Radionuklidausbreitung
Aspekt 1: Bewertung des Radionuklidtransportes in der Gasphase

Fachöffentliche Ergebnispräsentation ÜsiKo Phase 2, 23.10.2024

Überblick

Δ24: Radionuklidtransport in der Gasphase (Szenarien)

- Es ist darzulegen, welche Prozesse beim Radionuklidtransport in der Gasphase eine Rolle spielen
- Die Prozesse und Szenarien wurden beschrieben

Δ25: Freisetzung von radioaktiven Gasen im und aus dem Grubengebäude in die Geosphäre

Δ26: Radionuklidtransport in der Gasphase in der Geosphäre

- Es ist zu zeigen ob, und wie Gase aus dem Grubengebäude freigesetzt und in der Geosphäre transportiert werden
- Es wurde festgestellt, dass die Gase unterhalb der Unterkreide bleiben und nicht in die Biosphäre gelangen

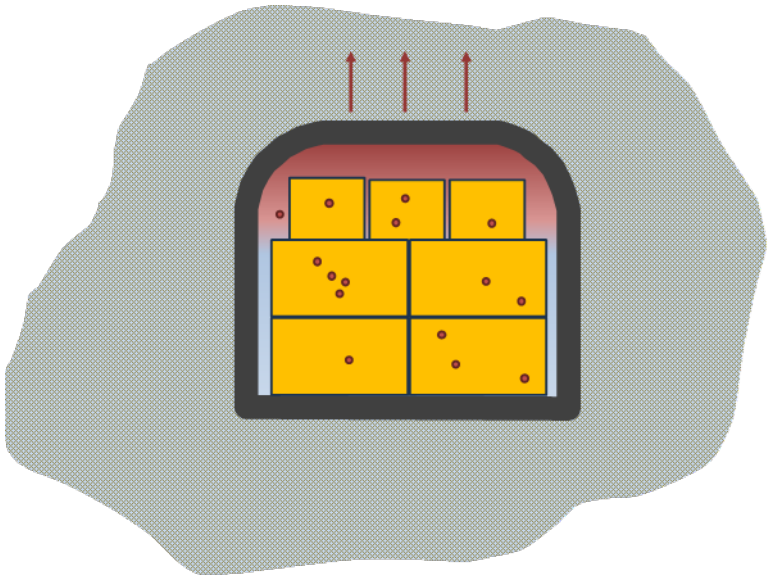
Δ27: Untersuchung der Relevanz von Gas-Fracs für einen möglichen Radionuklidtransport in der Gasphase

- Es ist zu zeigen ob, gasdruckinduzierte Klüfte entstehen können
- Es wurde festgestellt, dass der Druck zu niedrig ist und keine gasdruckinduzierten Klüfte entstehen können

Szenario für den Gaspfad nach Stand von W&T

Beschreibung erfolgt entsprechend nationalen und internationalen Forschungsprojekten

- Sauerstoff im Grubengebäude wird durch aerobe Prozesse schnell aufgebraucht
- Lösung tritt in das Grubengebäude ein
- Nach 115 Jahren ist das Grubengebäude aufgesättigt
- Bei Kontakt der Abfälle mit Wasser werden durch die anaerobe Korrosion von Metallen und die organische Degradation von Organika Gase gebildet
- Gasdruckaufbau führt zu einer Gasbewegung und Verdrängung von Lösung
- Übersteigt der Gasdruck die Summe aus hydrostatischen Druck und Gaseindringdruck im Wirtsgestein kann Gas in das Wirtsgestein eindringen



Szenario für den Gaspfad nach Stand von W&T

Beschreibung erfolgt entsprechend nationalen und internationalen Forschungsprojekten

- Sauerstoff im Grubengebäude wird durch aerobe Prozesse schnell aufgebraucht
- Lösung tritt in das Grubengebäude ein
- Nach 115 Jahren ist das Grubengebäude aufgesättigt
- Bei Kontakt der Abfälle mit Wasser werden durch die anaerobe Korrosion von Metallen und die organische Degradation von Organika Gase gebildet
- Gasdruckaufbau führt zu einer Gasbewegung und Verdrängung von Lösung
- Übersteigt der Gasdruck die Summe aus hydrostatischem Druck und Gaseindringdruck im Wirtsgestein kann Gas in das Wirtsgestein eindringen

- Die große Menge gebildeter Gase kann bei einer Freisetzung als Trägergas für eine geringe Menge radioaktiver Gase fungieren (z. B. C-14, CH_3Se, C_2H_6Se, CH_3I)
- Gase können theoretisch bis in die Biosphäre transportiert werden, wo der radioaktive Anteil zu einer Strahlenexposition führen könnte
  - Falls dies der Fall ist, dann sind die radiologischen Konsequenzen zu bewerten

Vorgehen

- Werden Gase in relevanten Mengen im Endlager Konrad gebildet?
  - Quantitative Abschätzung der Gasmengen

Ja? →

- Werden Gase aus dem Grubengebäude in die Geosphäre freigesetzt?
  - 2-Phasen Modellrechnungen mit TOUGH2
  - 3D Modell bis 31,5 km Länge und -399 bis -1.051 m Teufe
  - Berücksichtigung der Ungewissheiten
    - Variationen der Transportparameter
    - Variationen der Modellgeometrie

Ja? →

- Werden (radioaktive) Gase in die Biosphäre freigesetzt?

Ja? →

Nein

Analyse der Konsequenzen

Keine radiologische Konsequenz

Gasbildung

- Gasbildung durch anaerobe Korrosion von Metallen und der mikrobiellen Degradation von Organika
- Stoffmengen nach Kugel & Möller 2003
- Größte Masse der Stoffe haben die Abfallbehälter mit 294 622 Tonnen Eisen
- Gebildete Gasmenge wird durch die chemische Reaktionsgleichung bestimmt
- Reaktion mit maximaler Gasbildung wird gewählt

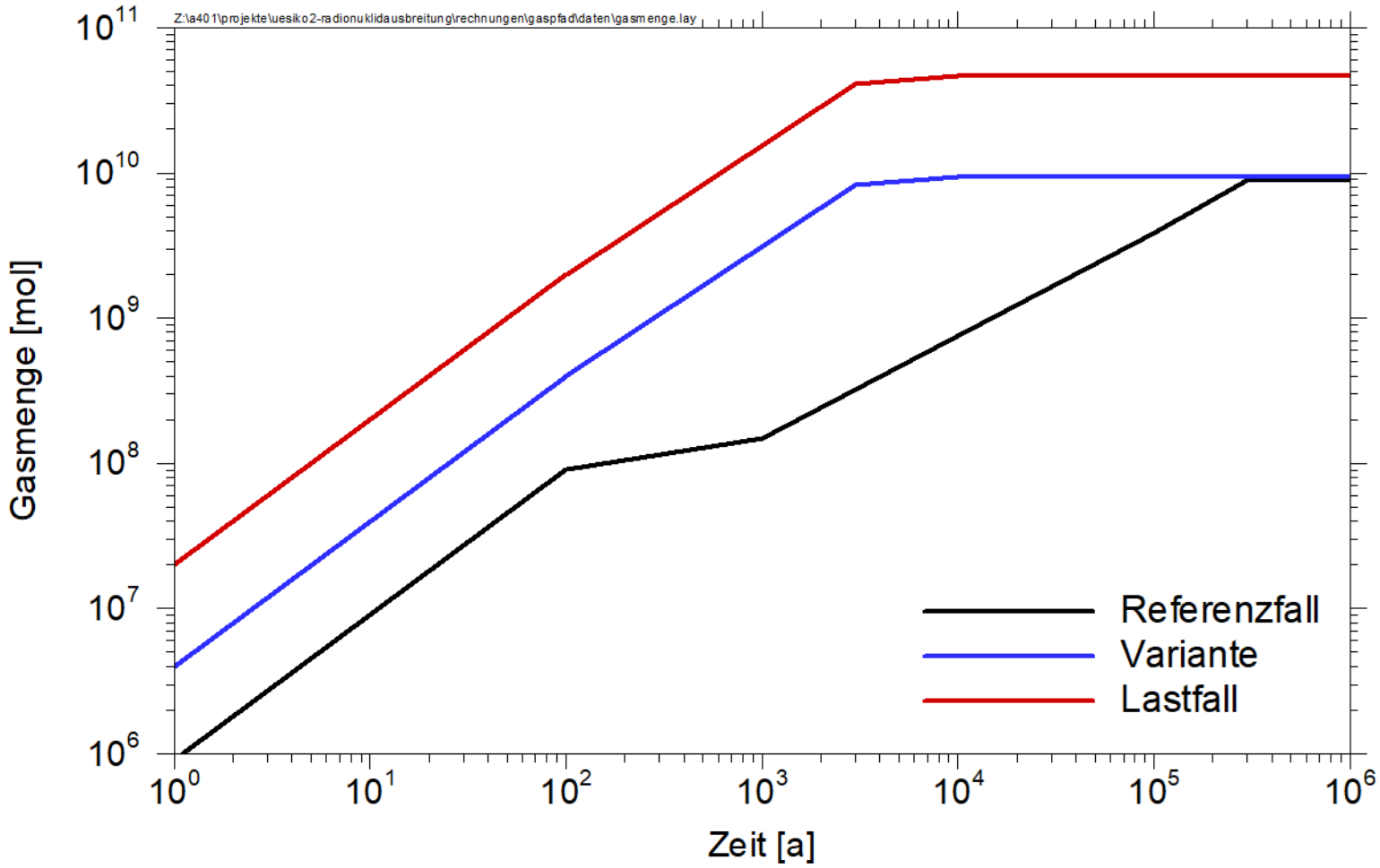
Stoff	Menge [t]	Reaktionsgleichung
Aluminium	916	$2\ Al + 6\ H_2O \rightarrow 2\ Al(OH)_3 + 3\ H_2$
Zink	3,5	$Zn + 2\ H_2O \rightarrow Zn(OH)_2 + H_2$
Zirkonium	1 528	$Zr + 2\ H_2O \rightarrow ZrO_2 + 2\ H_2$
Eisen	319 741	$3\ Fe + 4\ H_2O \rightarrow Fe_3O_4 + 4\ H_2$
Organika/Zellulose	815	$C_6H_{12}O_6 + 2\ H_2O \rightarrow 4\ CO_2 + 4\ H_2 + 2\ CH_4$
Kunststoffe/Öle	8 443	$6\ C_2H_4 + 16\ H_2O \rightarrow 8\ CO_2 + 20\ H_2 + 4\ CH_4$

Gasbildung

- Gasbildung durch anaerobe Korrosion von Metallen und der mikrobiellen Degradation von Organika
- Stoffmengen nach Kugel & Möller 2003
- Größte Masse der Stoffe haben die Abfallbehälter mit 294 622 Tonnen Eisen
- Gebildete Gasmenge wird durch die chemische Reaktionsgleichung bestimmt
- Reaktion mit maximaler Gasbildung wird gewählt
- 3 Varianten als Grundlage für die numerischen Rechnungen
  - Referenzfall: Erwartete Umsetzungsdauer, erwartete Ausfällung von CO_2
  - Variante: Schnelle Umsetzung, keine Ausfällung von CO_2
  - Lastfall: Wie Variante, mit fünffach erhöhter Stoff- / Gasmenge
- Gasproduktion ist nicht durch den Wasserverbrauch beschränkt

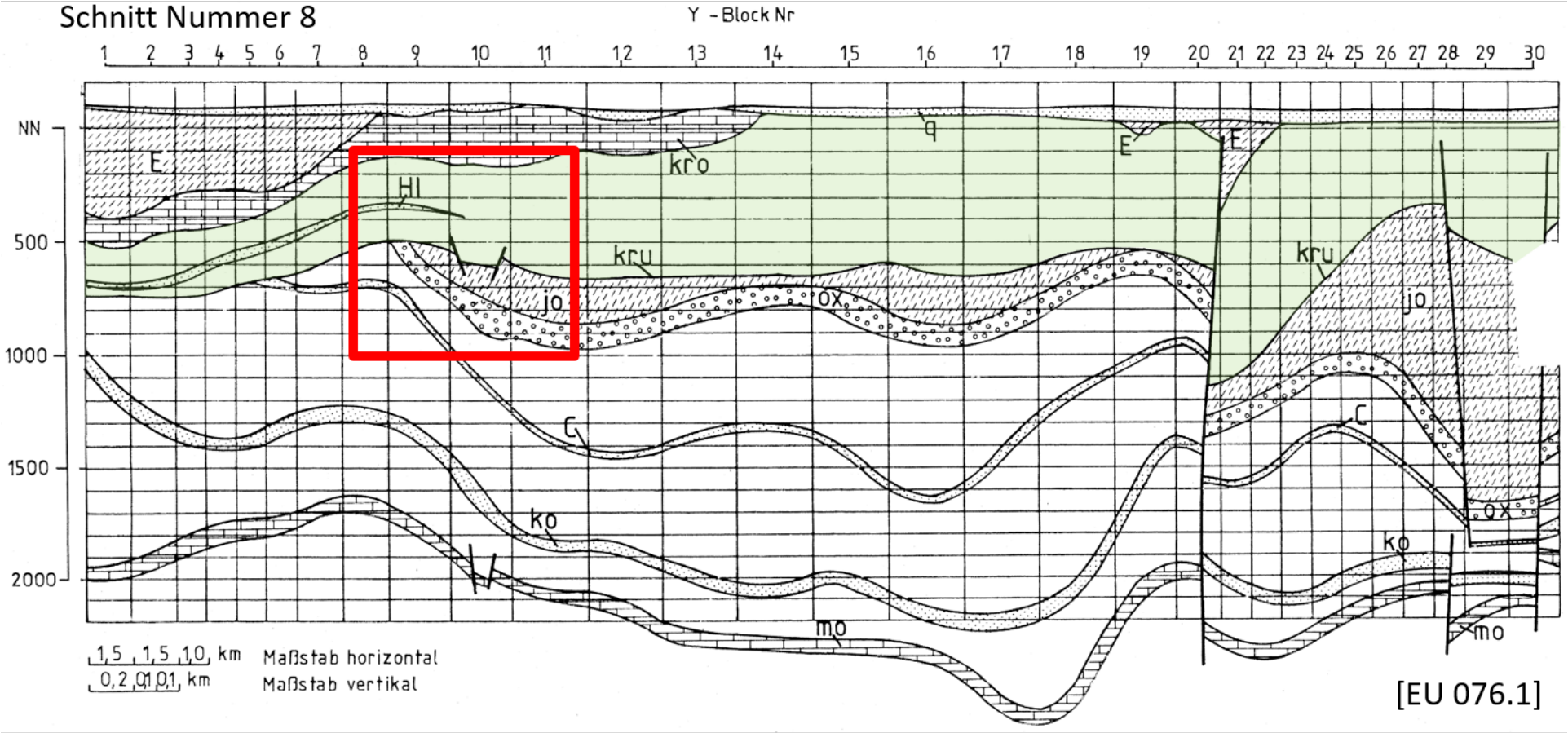
Material	Umsetzungsdauer [a]	
	Referenzfall	Variante
Umsetzungsdauer Eisen [a]	300 000	3 000
Umsetzungsdauer sonst. Metalle [a]	100	100
Umsetzungsdauer Zellulose [a]	1 000	1 000
Umsetzungsdauer Kunststoffe [a]	100 000	10 000

Zeitliche Entwicklung der Gasmenge



- Gasmenge ist zu groß, um im Grubengebäude gespeichert zu werden, Freisetzung aus dem Grubengebäude ist numerisch zu untersuchen

Geologisches Modell

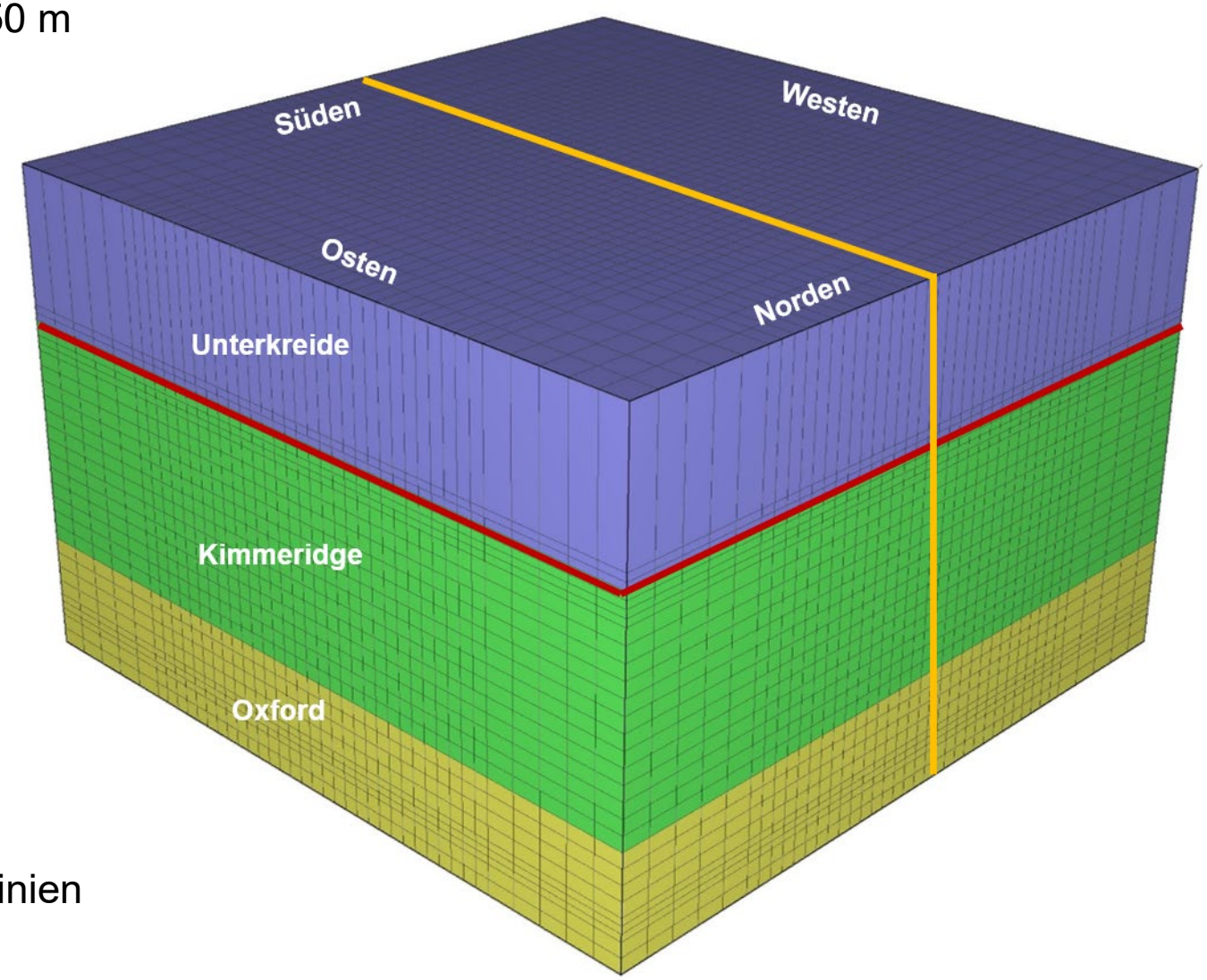


Modellgebiet

q	Quartär	jo	Oberer Jura
t	Tertiär	ox	Oxford
E	Emscher Mergel	C	Cornbrash
kro	Oberkreide	ko	Räth
Hl	Hilssandstein	mo	Oberer Muschelkalk
kru	Unterkreide		

Geometrie des numerischen Modells mit TOUGH2

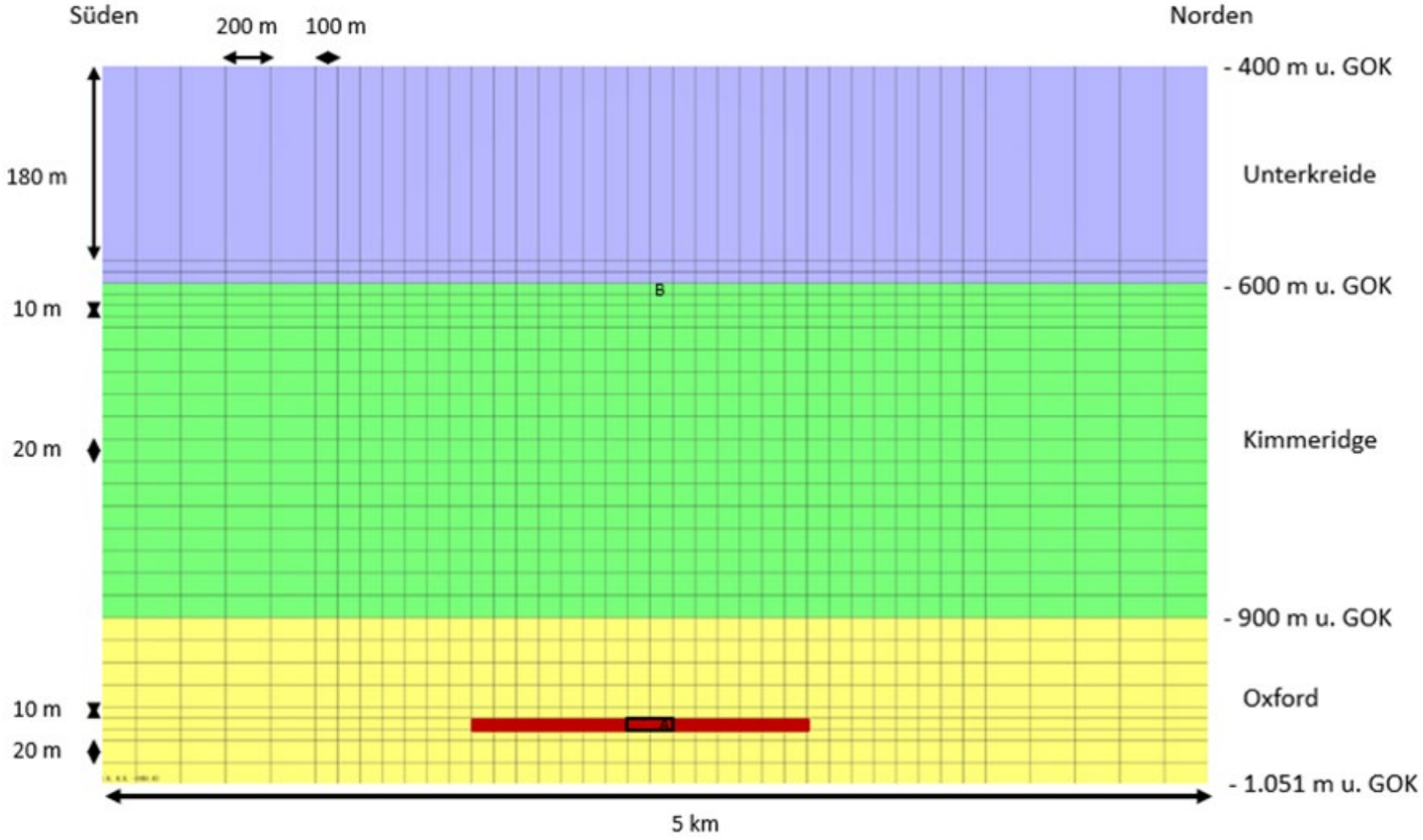
Größe: 5 000 x 5 000 x 650 m



Gelbe / rote Linie: Schnittlinien

Geometrie des numerischen Modells mit TOUGH2

vertikal 5-fach überhöht



Eingangsdaten

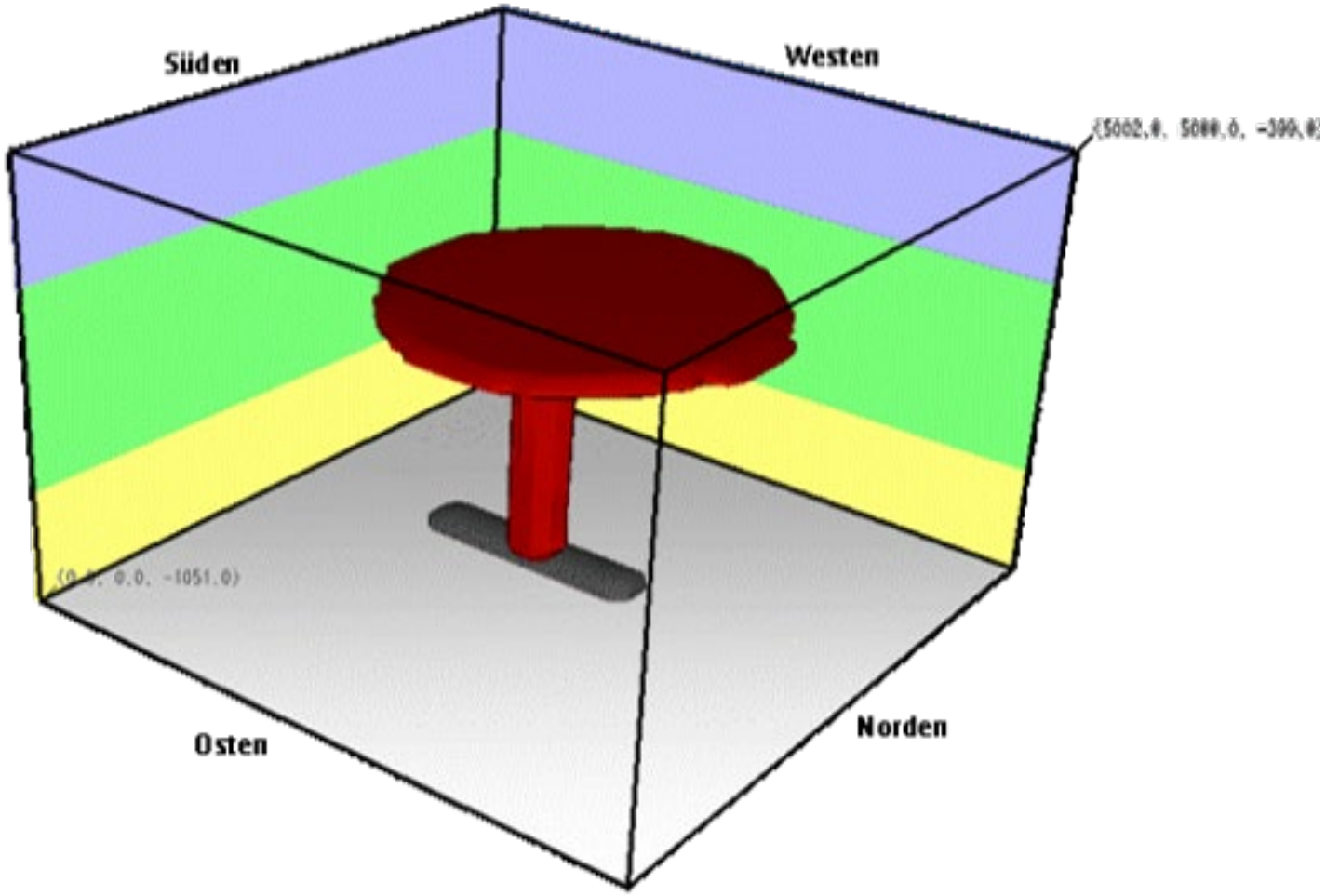
Parameter	Unterkreide	Kimmeridge	Oxford	Grubengebäude
Porosität n [-]	0,2**	0,1***	0,1***	0,4*
Permeabilität κ [m²]	$6 \cdot 10^{-18}$**	$1 \cdot 10^{-16}$***	$1 \cdot 10^{-15}$***	$1 \cdot 10^{-11}$***
Residuale Wassersättigung S_{lr} [-]	0,5**	0,35***	0,275***	0,2***
Residuale Gassättigung S_{gr} [-]	0,003**	0,05***	0,035***	0,02***
Maximale Wassersättigung [-]	1,0*	1,0*	1,0*	1,0*
Initiale Wassersättigung $S_{w\ ini}$ [-]	1,0*	1,0*	1,0*	0,7*
Gaseindringdruck α [Pa]	$1{,}8 \cdot 10^{7}$**	7.500***	5.000***	1.500***
Abschneidekriterium P_{max} [Pa]	$1 \cdot 10^{9}$*	$1 \cdot 10^{9}$*	$1 \cdot 10^{9}$*	$1 \cdot 10^{9}$*
Formfaktor λ [-]	0,5**	0,9***	0,85***	0,83***
Feststoffdichte [kg/m³]	2.600*	2.600***	2.600***	2.600***
Porenkompressibilität [Pa^{-1}]	$5{,}8 \cdot 10^{-10}$*	$5{,}8 \cdot 10^{-10}$***	$5{,}8 \cdot 10^{-10}$***	$5{,}8 \cdot 10^{-10}$***

* Modellannahme

** Nagra, 2008

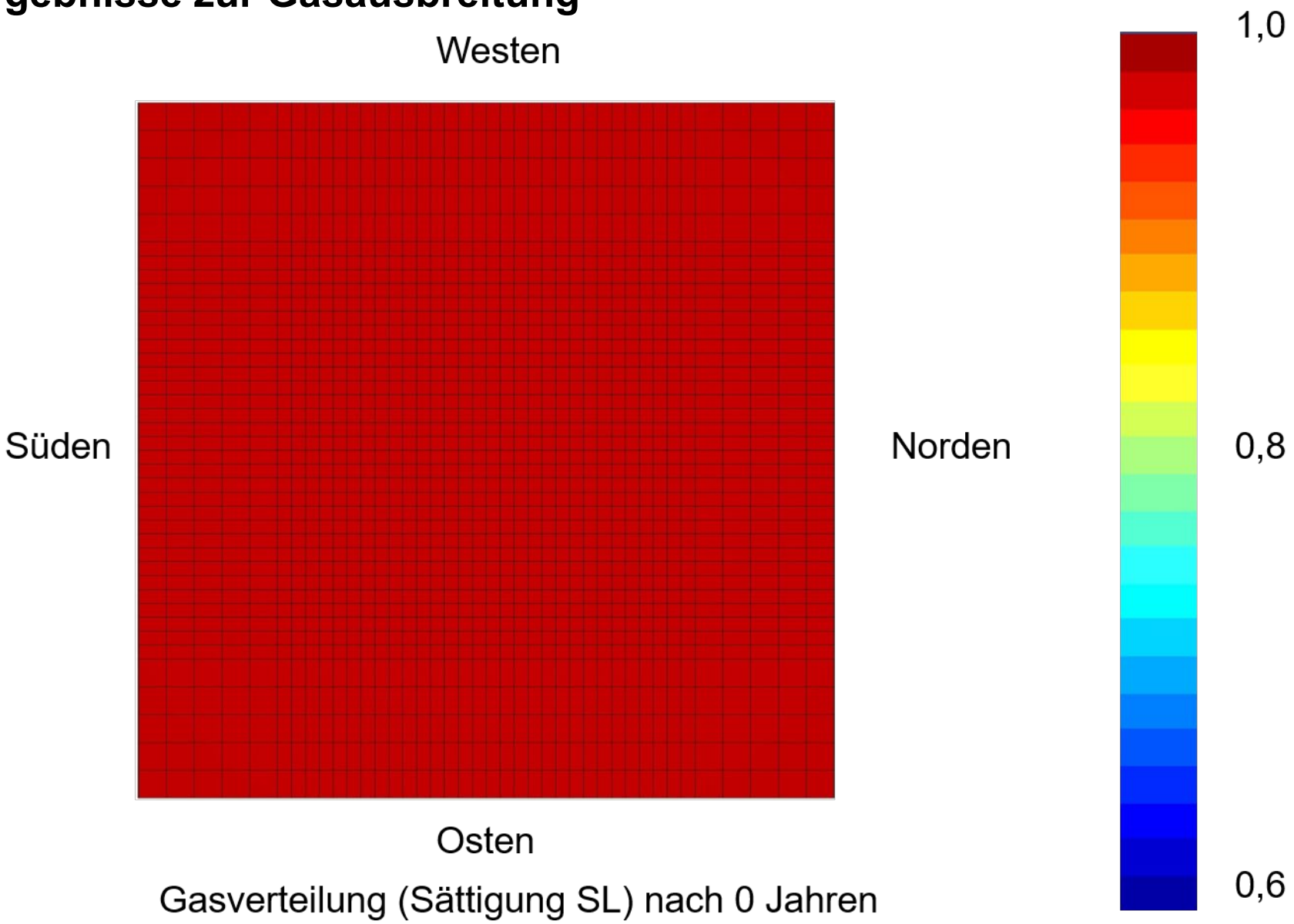
*** GRS-A-1925

Referenzfall: Ergebnisse zur Gasausbreitung

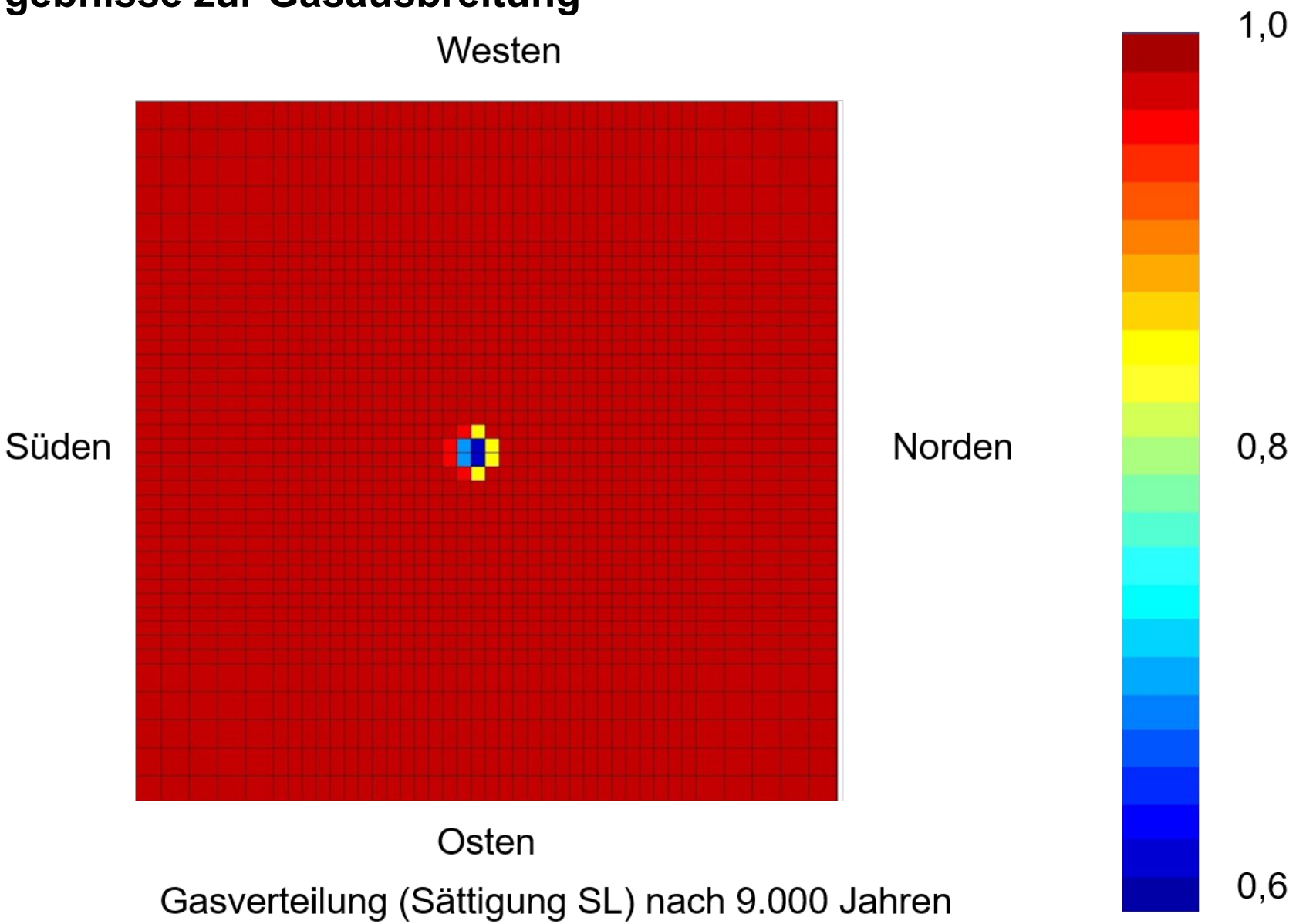


Gasverteilung (Sättigung SL) nach 300.000 Jahren

Referenzfall: Ergebnisse zur Gasausbreitung



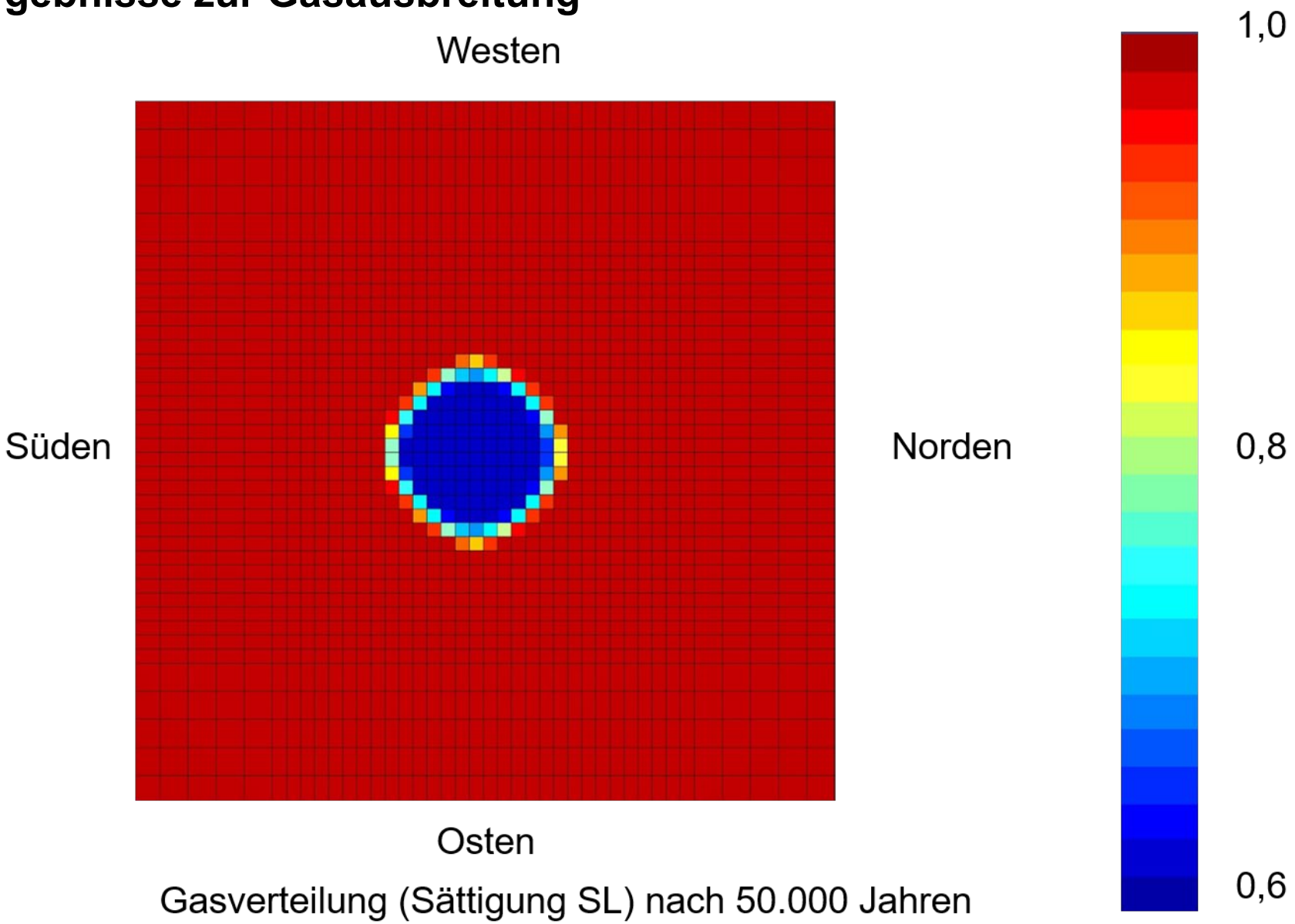
Referenzfall: Ergebnisse zur Gasausbreitung



Gasverteilung (Sättigung SL) nach 9.000 Jahren

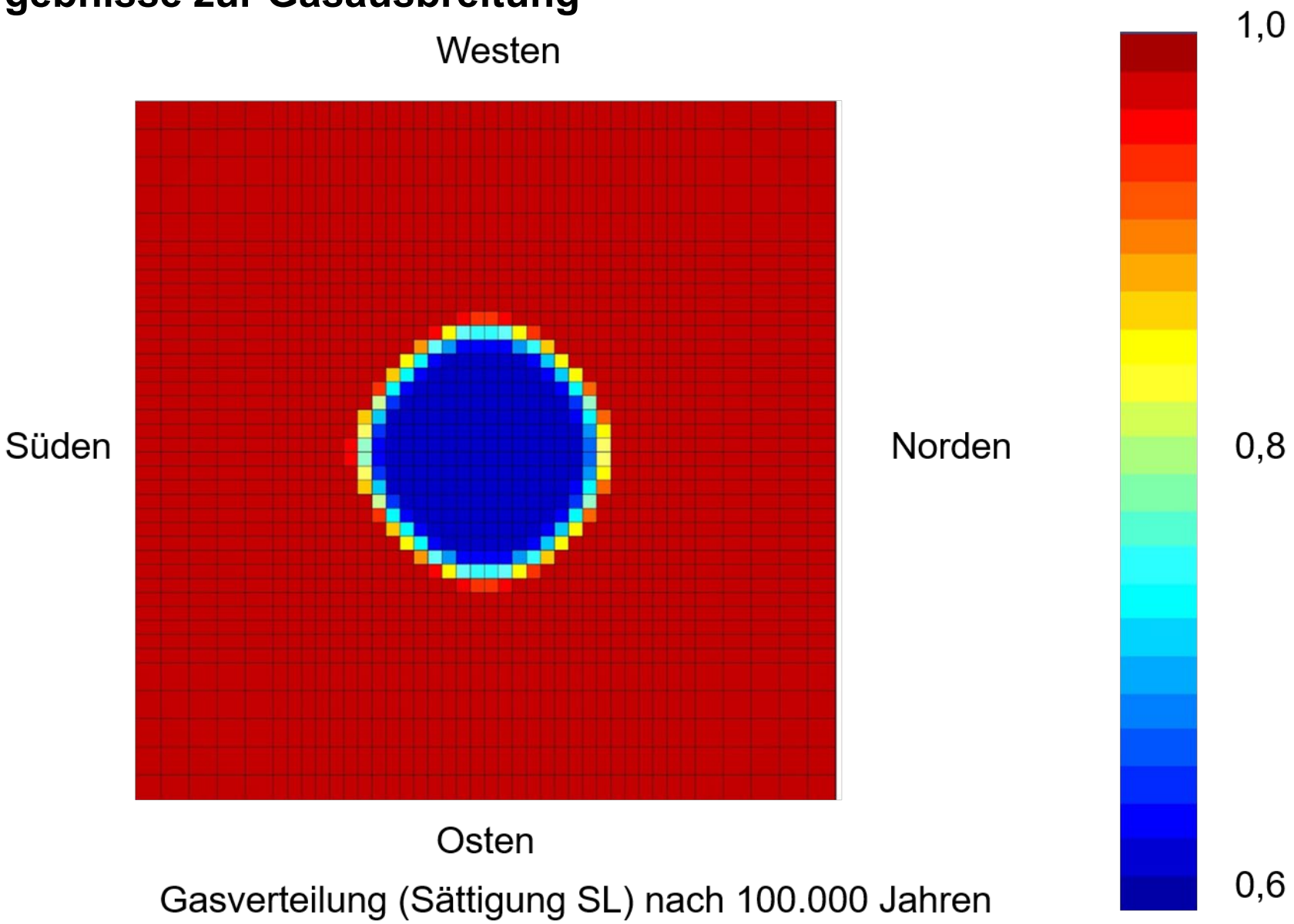
Gas erreicht die Unterkante der Unterkreide

Referenzfall: Ergebnisse zur Gasausbreitung



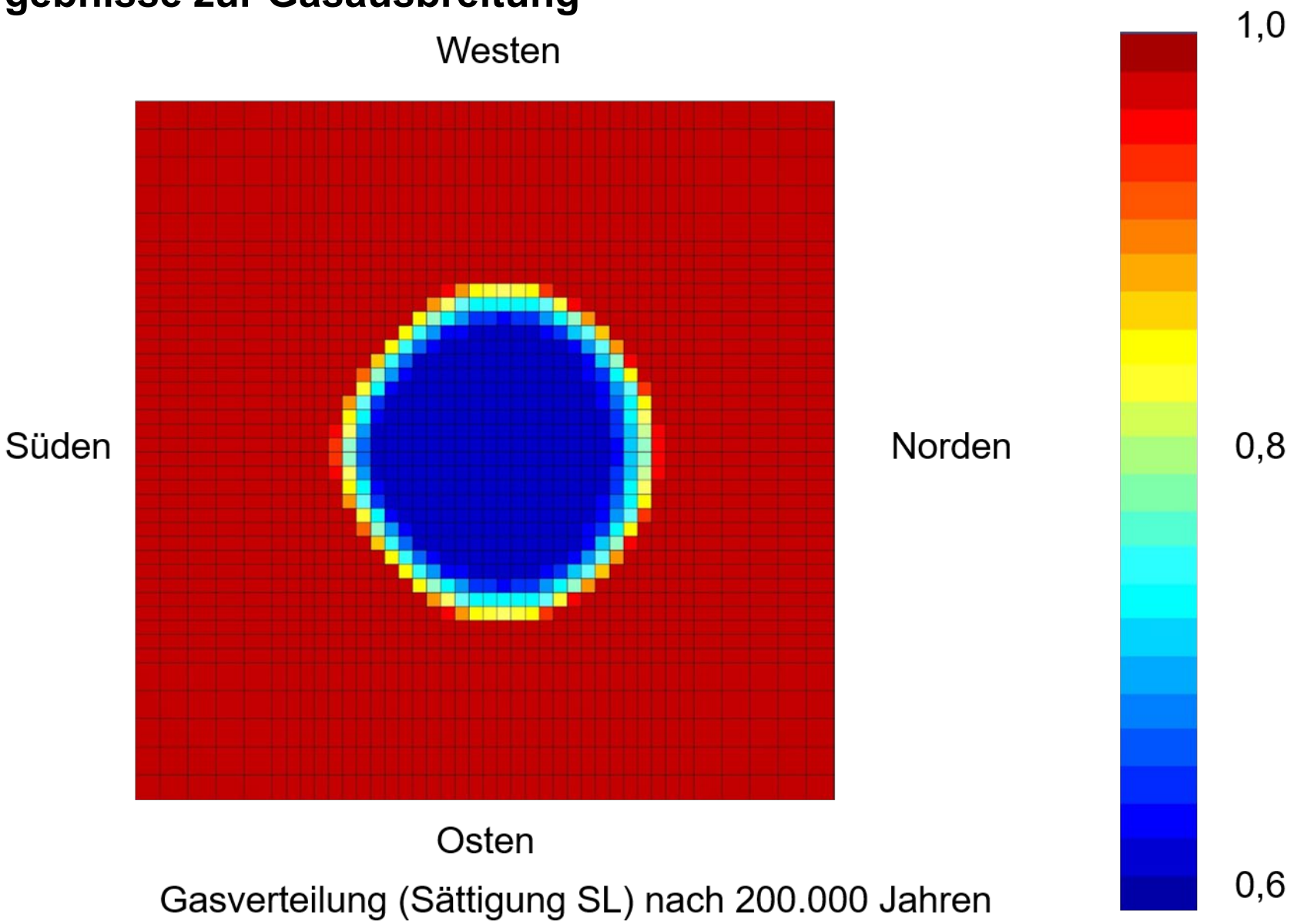
Gasverteilung (Sättigung SL) nach 50.000 Jahren

Referenzfall: Ergebnisse zur Gasausbreitung



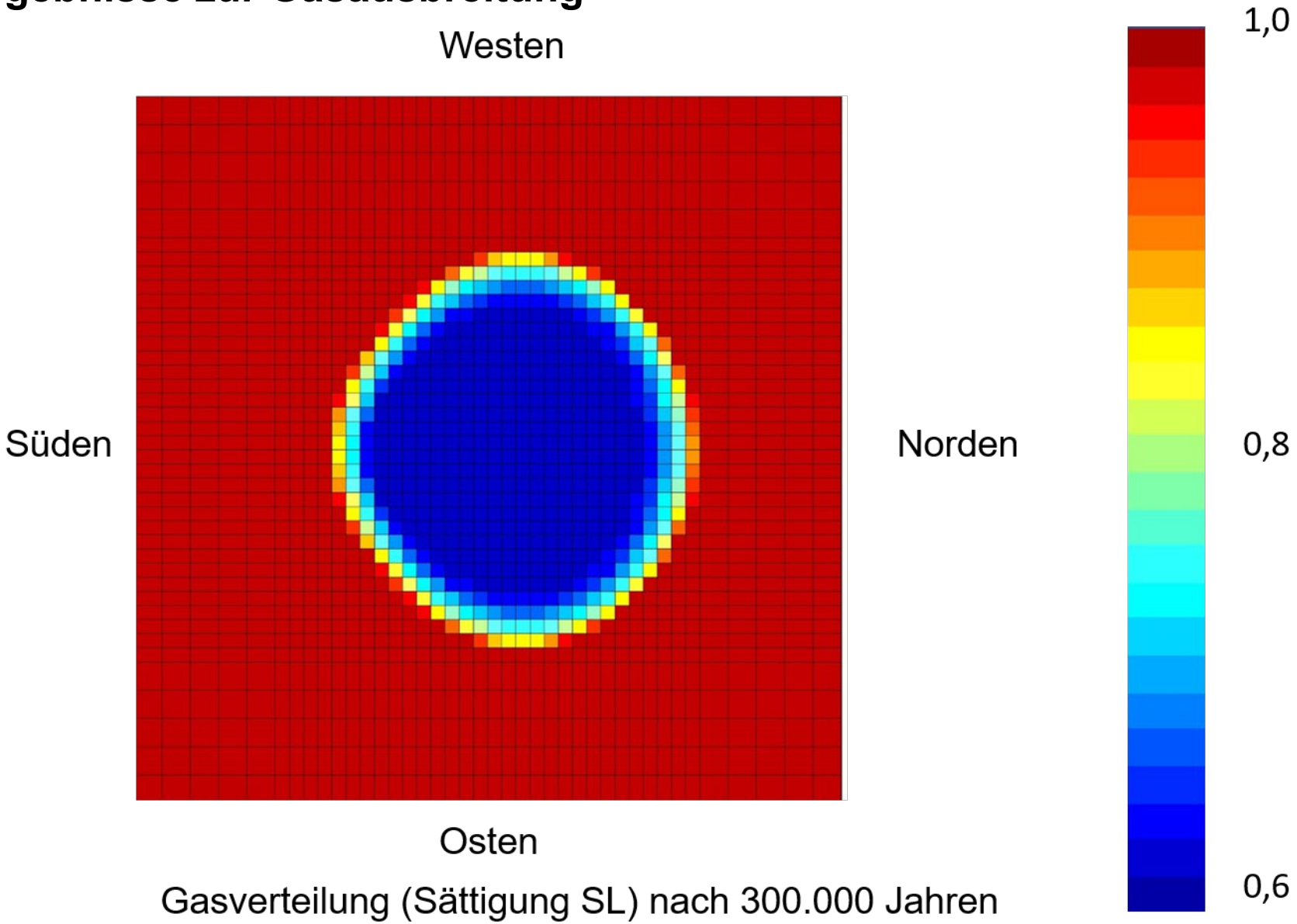
Gasverteilung (Sättigung SL) nach 100.000 Jahren

Referenzfall: Ergebnisse zur Gasausbreitung



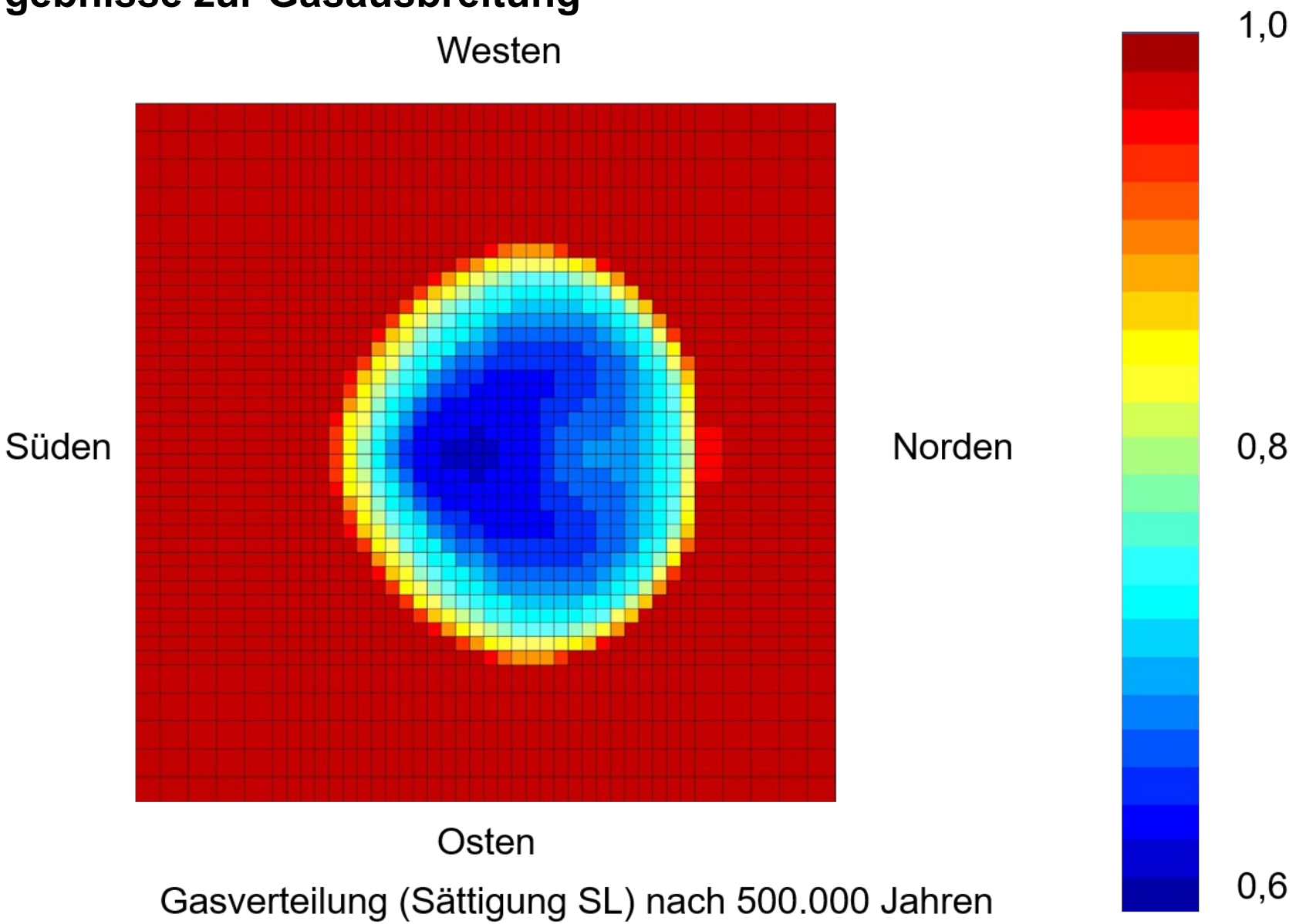
Gasverteilung (Sättigung SL) nach 200.000 Jahren

Referenzfall: Ergebnisse zur Gasausbreitung



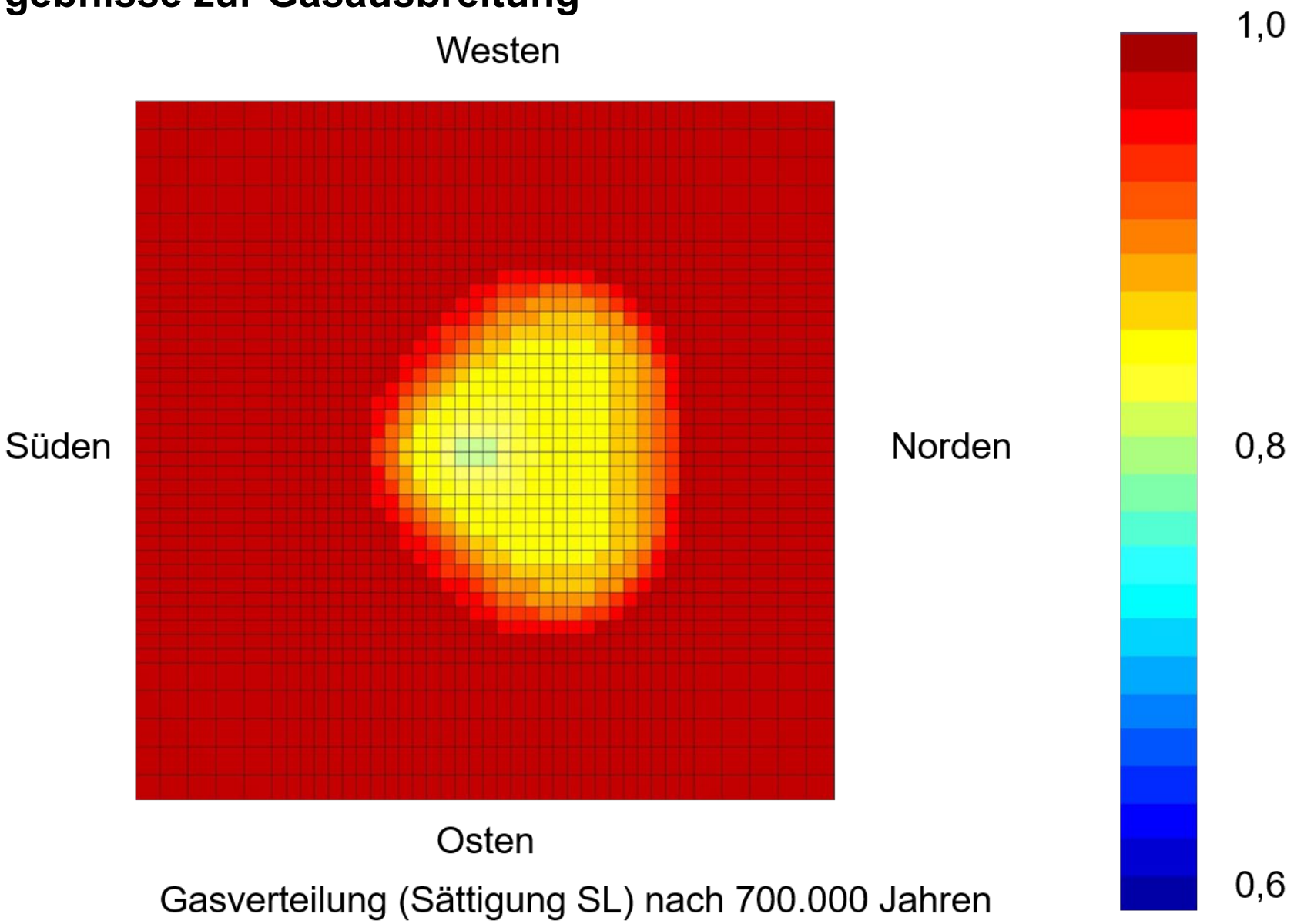
Gasverteilung (Sättigung SL) nach 300.000 Jahren
Gasbildung endet

Referenzfall: Ergebnisse zur Gasausbreitung



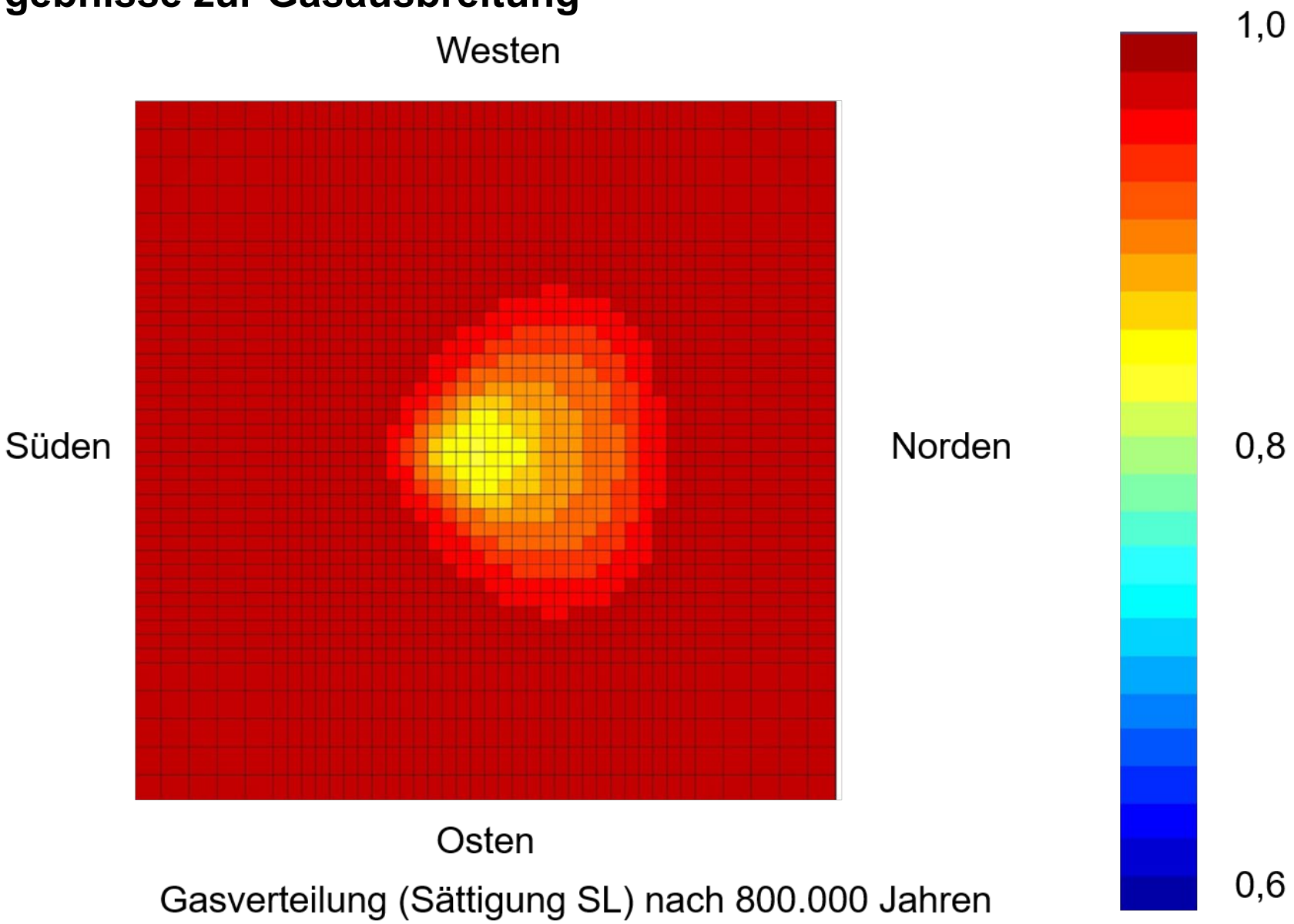
Gasverteilung (Sättigung SL) nach 500.000 Jahren
Maximale Ausbreitung

Referenzfall: Ergebnisse zur Gasausbreitung



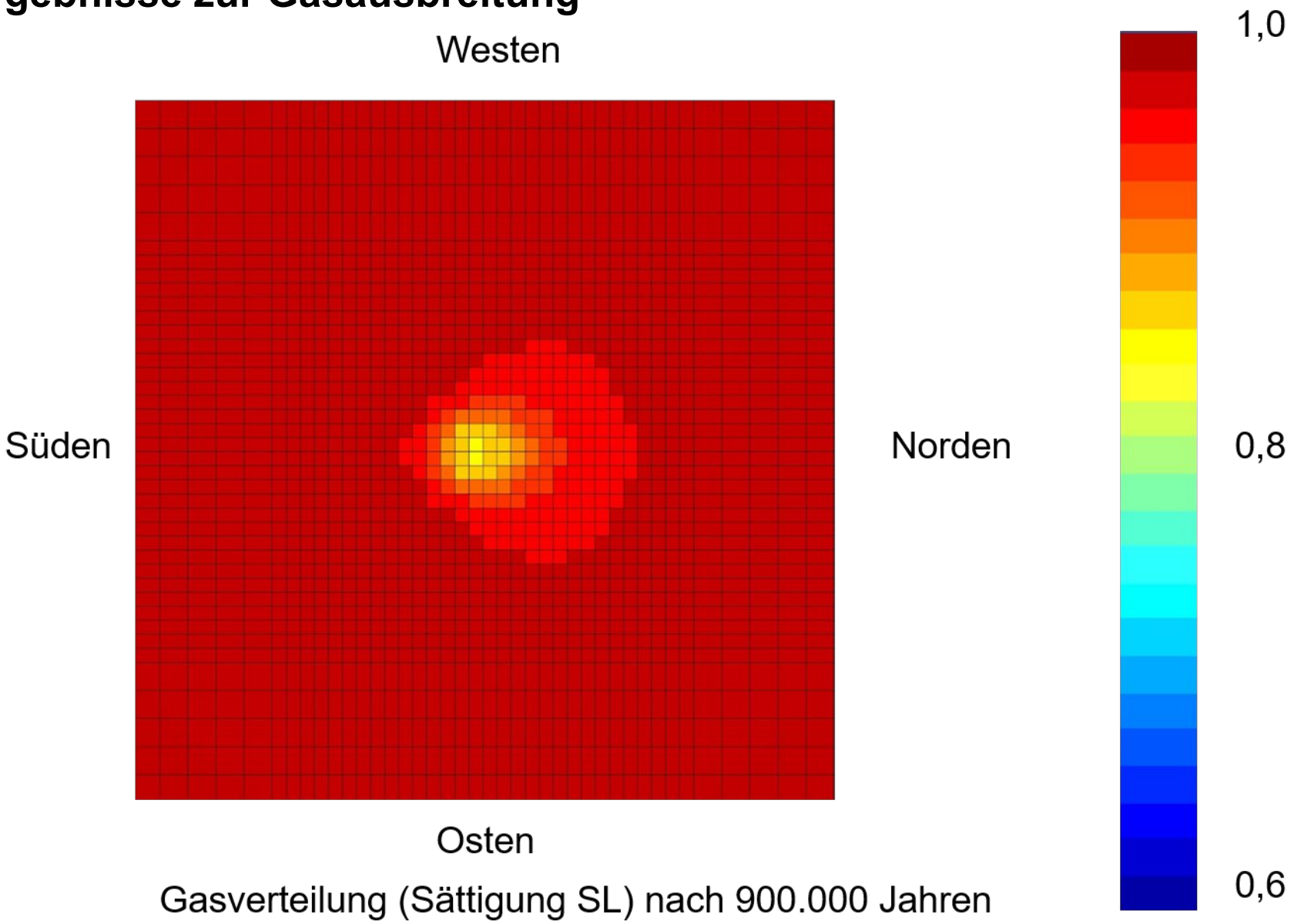
Gasverteilung (Sättigung SL) nach 700.000 Jahren

Referenzfall: Ergebnisse zur Gasausbreitung



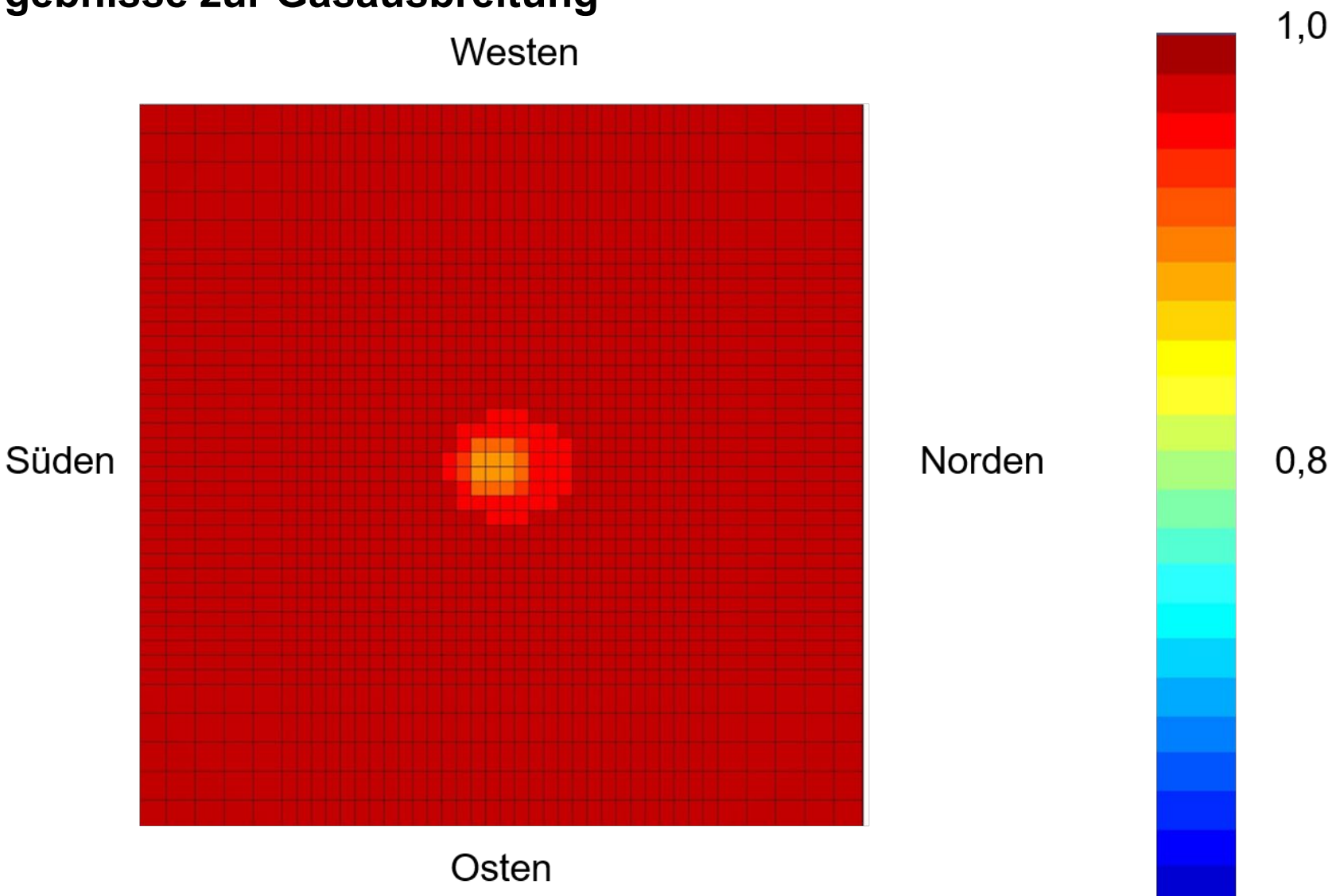
Gasverteilung (Sättigung SL) nach 800.000 Jahren

Referenzfall: Ergebnisse zur Gasausbreitung



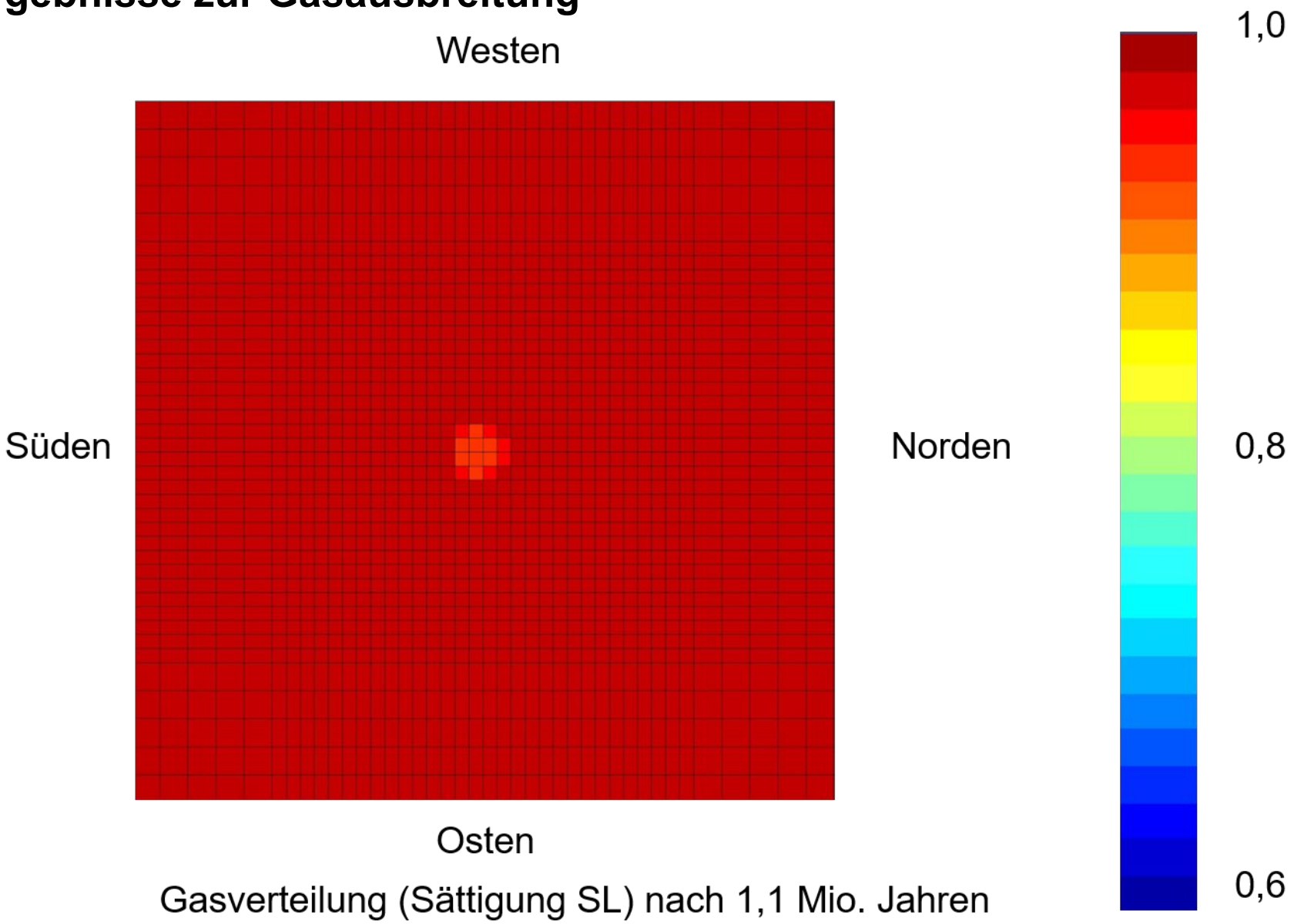
Gasverteilung (Sättigung SL) nach 900.000 Jahren

Referenzfall: Ergebnisse zur Gasausbreitung



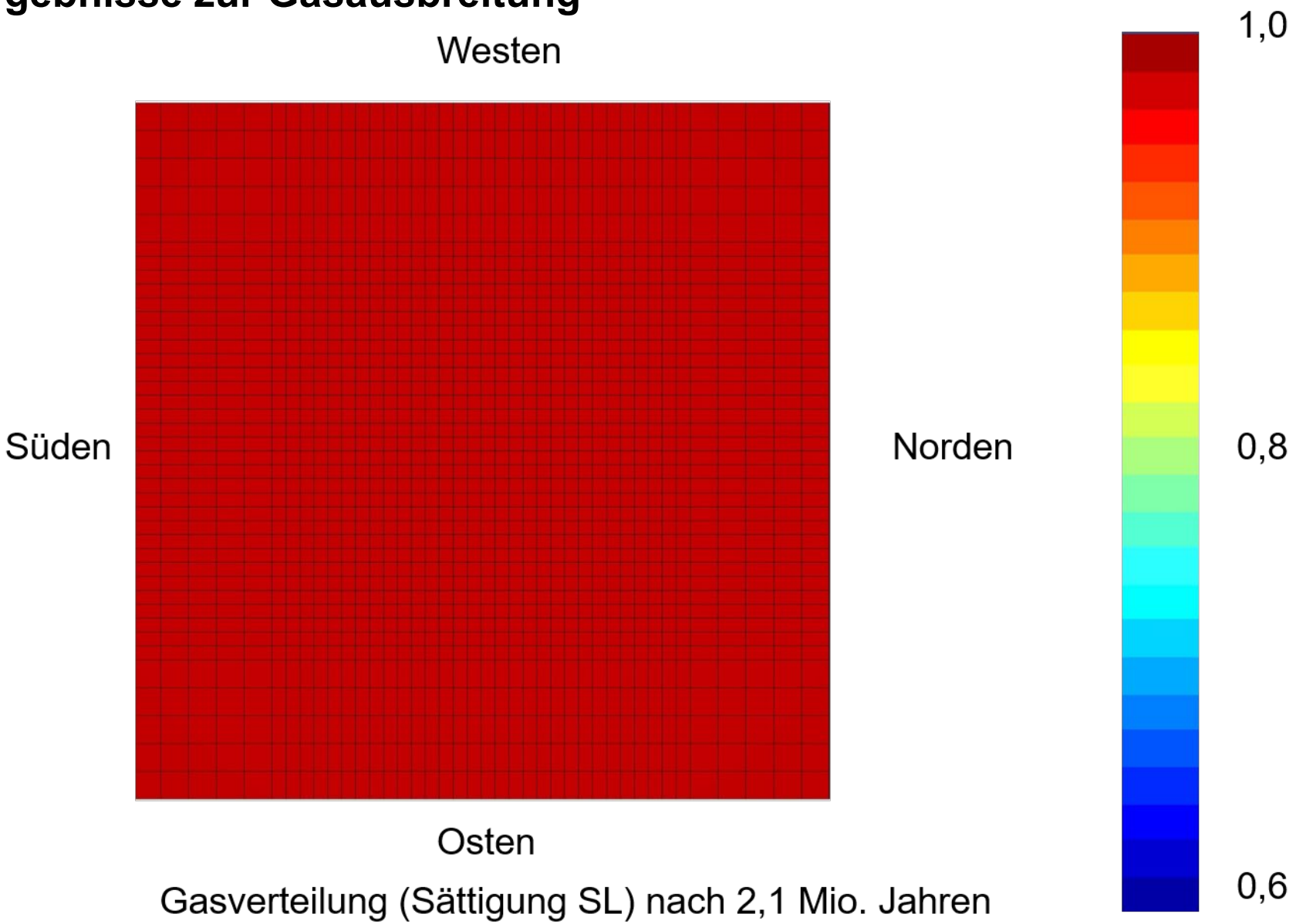
Gasverteilung (Sättigung SL) nach 1.000.000 Jahren

Referenzfall: Ergebnisse zur Gasausbreitung



Gasverteilung (Sättigung SL) nach 1,1 Mio. Jahren

Referenzfall: Ergebnisse zur Gasausbreitung



Gasverteilung (Sättigung SL) nach 2,1 Mio. Jahren

Gas vollständig aufgelöst

Referenzfall: Ergebnisse zur Gasausbreitung

- Gasaufstieg bis zur Unterkante der Unterkreide benötigt 8 000 Jahre
- Gasausbreitung zum Ende der Gasbildung bei 300 000 Jahren 2,6 km
- Maximaler Durchmesser der Gasausbreitung an der Unterkante der Unterkreide beträgt 2,8 km nach 500 000 Jahren
- Gas ist nach 2,1 Million Jahren bis auf residuale Gasmengen vollständig aufgelöst

Variationsrechnungen

- Gasproduktion
  - Gasproduktionsrate
  - Gasmenge

- Transportparameter
  - Porosität des Oxford und Kimmeridge
  - Permeabilität des Oxford und Kimmeridge
  - Anisotrope Permeabilität des Kimmeridge
  - Relative Permeabilität
  - Gaseindringdruck der Unterkreide
  - Formfaktor des Oxford und Kimmeridge

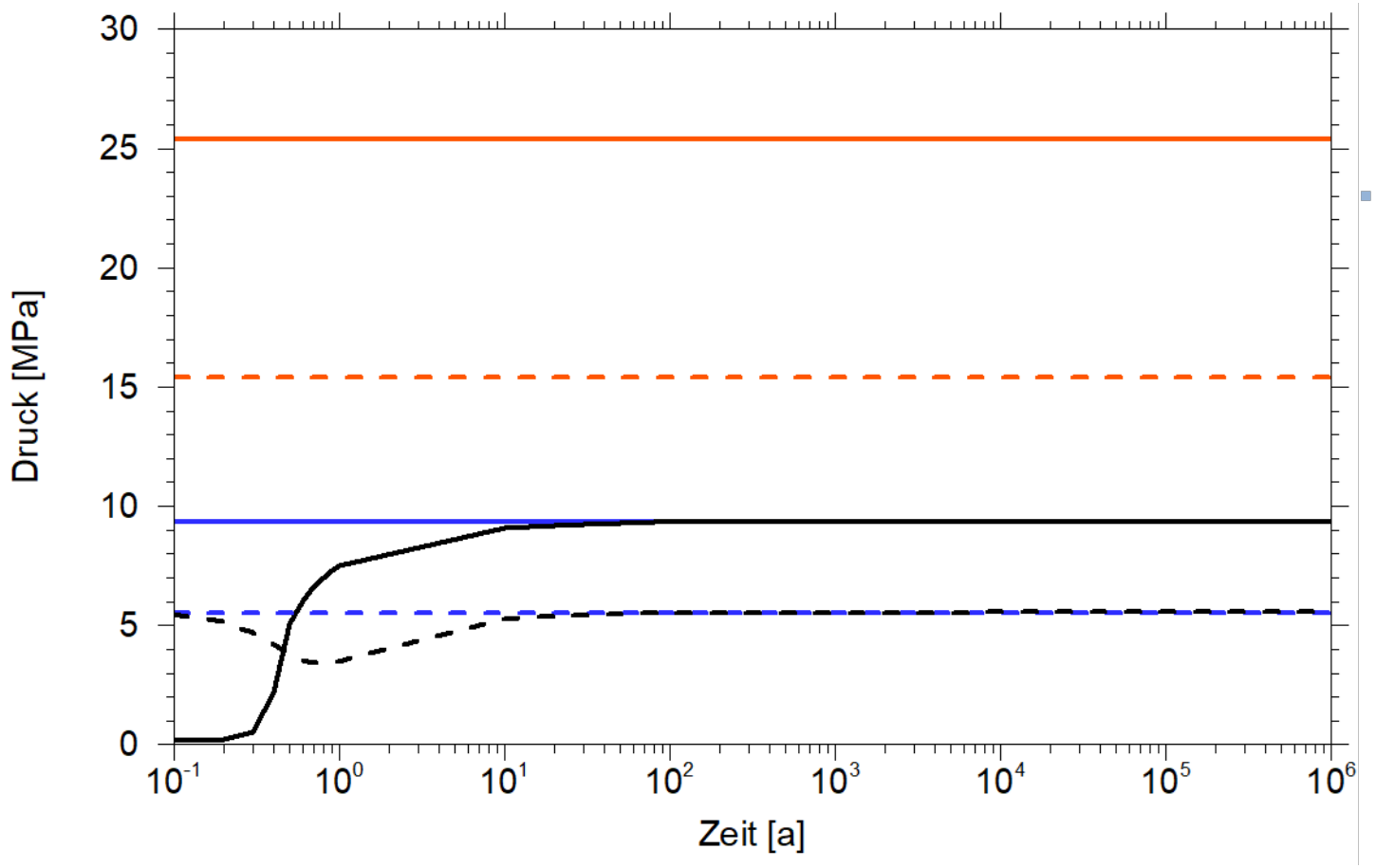
- Anzahl und Größe der Volumenelemente an der Grenze Kimmeridge / Unterkreide

Ergebnisse der Variationsrechnungen

- Gasproduktion mit höherer Rate
  - Die Gasphase erreicht die Unterkante der Unterkreide früher
    Aufstieg benötigt 400 Jahre
  - Maximale Ausbreitung wird früher erreicht und ist etwas größer
    Nach 90.000 Jahren hat sich die Gasphase 3,2 km radial ausgebreitet
  - Das Gas braucht ähnlich lang um wieder vollständig aufgelöst zu werden
    Nach 1,8 Mio. Jahren hat sich das Gas bis auf die residuale Gassättigung aufgelöst
  - Maximaler Fluiddruck höher als im Referenzfall, aber weit unterhalb des lithostatischen Drucks

- Variation des Gaseindringdrucks der Unterkreide
  - Verringerung um eine Größenordnung ($1{,}8 \cdot 10^6$ Pa)
  - Gasphase verbleibt unterhalb der Unterkreide

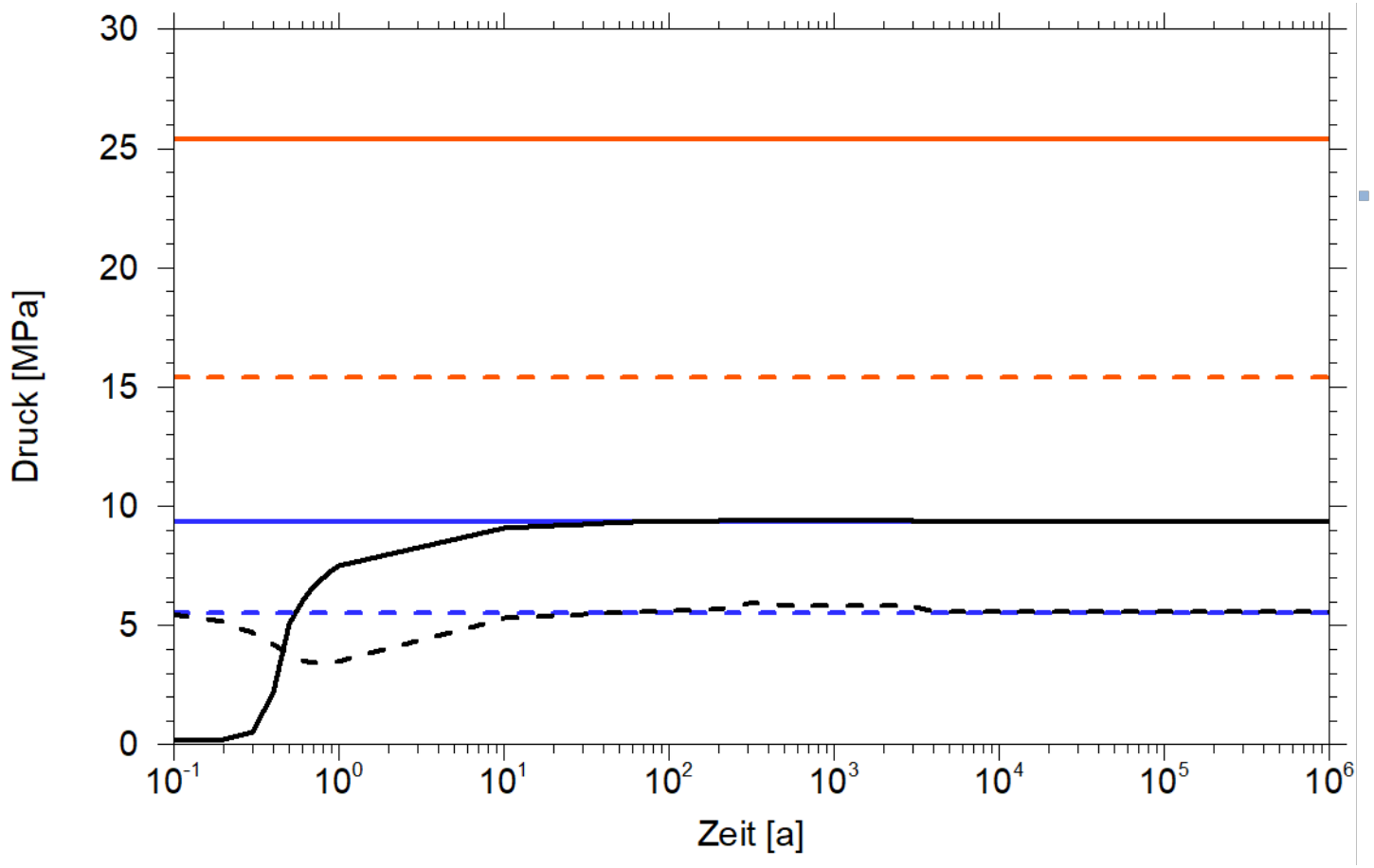
Ergebnisse für den Fluiddruck im Referenzfall



- Legende:
  - Durchgezogen: Teufe Einlagerungsbereich
  - Gestrichelt: Teufe Oberkante Kimmeridge
  - Schwarz: Rechenergebnis
  - Blau: Vergleichswert für den Fluiddruck
  - Orange: Vergleichswert für den lithostatischen Druck

- Fluiddruck ist geringer als der lithostatische Druck in der entsprechenden Teufe

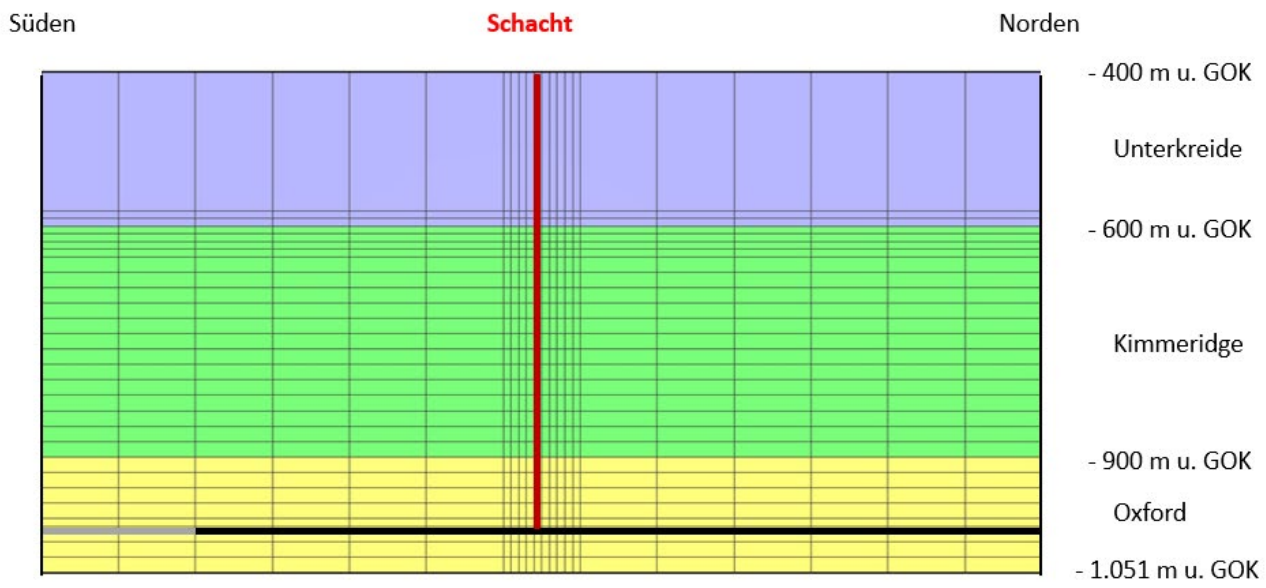
Ergebnisse für den Fluiddruck in der Variante



- Legende:
  - Durchgezogen: Teufe Einlagerungsbereich
  - Gestrichelt: Teufe Oberkante Kimmeridge
  - Schwarz: Rechenergebnis
  - Blau: Vergleichswert für den Fluiddruck
  - Orange: Vergleichswert für den lithostatischen Druck

- Fluiddruck ist auch in der Variante und dem Lastfall geringer als der lithostatische Druck in der entsprechenden Teufe
  - **Δ27: Die Bildung von Gasfracs ist für die angenommenen Randbedingungen ausgeschlossen**

Einfluss von Altbohrungen und des Schachts auf die Gasausbreitung



- Altbohrungen stellen keinen potenziellen vertikalen Ausbreitungspfad für relevante Gasmengen dar
- Dauer, bis die Gase die Unterkreide erreichen, führt zur Wiederherstellung der günstigen Eigenschaften des Tongesteins im Bereich der abgedichteten Bohrungen
- Bei der Ausführungsplanung zur Verfüllung der Schächte vor dem Abschluss des Endlagerbetriebes (Nebenbestimmung A.7-1 im PFB) sind Schachtverschlusselemente in Unter-/Oberkreide zu berücksichtigen, bei denen der Gaseindringdruck und die Permeabilität des Materials nicht mehr als zwei Größenordnungen über jenen der Unterkreide liegen

Fazit

Δ24: Radionuklidtransport in der Gasphase (Szenarien)

- Die Prozesse und Szenarien wurden beschrieben

Δ25: Freisetzung von radioaktiven Gasen im und aus dem Grubengebäude in die Geosphäre

Δ26: Radionuklidtransport in der Gasphase in der Geosphäre

- Es ist zu erwarten, dass in der Nachbetriebsphase Gas aus dem Grubengebäude in die Geosphäre entweicht
- Die Gase und gasförmige Radionuklide verbleiben unterhalb der Unterkreide
- Radioaktive Gase können nicht bis in die Biosphäre transportiert werden
- Eine Strahlenexposition in der Biosphäre ist somit nicht zu betrachten

Δ27: Untersuchung der Relevanz von Gas-Fracs für einen möglichen Radionuklidtransport in der Gasphase

- Es wurde festgestellt, dass der Druck zu niedrig ist und keine gasdruckinduzierten Klüfte entstehen können

- Alle Deltas wurden bearbeitet und sind nicht sicherheitsrelevant