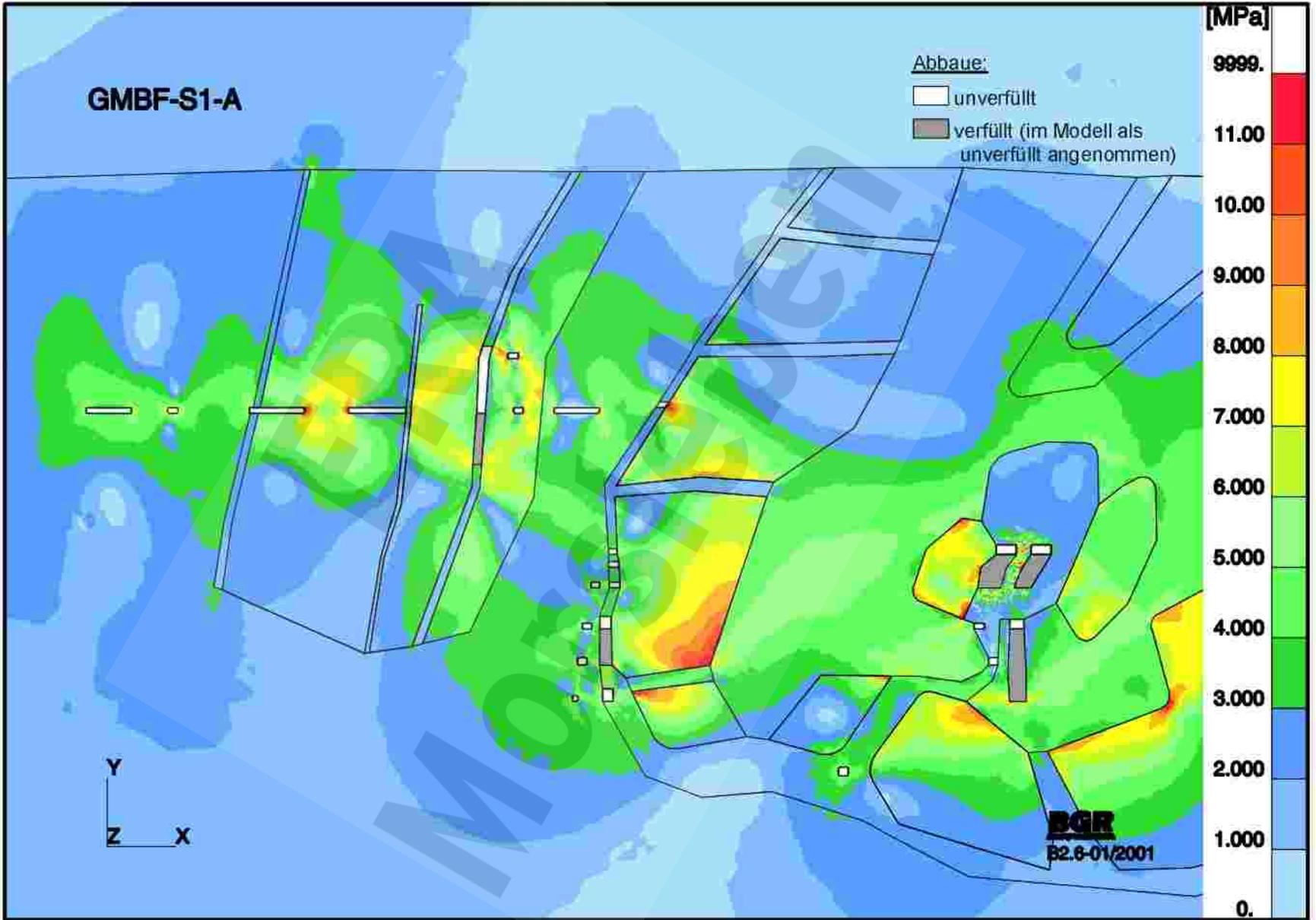


**GMBF-S1-A: Referenzmodell
Grösste Hauptdruckspannungen S2 nach 130 Jahren**

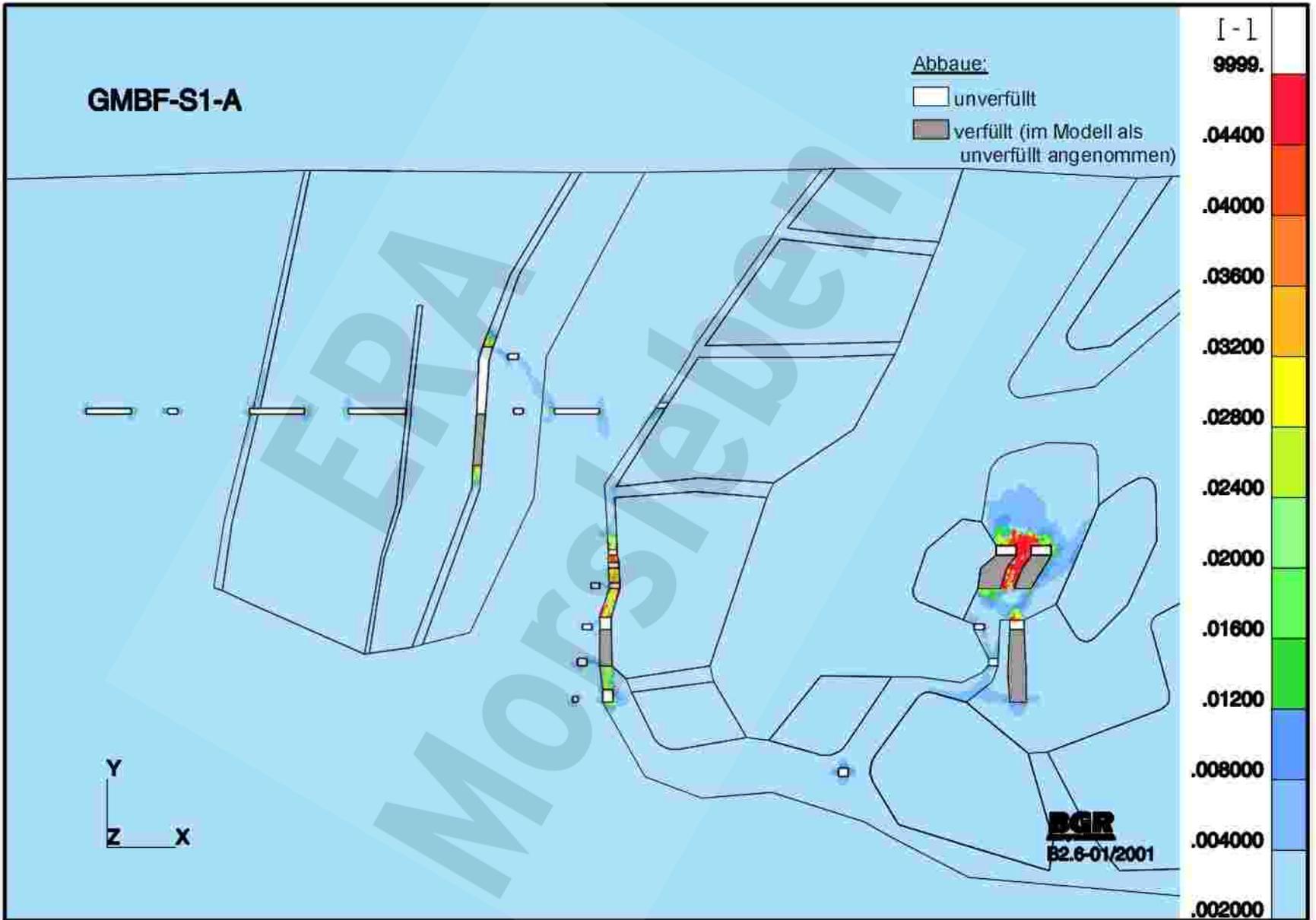
GMBF-S1-A: Referenzmodell
Effektivspannungen nach 80 Jahren



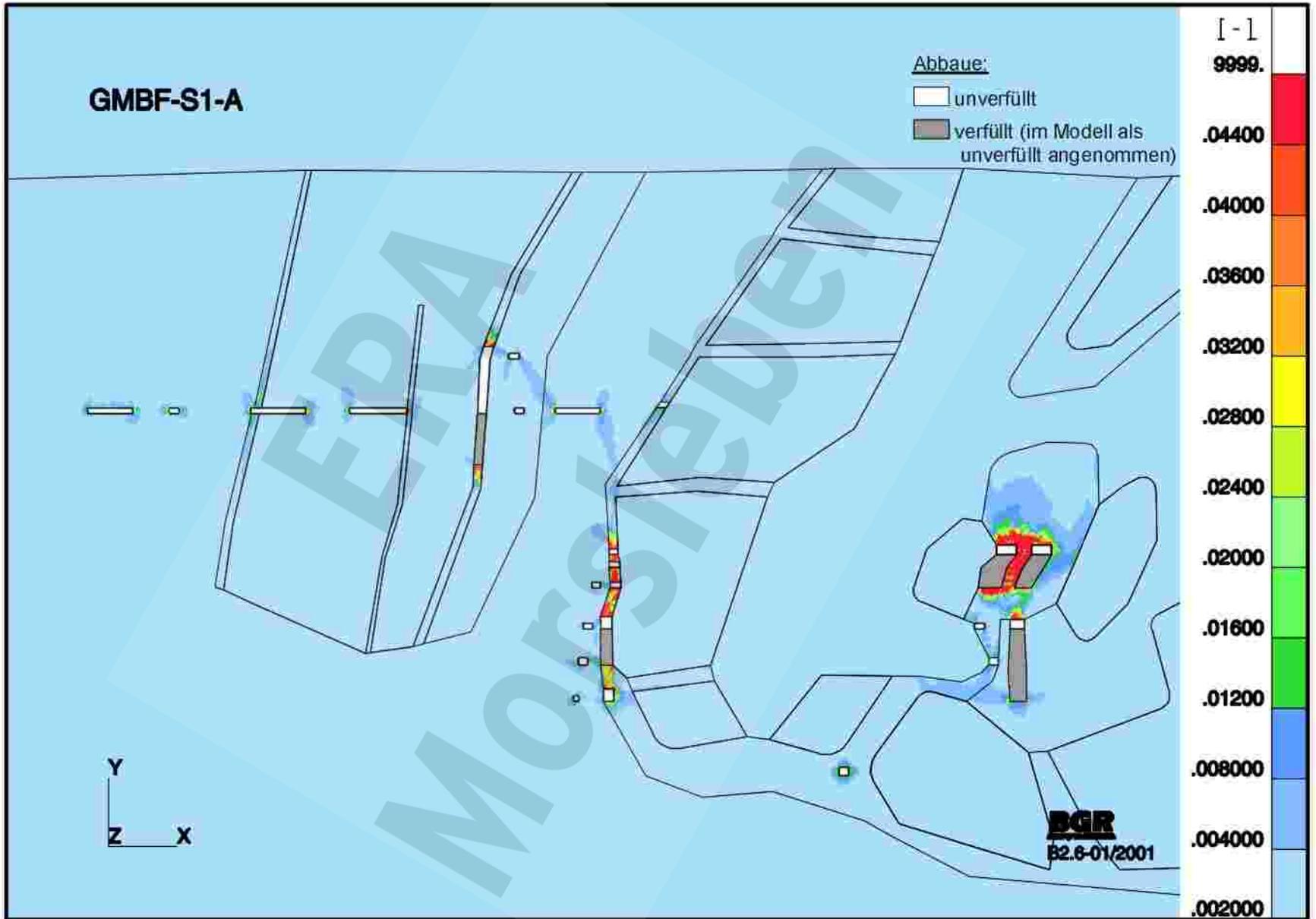
GMBF-S1-A: Referenzmodell
Effektivspannungen nach 130 Jahren

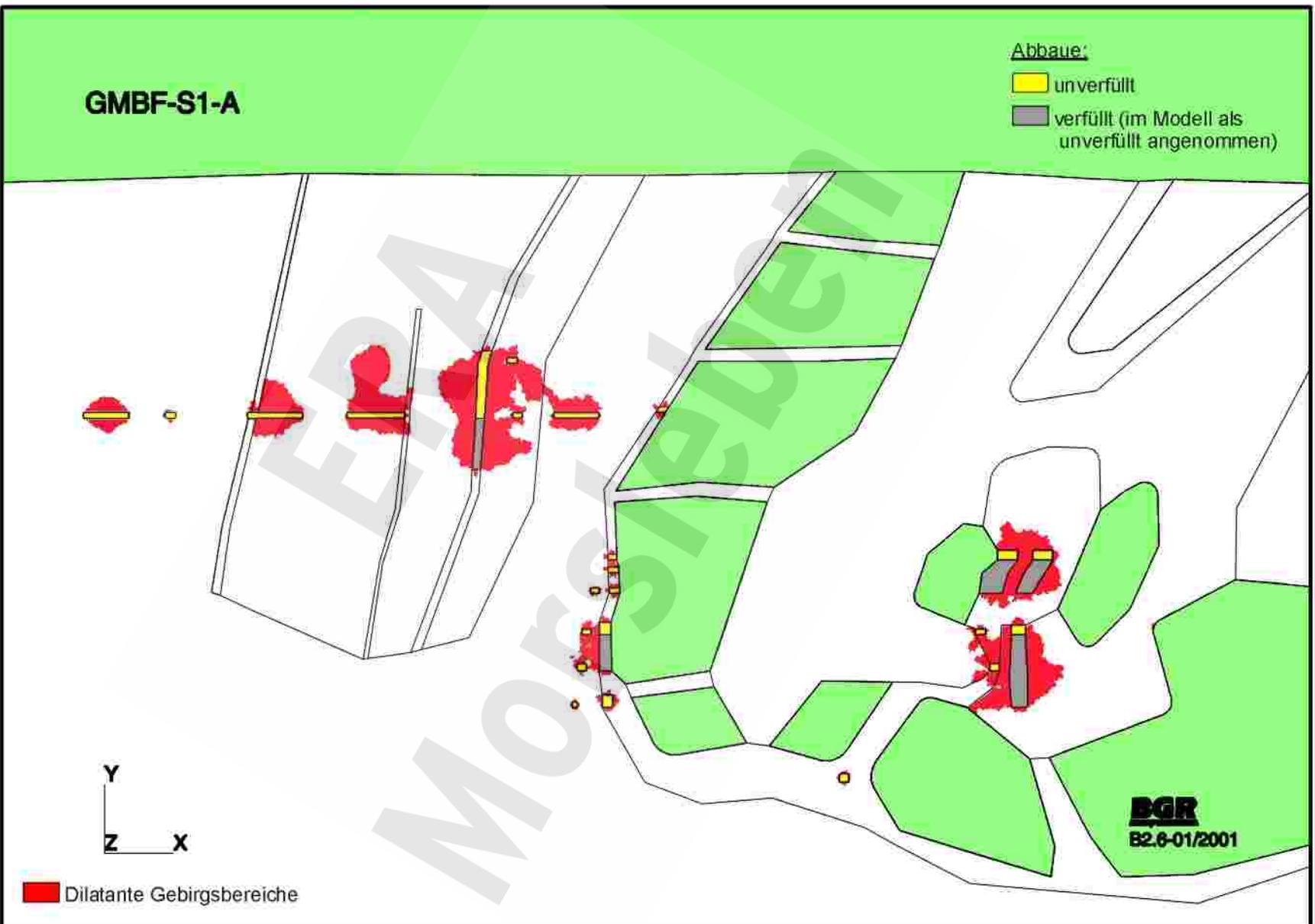


**GMBF-S1-A: Referenzmodell
Effektivverzerrungen nach 80 Jahren**

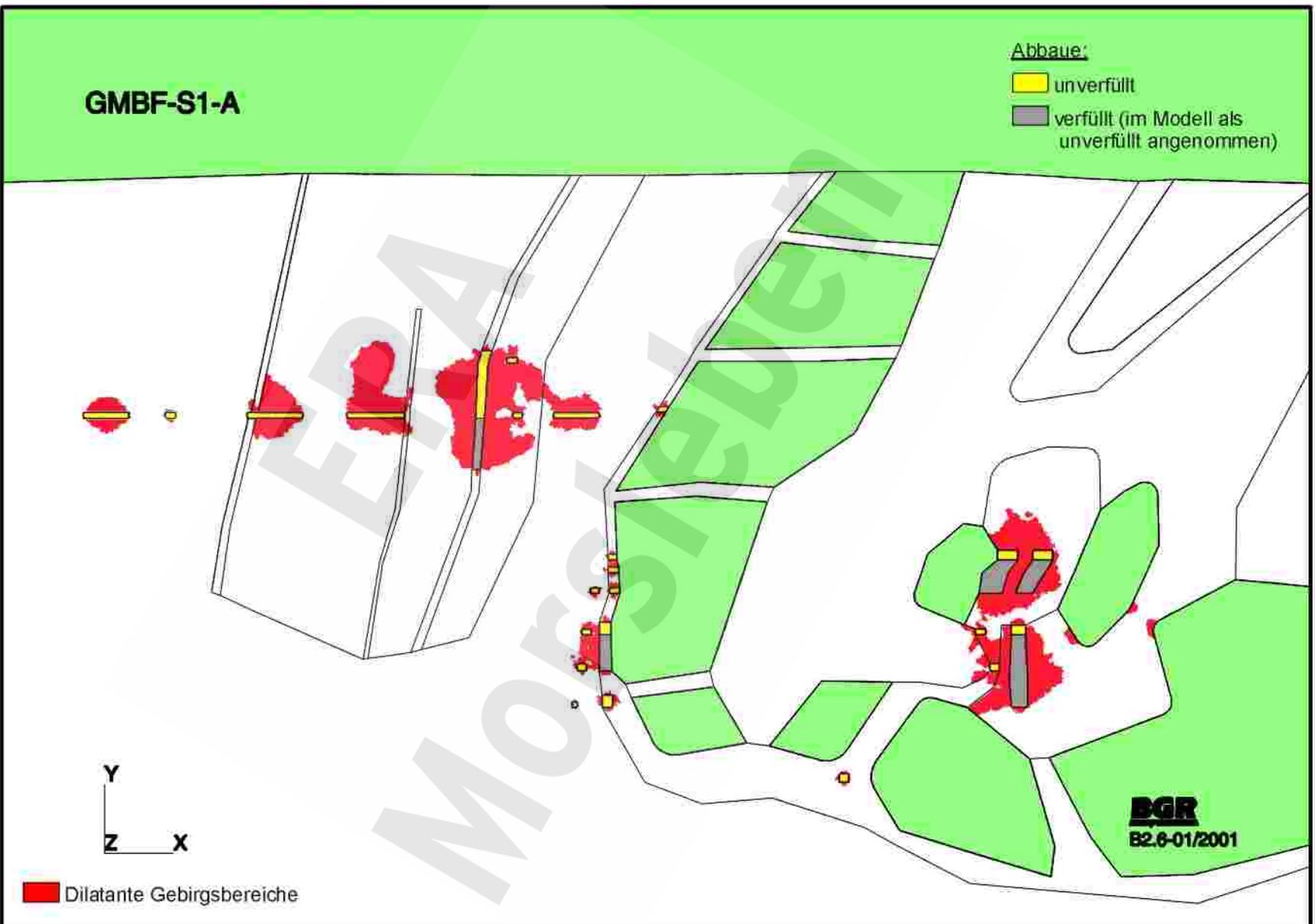


**GMBF-S1-A: Referenzmodell
Effektivverzerrungen nach 130 Jahren**

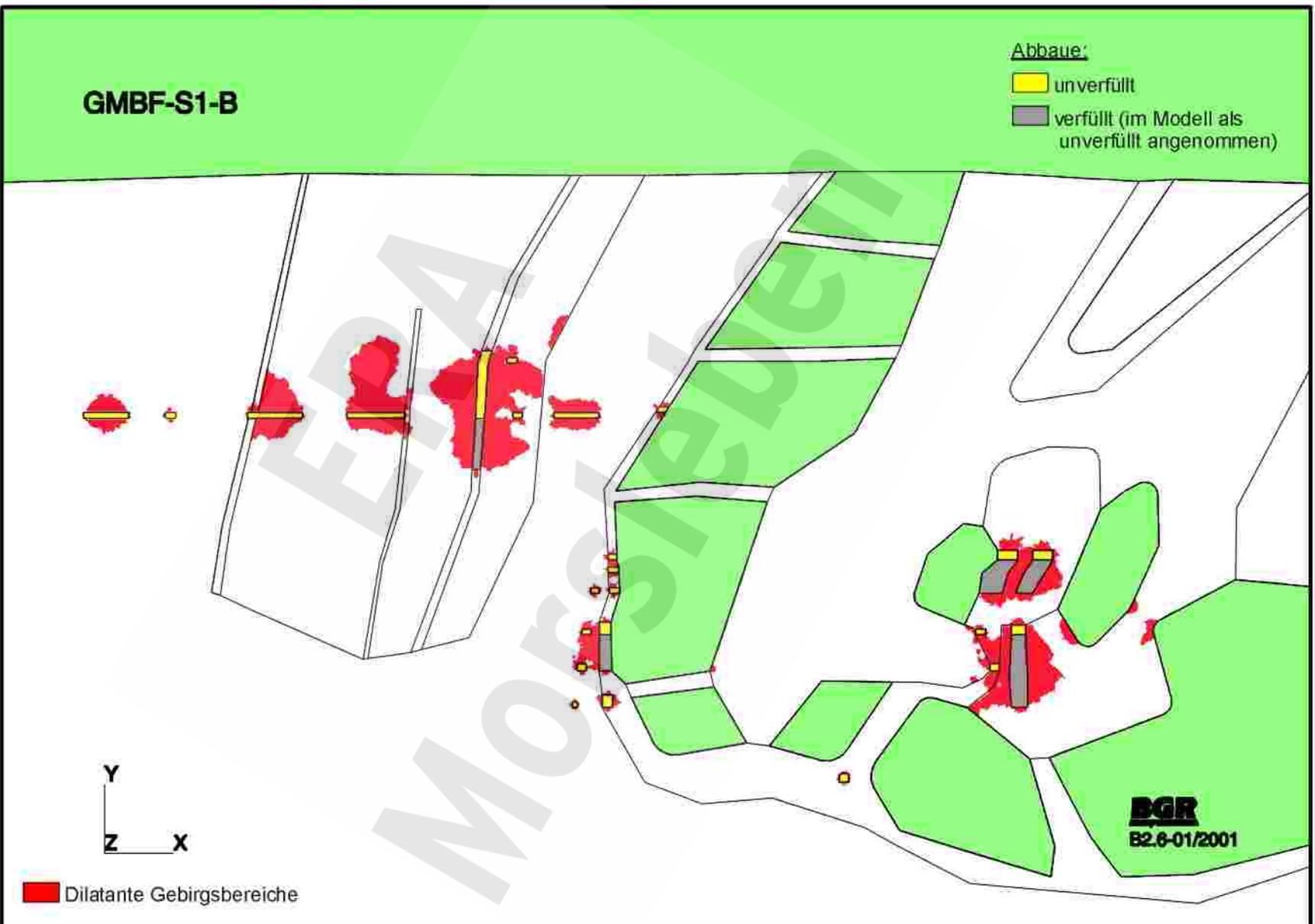




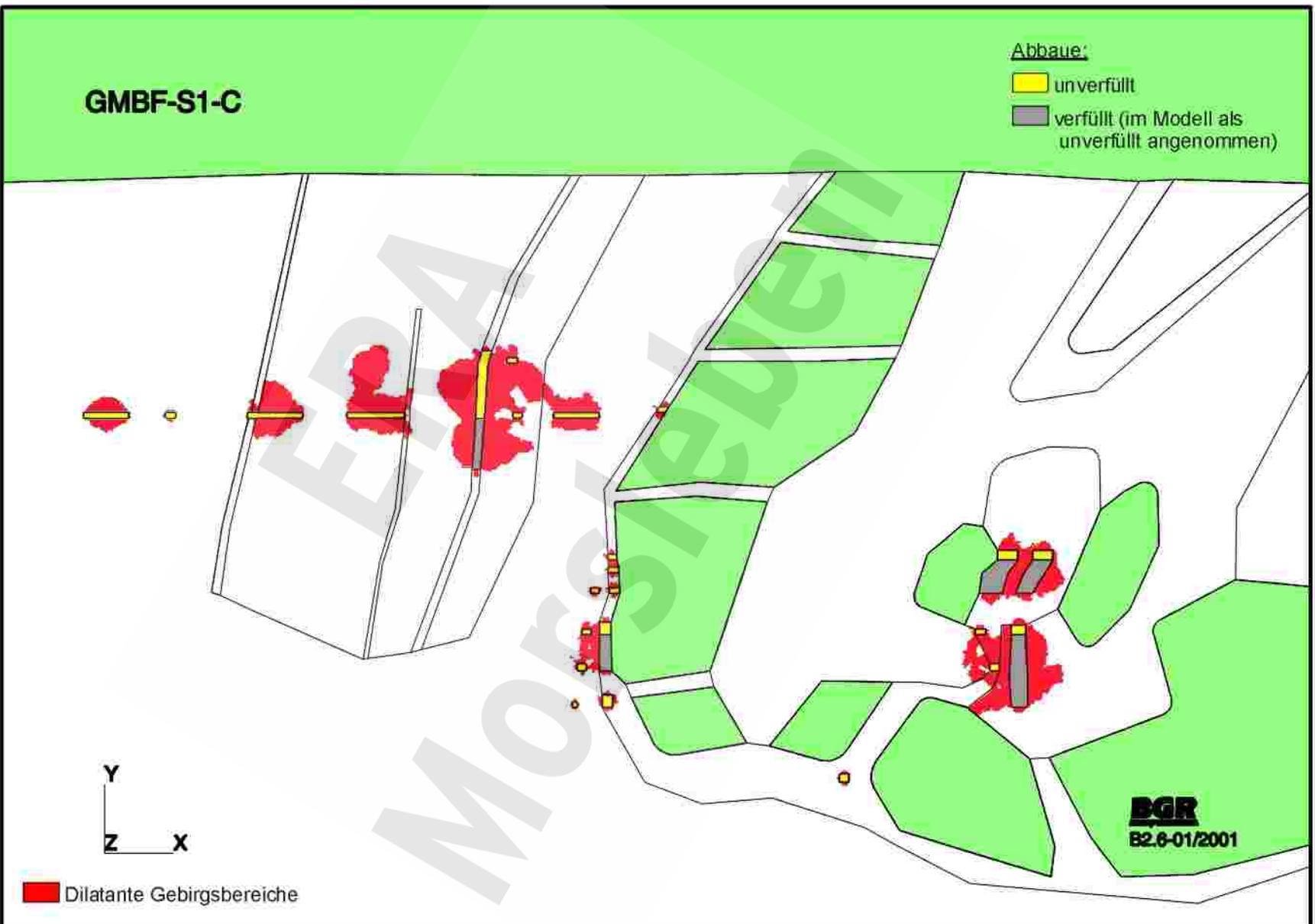
**GMBF-S1-A: Referenzmodell
 Dilatante Gebirgsbereiche nach 80 Jahren**



**GMBF-S1-A: Referenzmodell
Dilatante Gebirgsbereiche nach 130 Jahren**

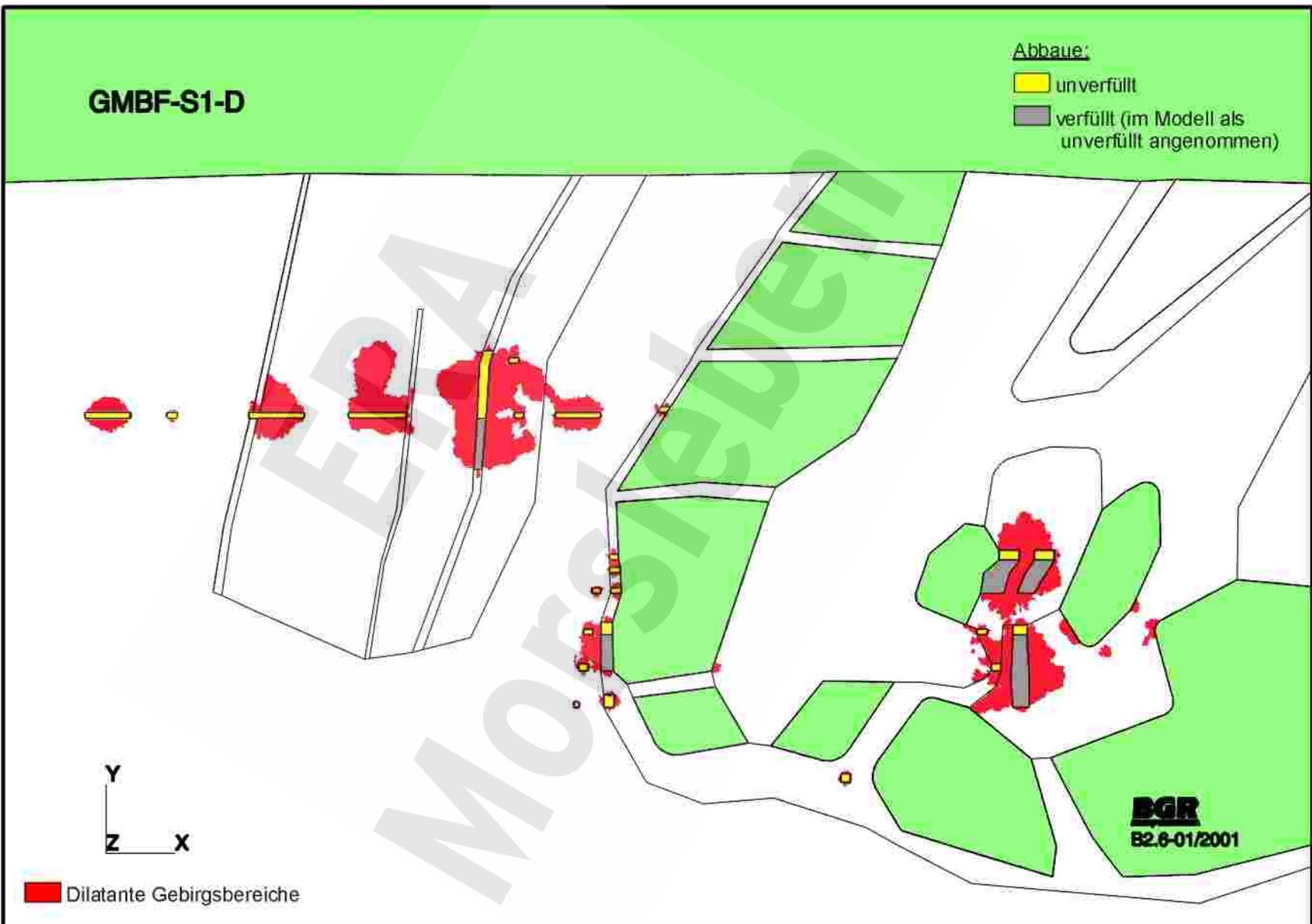


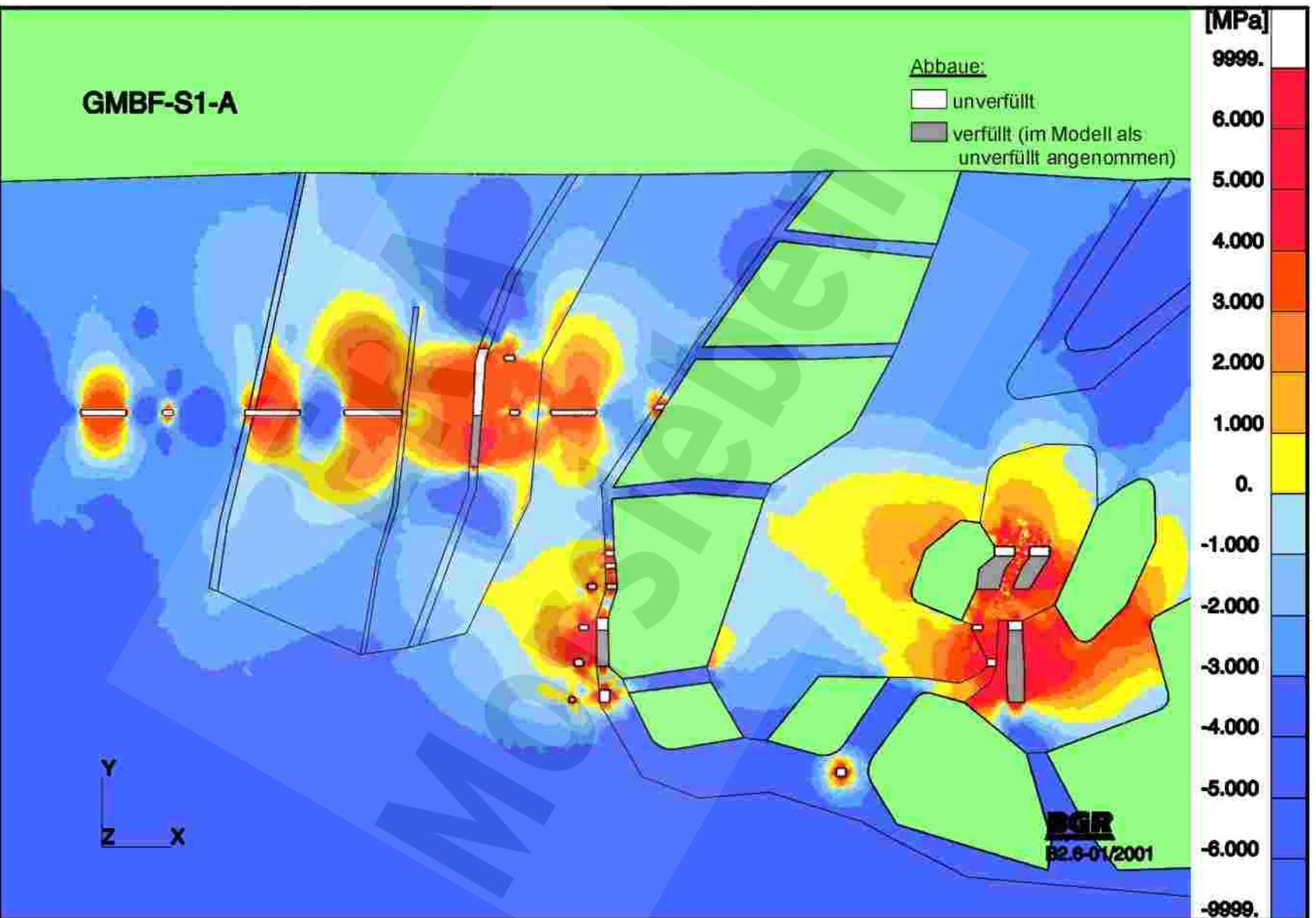
**GMBF-S1-B: Erhöhte Duktilität
 Dilatante Gebirgsbereiche nach 130 Jahren**



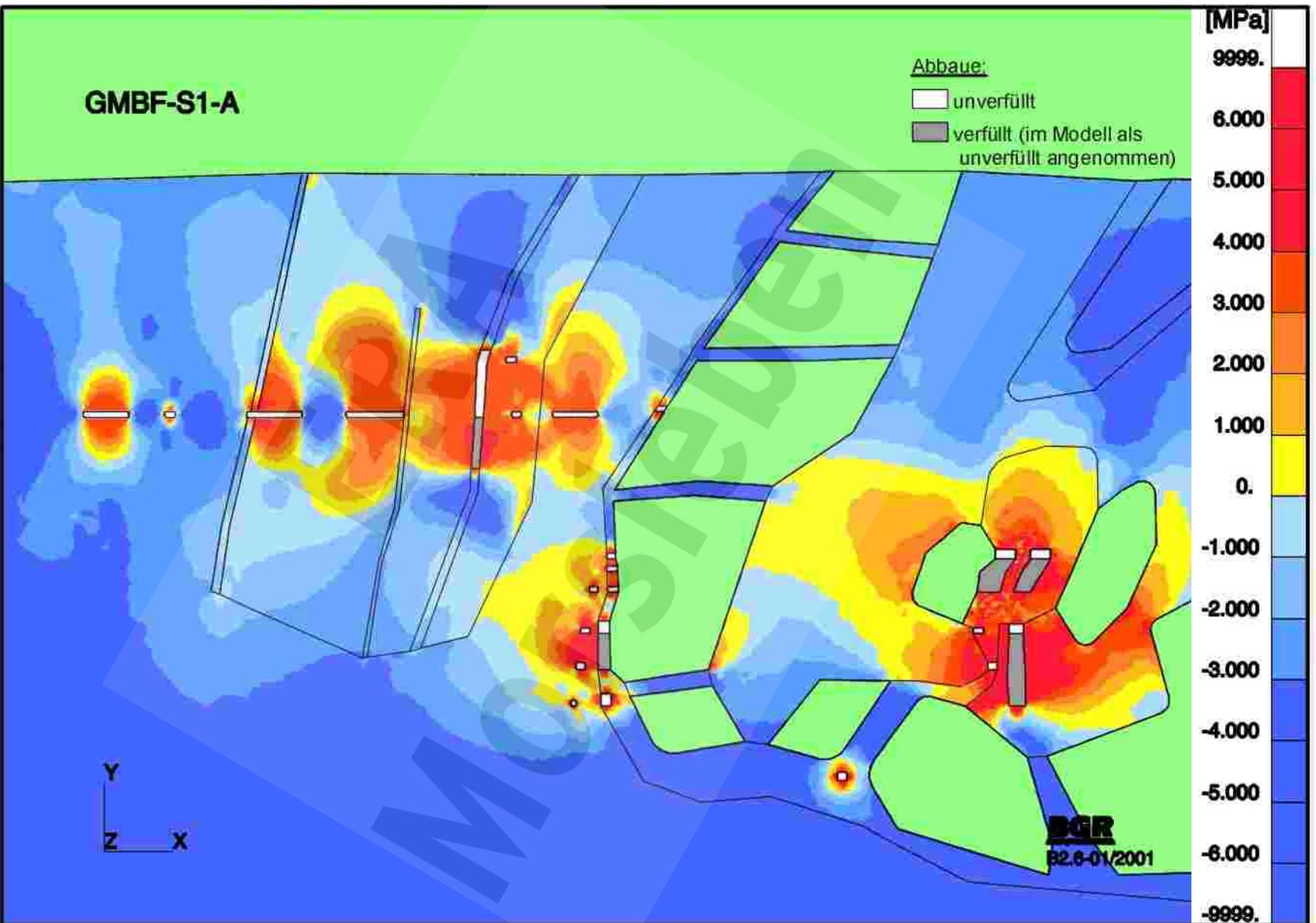
**GMBF-S1-C: Verminderte Duktilität
 Dilatante Gebirgsbereiche nach 130 Jahren**

**GMBF-S1-D: Erhöhte Anhydritsteifigkeit
Dilatante Gebirgsbereiche nach 130 Jahren**

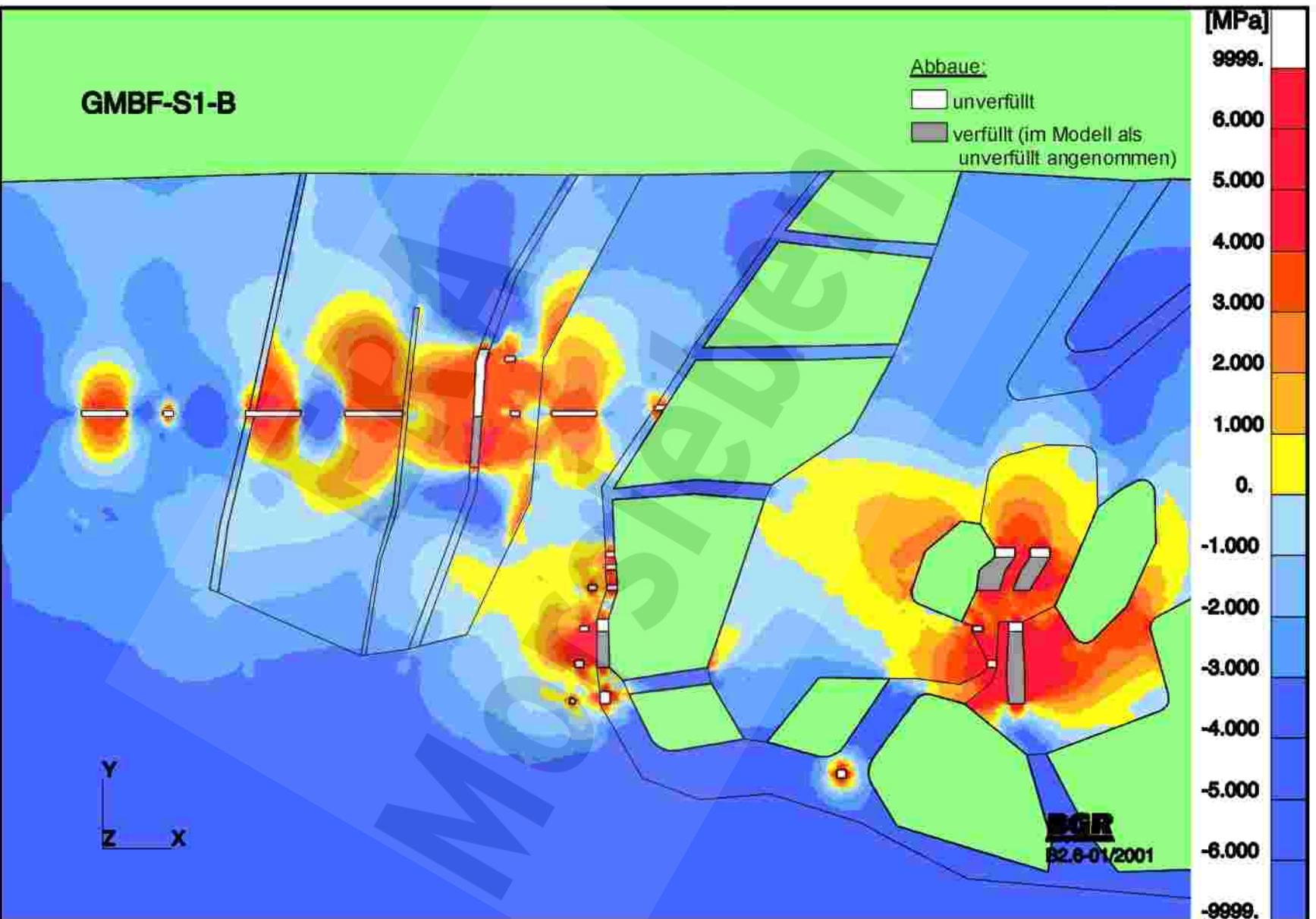




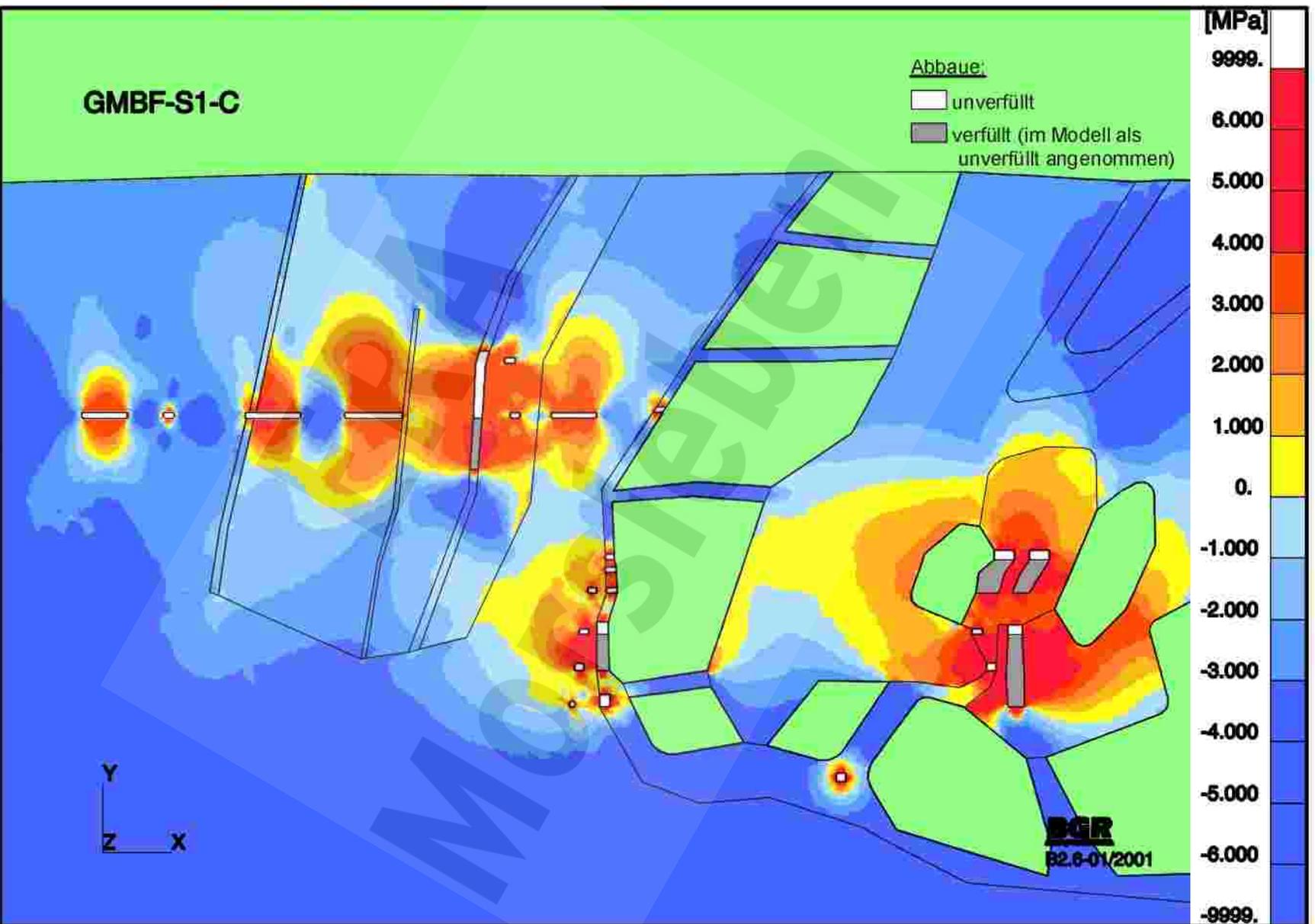
GMBF-S1-A: Referenzmodell
Hypothetisch laugendruckgefahrdete Bereiche nach 80 Jahren



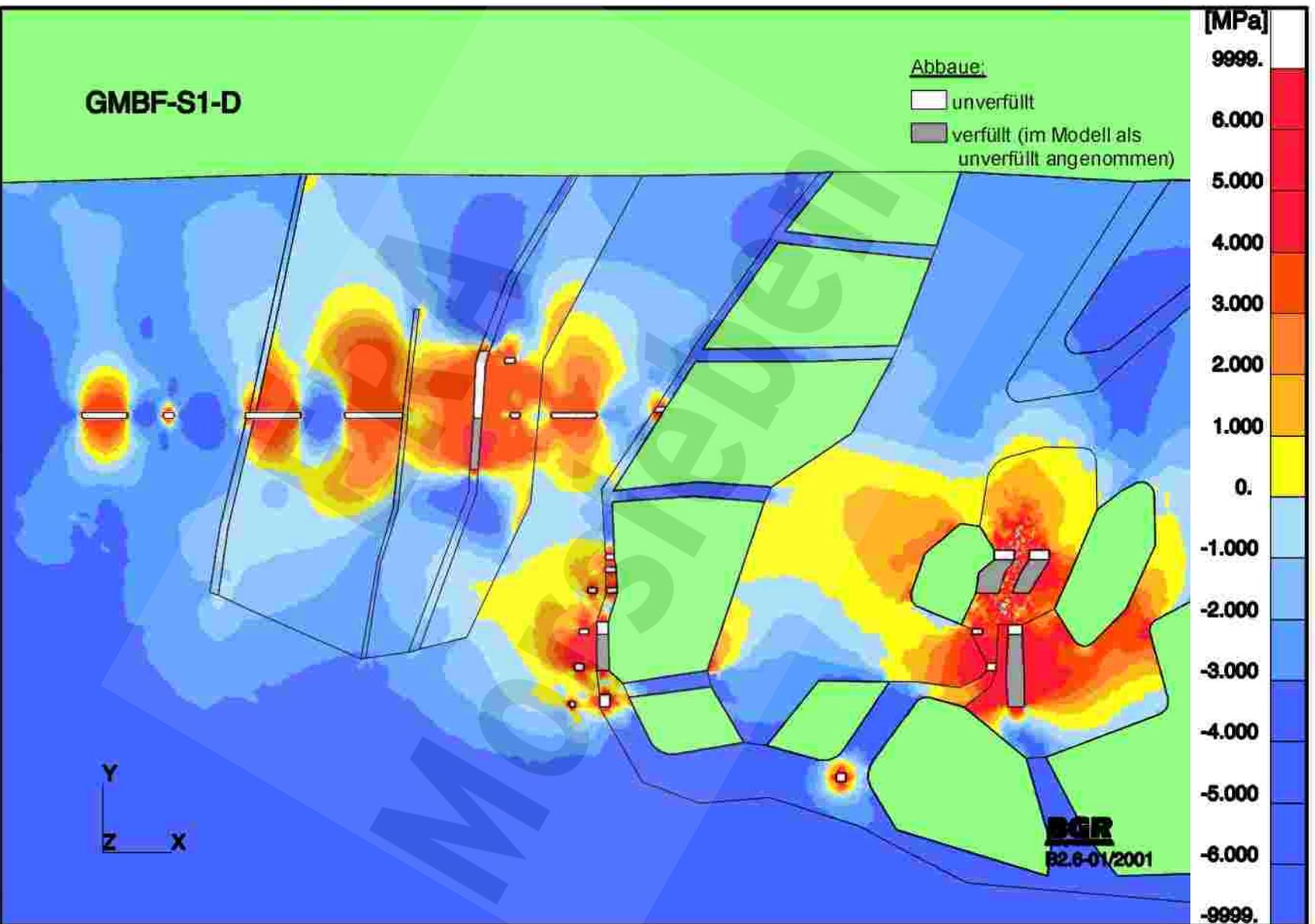
GMBF-S1-A: Referenzmodell
Hypothetisch laugendruckgefaehrdete Bereiche nach 130 Jahren



GMBF-S1-B: Erhöhte Duktilität
Hypothetisch laugendruckgefährdete Bereiche nach 130 Jahren



**GMBF-S1-C: Verminderte Duktilität
 Hypothetisch laugendruckgefaehrdete Bereiche nach 130 Jahren**



**GMBF-S1-D: Erhöhte Anhydritsteifigkeit
Hypothetisch laugendruckgefaehrte Bereiche nach 130 Jahren**