

T. Andreeva, E. Harmeyer

Das magnetische Streufeld in der Maschinenhalle von Wendelstein 7-X

IPP 13/2
November 2003

Max-Planck-Institut für Plasmaphysik

Das magnetische Streufeld in der Maschinenhalle von Wendelstein 7-X

T. Andreeva, E. Harmeyer

Max-Planck-Institut für Plasmaphysik, EURATOM Association
D-17491 Greifswald, Germany

ABSTRACT

This report contains the description and representation of the magnetic stray field in the Wendelstein 7-X hall for the defined operational cases. The maxima of the field values are presented in combined magnetic field maps.

Dieser Bericht enthält die Beschreibung und Darstellung des magnetischen Streufelds in der Maschinenhalle von Wendelstein 7-X für die definierten Betriebsfälle. Die Maxima der Feldwerte sind in Magnetfeldkarten zusammengefaßt.

“Dieser IPP-Bericht ist als Manuskript des Autors gedruckt. Die Arbeit entstand im Rahmen der Zusammenarbeit zwischen dem IPP und EURATOM auf dem Gebiet der Plasmaphysik. Alle Rechte vorbehalten.”

“This IPP-Report has been printed as author’s manuscript elaborated under the collaboration between the IPP and EURATOM on the field of plasma physics. All rights reserved.”

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Berechnungsmethode	2
2.1	EFFI-Code	2
3	Experimentbetrieb	4
3.1	Das W7-X-Spulensystem	4
3.2	Definition der Betriebsfälle	5
4	Ergebnisse der Streufeldberechnungen	6
4.1	Definition der Rechenbereiches	6
4.2	Darstellung einzelner Berechnungsergebnisse	7
4.2.1	Streufeld in der Torusmittelebene bei $z = 0.00$ m	7
4.2.2	Streufeld in der Bohnenebene bei $\varphi = 0^0$	7
4.2.3	Streufeld des Standard-Falles in ausgewählten Ebenen	16
4.3	Darstellung in Magnetfeldkarten	20
4.3.1	Magnetfeldkarten: Bmax-Feld als Funktion des Ortes	20
4.3.2	Magnetfeldkarten: Betriebsfall als Funktion des Bmax-Feldes	20
5	Zusammenfassung	33

Kapitel 1

Einleitung

Das Streufeld des Spulensystems von Wendelstein 7-X wirkt in der Umgebung der Maschine und beeinflußt die dort installierten elektrischen und elektronischen Geräte. Aus diesem Grunde sind Kenntnisse über die Verteilung des statischen Magnetfeldes in der Maschinenumgebung notwendig. Man erhält damit die Möglichkeit, eine Standortwahl der Geräte in Bezug auf Magnetfeldverträglichkeit treffen zu können.

Typische Grenzwerte einiger elektrischer und magnetischer Komponenten sind¹:

- $B_{\max} = 0.5 \text{ mT}$: Herzschrittmacher, Oszilloskope
- $B_{\max} = 1 \text{ mT}$: Computer, Kreditkarten, Uhren
- $B_{\max} = 5 \text{ mT}$: Netzteile, Monitore
- $B_{\max} = 50 \text{ mT}$: Magnetische Werkzeuge, Turbopumpen

In dieser Arbeit werden die magnetischen Feldverteilungen in der Maschinenhalle von Wendelstein 7-X für bestimmte Betriebsfälle berechnet. Mit den Daten werden Magnetfeldkarten erstellt, die aus den Ergebnissen der einzelnen Betriebsfälle für jeden berechneten Raumpunkt das Maximum der Feldwerte graphisch darstellen. Außerdem wird registriert, welcher Betriebsfall das Maximum in dem betreffenden Raumpunkt liefert, um einen Überblick über die Betriebsfälle mit den größten Streufeldern zu gewinnen.

Die Konfiguration des magnetischen Feldes des Experiments Wendelstein 7-X ist vom Helias-Typ (Helical Advanced Stellarators)². Helias-Konfigurationen wurden in langjährigen Optimierungsberechnungen entwickelt und zeichnen sich durch einen guten Plasmaeinschluß aus³. Das Spulensystem von Wendelstein 7-X besteht aus 50 nichtplanaren Spulen und 20 planaren Spulen, die in 5 toroidalen Feldperioden angeordnet sind. Die Hauptdaten der Konfiguration sind gegeben mit dem großen Radius von 5.5 m, dem mittleren Spulenradius von 1.3 m, dem Magnetfeld auf der Achse von 3 T, und dem maximalen Magnetfeld an den Spulenwicklungen von knapp über 6.7 T. Die Magnetfeldenergie im Standardfall beträgt etwa 600 MJ und ist zu mehr als 90% im Torusbereich gespeichert, d.h. die zugrunde liegende Helias-Konfiguration zeichnet sich durch relativ niedrige Streufeldwerte aus.

¹Siehe Internet: <http://www.cryomagnetics.com/stray-field.htm>

²Nührenberg, J., Zille, R., Physical Letters 114A, (1986), 129-134.

³Grieger, G., Fusion Technology 21, (1992), 1767-1778.

Kapitel 2

Berechnungsmethode

2.1 EFFI-Code

Gemäß dem Durchflutungsgesetz nach Biot-Savart lauten die Gleichungen der magnetischen Flußdichte \vec{B} und des Vektorpotentials \vec{A} für ein beliebiges stromtragendes Volumen:

$$\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \int \int \int_V \frac{\vec{j} \times \vec{r}}{|\vec{r}|^3} dV,$$
$$\vec{A} = \frac{\mu_0}{4\pi} \int \int \int_V \frac{\vec{j}}{|\vec{r}|} dV.$$

Dabei ist \vec{j} der Vektor der räumlich verteilten Stromdichte, und $|\vec{r}|$ gibt die Distanz zwischen dem Quellpunkt und dem Aufpunkt an.

Die Integrale dieser beiden Gleichungen können für beliebige Leiterformen nicht in geschlossener Form gelöst werden. Es existieren jedoch für gerade Balkenstücke mit rechteckigem Querschnitt analytische Lösungen. Im EFFI-Code⁴ werden diese analytischen Ausdrücke benutzt, um das magnetische Feld, das Vektorpotential, die magnetischen Kräfte und die Induktivitätswerte in Spulensystemen zu berechnen. Dabei werden die stromtragenden Spulen aus geraden Balkenstücken mit rechteckigem Querschnitt, den sogenannten GCEs (General Current Elements), zusammengesetzt. Das magnetische Feld und das Vektorpotential eines solchen Elements ist am Aufpunkt p , wenn man ein lokales kartesisches Koordinatensystem x_1, x_2, x_3 benutzt und eine gleichförmige Stromdichte in x_3 -Richtung voraussetzt, durch die Gleichungen

$$B_{x_i}(p) = (-1)^i \frac{\mu_0}{4\pi} |\vec{j}| \sum_{j=1}^8 \text{sgn}(x_1(j) x_2(j) x_3(j))$$
$$\times \left\{ x_{3j} \ln(R_j + x_{ij}) + x_{ij} \ln(R_j + x_{3j}) \right.$$
$$\left. - x_{3-i,j} \arctan\left(\frac{x_{ij} R_j + x_{1j}^2 + x_{2j}^2}{x_{3-i,j} x_{3j}}\right) \right\}$$
$$B_{x_3} = 0 \qquad i = 1, 2,$$

⁴Sackett, S.J., LLNL Report UCRL-52402, 1978.

und

$$\begin{aligned}
A_{x_1} &= A_{x_2} = 0 \\
A_{x_3}(p) &= -\frac{\mu_0}{4\pi} |\vec{j}| \left\{ \sum_{j=1}^8 \operatorname{sgn}(x_1(j) x_2(j) x_3(j)) \right. \\
&\quad \times \{ x_{2j} x_{3j} \ln(R_j + x_{1j}) \\
&\quad + x_{1j} x_{3j} \ln(R_j + x_{2j}) \\
&\quad + x_{1j} x_{2j} \ln(R_j + x_{3j}) \\
&\quad - \frac{x_{1j}^2}{2} \arctan\left(\frac{x_{2j} R_j + x_{1j}^2 + x_{2j}^2}{x_{1j} x_{3j}}\right) \\
&\quad - \frac{x_{2j}^2}{2} \arctan\left(\frac{x_{3j} R_j + x_{2j}^2 + x_{3j}^2}{x_{1j} x_{2j}}\right) \\
&\quad \left. - \frac{x_{3j}^2}{2} \arctan\left(\frac{x_{2j} R_j + x_{2j}^2 + x_{3j}^2}{x_{1j} x_{3j}}\right) \right\}
\end{aligned}$$

beschrieben.

Dabei gilt $R_j = \sqrt{x_{1j}^2 + x_{2j}^2 + x_{3j}^2}$, und $x_{ij} = x_i(p) - x_i(j)$ sind die Koordinaten des Aufpunkts p in Relation zu den Eckpunkten der Elemente. Bei der Feldberechnung werden die Beiträge der einzelnen GCEs in das globale Koordinatensystem transformiert und aufsummiert.

Im EFFI-Report werden für Bogenelemente mit rechteckigem Querschnitt ebenfalls analytische Lösungsausdrücke genannt. Der Vorteil der Benutzung analytischer Ausdrücke liegt darin, daß ihre Auswertung sehr viel weniger Rechenzeit benötigt, als eine etwaige numerische Auswertung der Volumenintegrale des Biot-Savartschen Gesetzes.

Außer dem magnetischen Feld und dem Vektorpotential können mit dem EFFI-Code die magnetischen Kräfte auf stromdurchflossene Elemente und die Induktivitäten von Leiter-schleifen berechnet werden. Für diese Zwecke werden numerische Integrationsmethoden angewendet.

Die Genauigkeit der Berechnung hängt von der numerischen Prozedur und vor allem von der Art der geometrischen Beschreibung der Spulen durch die GCEs ab. Nach unserer Erfahrung entstehen die größten Ungenauigkeiten bei der Unterteilung der im allgemeinen nichtebenen Spulen in gerade Balkenstücke. An den Stellen, an denen diese Elemente zusammentoßen, gibt es kleine Überlappungen bzw. Lücken. Zieht man bei der Feinunterteilung der jeweiligen Spule die lokale Spulenkrümmung in angemessener Weise in Betracht, kann man die Genauigkeit der Berechnung beträchtlich verbessern. Die Genauigkeit der Berechnung liegt im allgemeinen in der Größenordnung von 1%. In großer Entfernung von den Spulen, d.h. bei kleinen Feldwerten, nimmt der relative Fehler in der Berechnung leicht zu.

Kapitel 3

Experimentbetrieb

3.1 Das W7-X-Spulensystem

Das Spulensystem des Experiments Wendelstein 7-X besteht aus 50 nichtplanaren Spulen und 20 planaren Spulen, angeordnet in 5 toroidalen Feldperioden. Gleichartige Spulen sind in Reihe geschaltet; folglich gibt es 7 Spulengruppen, die mit unterschiedlichen Strömen gespeist werden können. Damit ist gewährleistet, daß ein weiterer experimenteller Bereich abgedeckt werden kann. In Abbildung 3.1 sind die Wickelpakete des Spulensystems dargestellt. Die verschiedenen Spulengruppen sind mittels Farbschattierung gekennzeichnet.

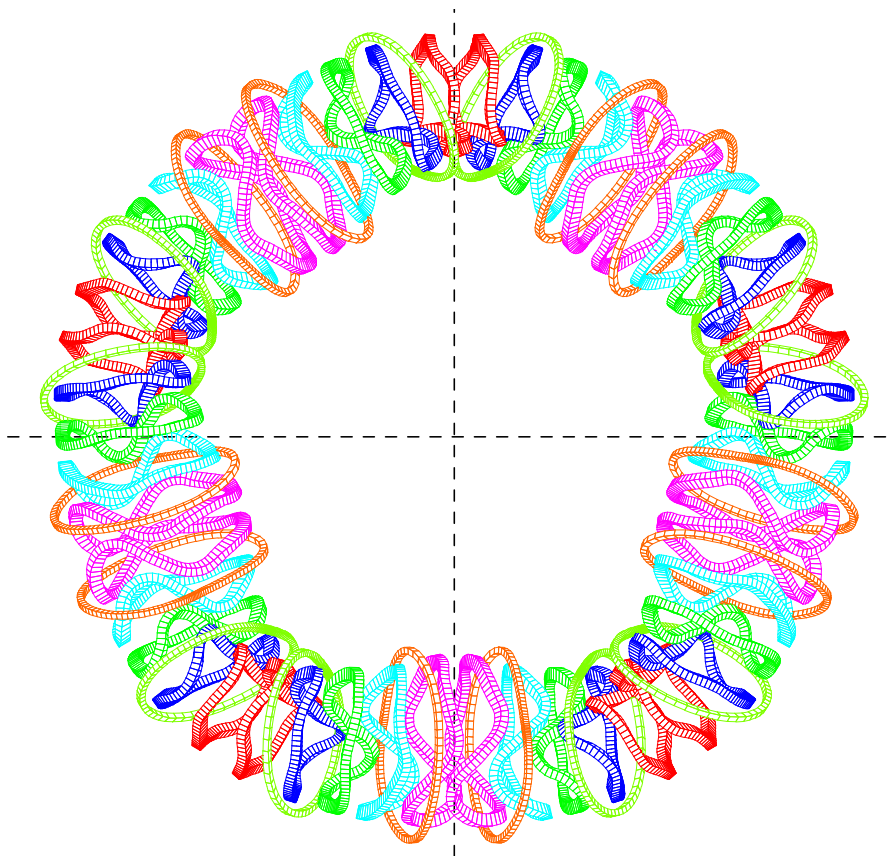


Abbildung 3.1: *Das Spulensystem des Experiments Wendelstein 7-X.*

3.2 Definition der Betriebsfälle

Gemäß W7-X-Proposal⁵ wurden für das Experiment 8 Betriebsfälle definiert. Diese sind später noch etwas modifiziert worden, vor allem um das Maximalfeld am Leiter in vertretbaren Grenzen zu halten. In Tabelle I sind die derzeit gültigen Werte, die den Berechnungen zugrunde liegen, aufgelistet.

In Tabelle I bezeichnet I_n [MA] den Referenzwert des Spulengesamtstromes (Ampèrewindungszahl) für das gemittelte magnetische Feld $\langle B_0 \rangle = 3$ T auf der magnetischen Achse. Der Faktor F_c gibt für jeden Spulentyp den Wert an, mit dem der Referenzwert multipliziert werden muß, um den Gesamtstrom I_c der jeweiligen Spule zu erhalten, d.h. es gilt: $I_c = I_n F_c$.

Tabelle I:

Betriebsfall		I_n [MA]	$\langle B_0 \rangle$ [T]	F_c					A	B
				1	2	3	4	5		
st	Standard	1.74	3.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.00	0.00
ls	Low shear	1.74	3.0	1.13	1.11	1.05	0.85	0.84	-0.24	0.25
hi	High iota	1.92	3.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	-0.22	-0.22
li	Low iota	1.58	3.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.24	0.24
hm	High mirror	1.73	3.0	1.08	1.05	1.00	0.95	0.92	0.00	0.00
lm	Low mirror	1.79	3.0	0.92	0.96	0.99	1.04	1.07	-0.05	-0.05
is	Inward shifted	1.76	3.0	0.96	0.95	0.97	1.07	1.08	0.10	-0.20
os	Outward shifted	1.75	3.0	1.04	1.04	1.01	0.96	0.96	-0.14	0.14

Wie die Tabelle zeigt, treten bei den nichtplanaren Spulen in den Betriebsfällen “High-iota” und “Low-shear” die höchsten Spulenströme auf. Im “Low-shear”-Fall produziert Spule 1 zusammen mit den gegensinnig vom Strom durchflossenen Zusatzspulen A und B eine relativ große Bz-Feldkomponente. Die Betriebsfälle “Low-shear” und “High-iota” sind deshalb als die kritischen anzusehen, sowohl hinsichtlich des magnetischen Streufeldes, als auch anderer Größen, z.B. der magnetischen Kraftwirkungen.

⁵Wendelstein 7-X, Phase II, Application for Preferential Support, June 1994.

Kapitel 4

Ergebnisse der Streufeldberechnungen

4.1 Definition der Rechenbereiche

Als Rechenbereich wird die gesamte Maschinenhalle des W7-X definiert. Belegt man das Toruszentrum mit dem Koordinatenursprung (0,0,0), so erstreckt sich die Maschinenhalle in West-Ost-Richtung von $x = -17.00$ m bis $x = +15.40$ m (Gesamtausdehnung 32.40 m) und in Süd-Nord-Richtung von $y = -17.20$ m bis $y = +13.20$ m (Gesamtausdehnung 30.40 m). Die Abbildung 4.1 zeigt die Draufsicht der Halle mit der exzentrischen Anordnung des W7-X-Torus. Außerdem ist ersichtlich, daß die Maschinenkoordinaten gegenüber den Hallenkoordinaten um 36° gedreht sind.

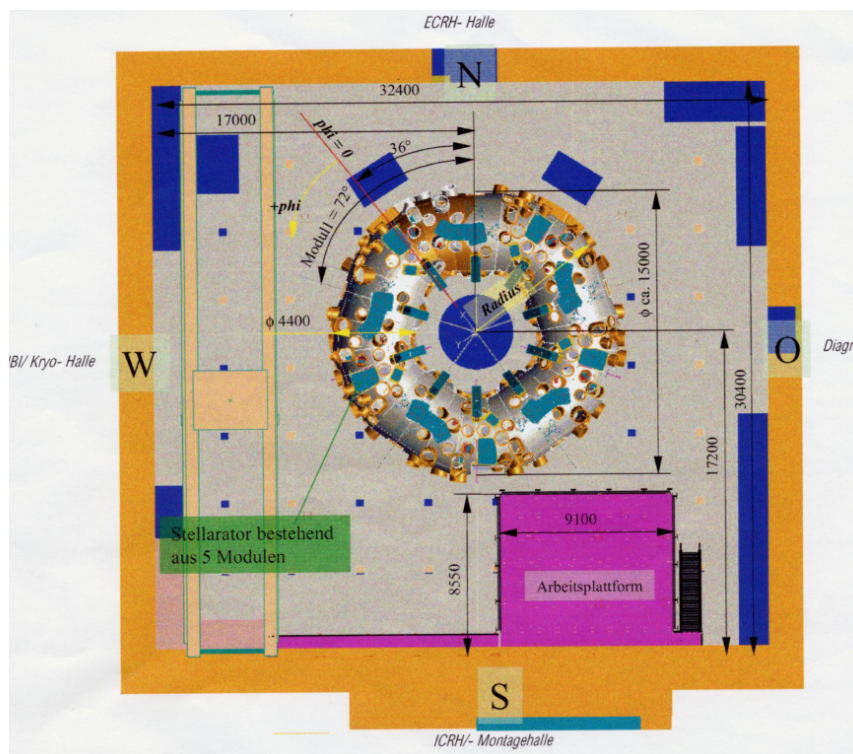


Abbildung 4.1: Die Maschinenhalle von Wendelstein 7-X.

Im Bereich der Maschinenhalle wird das magnetische Feld für verschiedene Ebenen berechnet, und zwar für die Torusmittelebene bei $z = 0.00$ m, für die Ebene bei $z = 1.50$ m (3 m über Oberkante EG), für die Ebene bei $z = -4.25$ m (1.5 m über Oberkante 1.UG), und für die Ebene bei $z = -8.10$ m (1.5 m über Oberkante 2.UG). Außerdem erfolgt die magnetische Feldberechnung für 2 Radialschnitte und zwar für die Bohnenebene bei $\varphi = 0^0$ und für die Dreiecksebene bei $\varphi = 36^0$. Bei der diskreten Feldberechnung beträgt das lineare Inkrement 0.20 m.

4.2 Darstellung einzelner Berechnungsergebnisse

Die Ergebnisse der Berechnungen des Betrags des magnetischen Feldes werden als Höhenlinien-Plots mit logarithmischer Skala dargestellt, da der Wertebereich mehr als 4 Größenordnungen umfaßt. Auf diese Weise wird der Bereich geringer Feldstärke gespreizt. Die Darstellung erfolgt zunächst für die einzelnen Betriebsfälle.

4.2.1 Streufeld in der Torusmittelebene bei $z = 0.00$ m

- Standard-Fall: Abbildung 4.2
- Low-shear-Fall: Abbildung 4.3
- High-iota-Fall: Abbildung 4.4
- Low-iota-Fall: Abbildung 4.5
- High-mirror-Fall: Abbildung 4.6
- Low-mirror-Fall: Abbildung 4.7
- Inward-shift-Fall: Abbildung 4.8
- Outward-shift-Fall: Abbildung 4.9

4.2.2 Streufeld in der Bohnenebene bei $\varphi = 0^0$

- Standard-Fall: Abbildung 4.10
- Low-shear-Fall: Abbildung 4.11
- High-iota-Fall: Abbildung 4.12
- Low-iota-Fall: Abbildung 4.13
- High-mirror-Fall: Abbildung 4.14
- Low-mirror-Fall: Abbildung 4.15
- Inward-shift-Fall: Abbildung 4.16
- Outward-shift-Fall: Abbildung 4.17

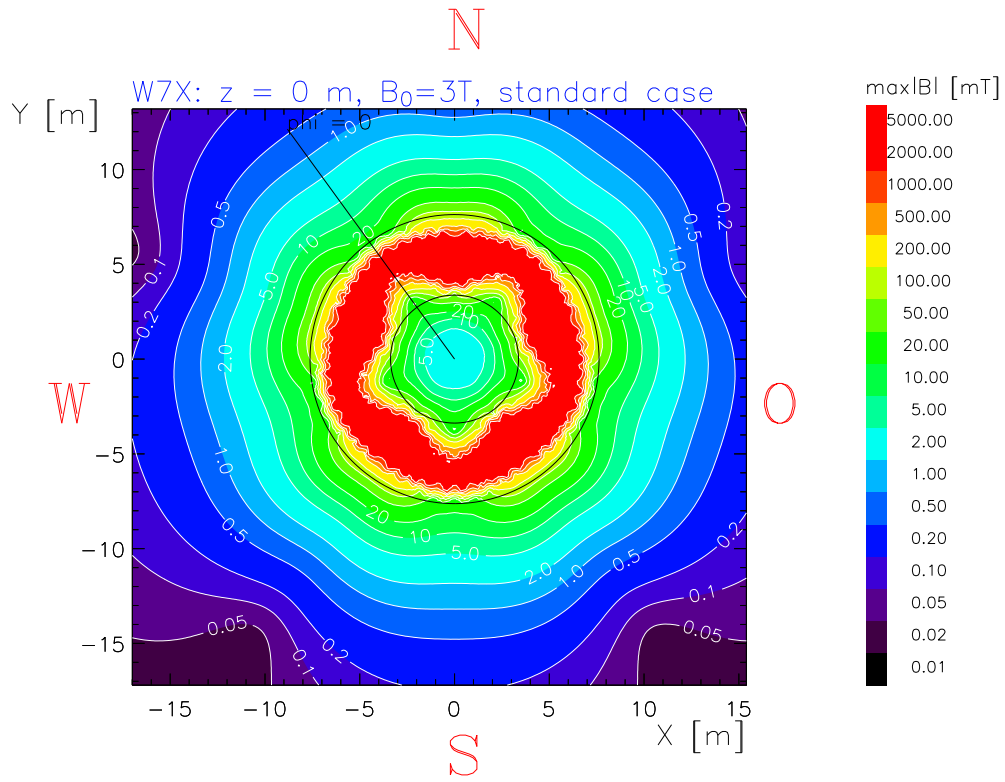


Abbildung 4.2: B -Feld in Ebene $z = 0.00$ m, Standard-Fall.

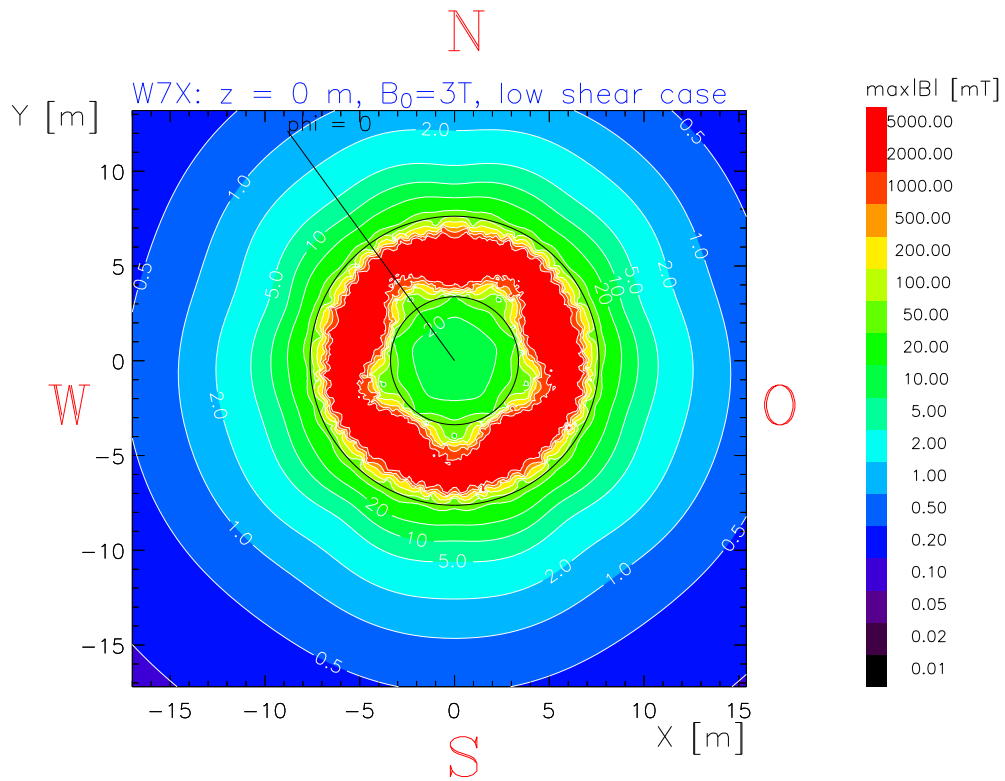


Abbildung 4.3: B -Feld in Ebene $z = 0.00$ m, Low-shear-Fall.

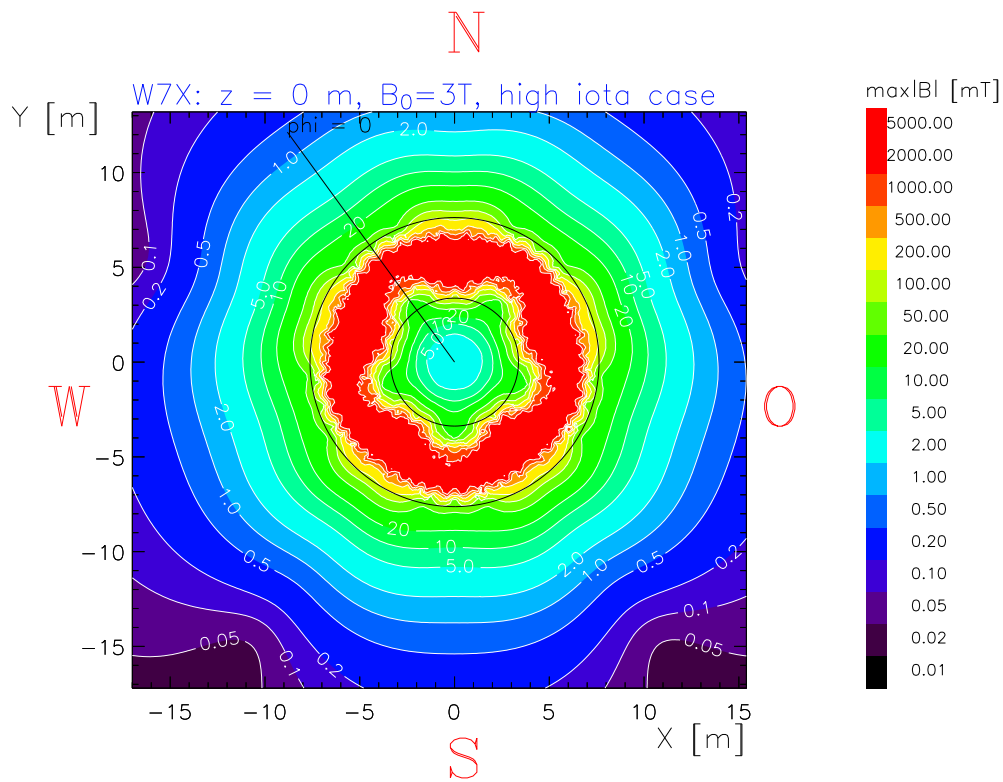


Abbildung 4.4: B -Feld in Ebene $z = 0.00$ m, *High-iota-Fall*.

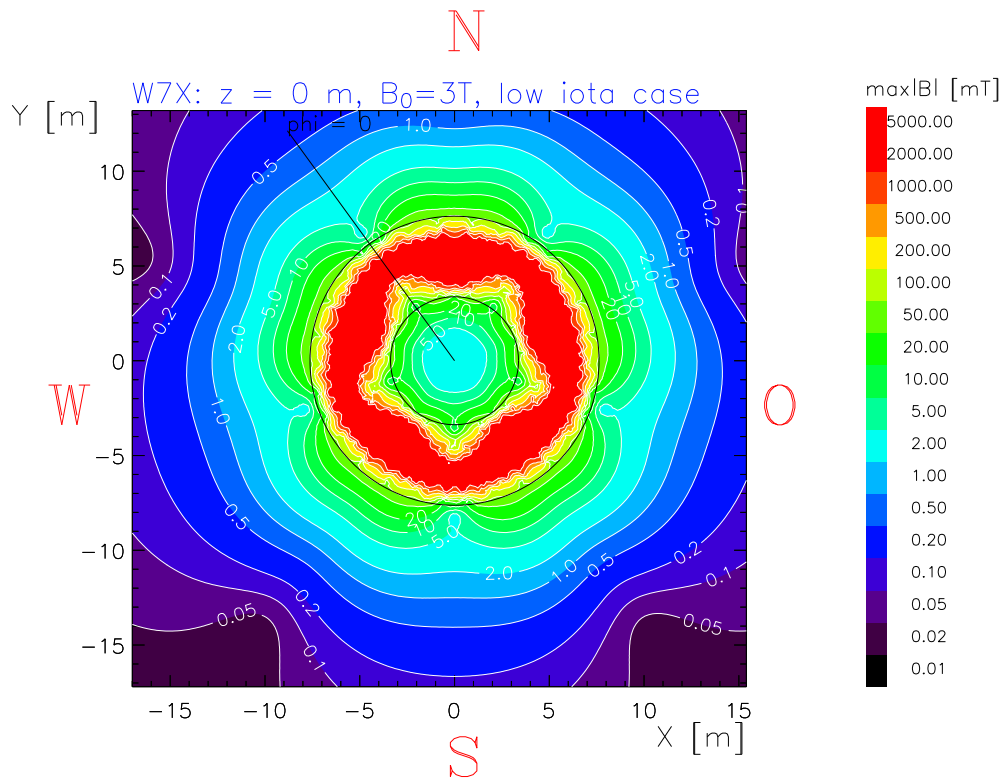


Abbildung 4.5: B -Feld in Ebene $z = 0.00$ m, *Low-iota-Fall*.

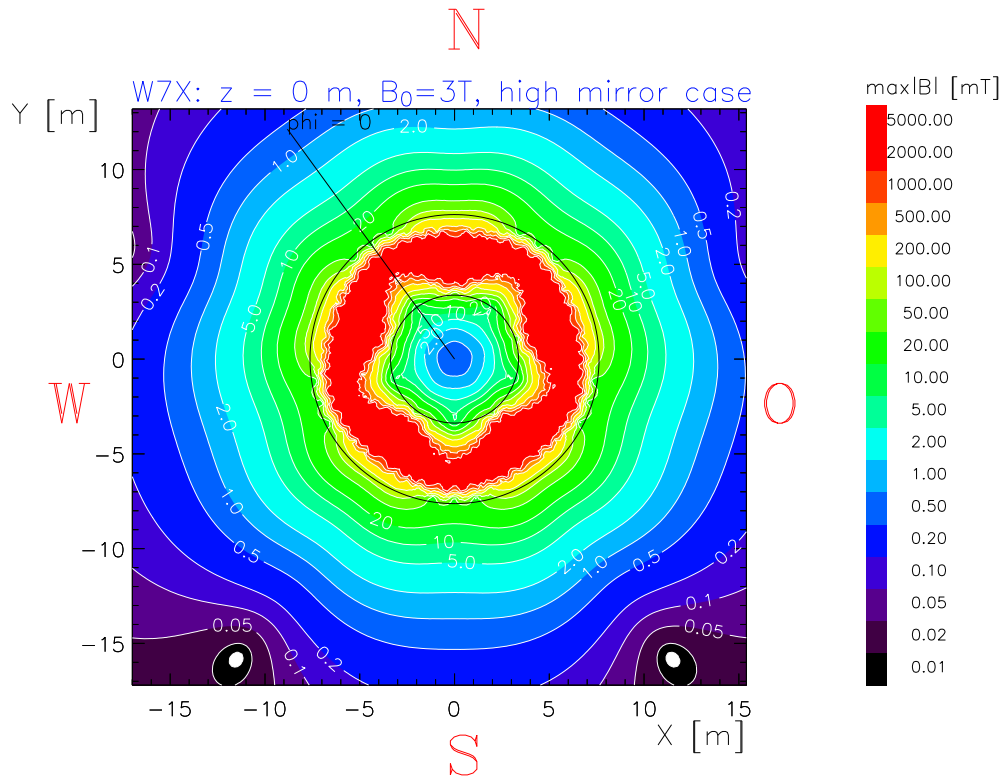


Abbildung 4.6: *B-Feld in Ebene $z = 0.00$ m, High-mirror-Fall.*

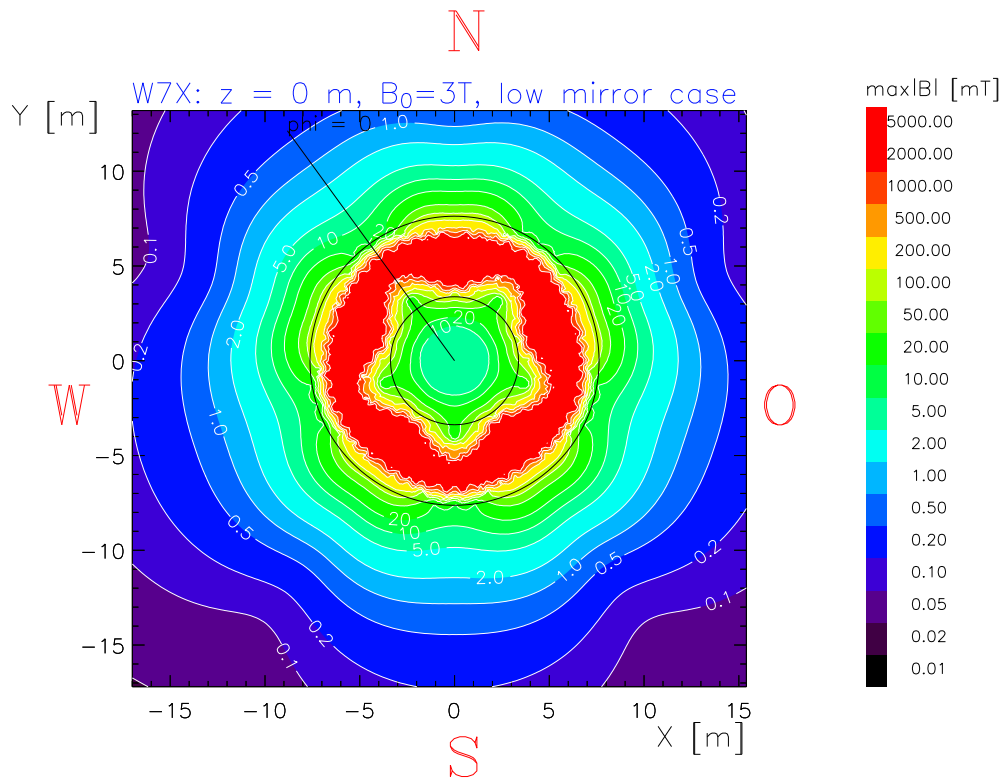


Abbildung 4.7: *B-Feld in Ebene $z = 0.00$ m, Low-mirror-Fall.*

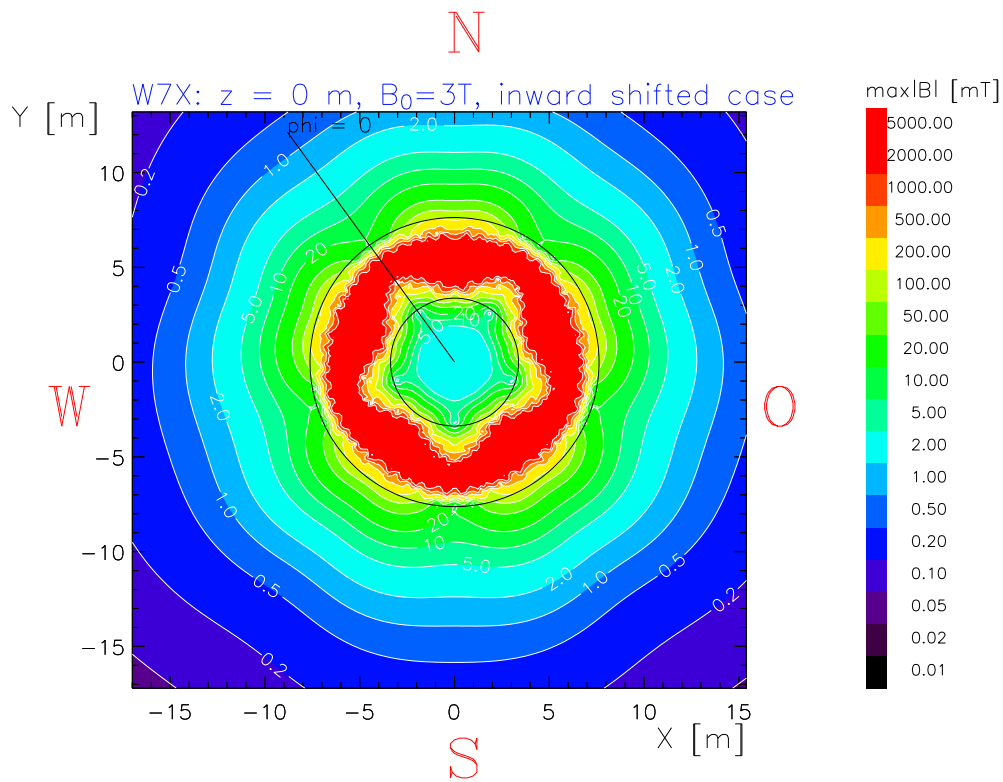


Abbildung 4.8: *B-Feld in Ebene $z = 0.00$ m, Inward-shift-Fall.*

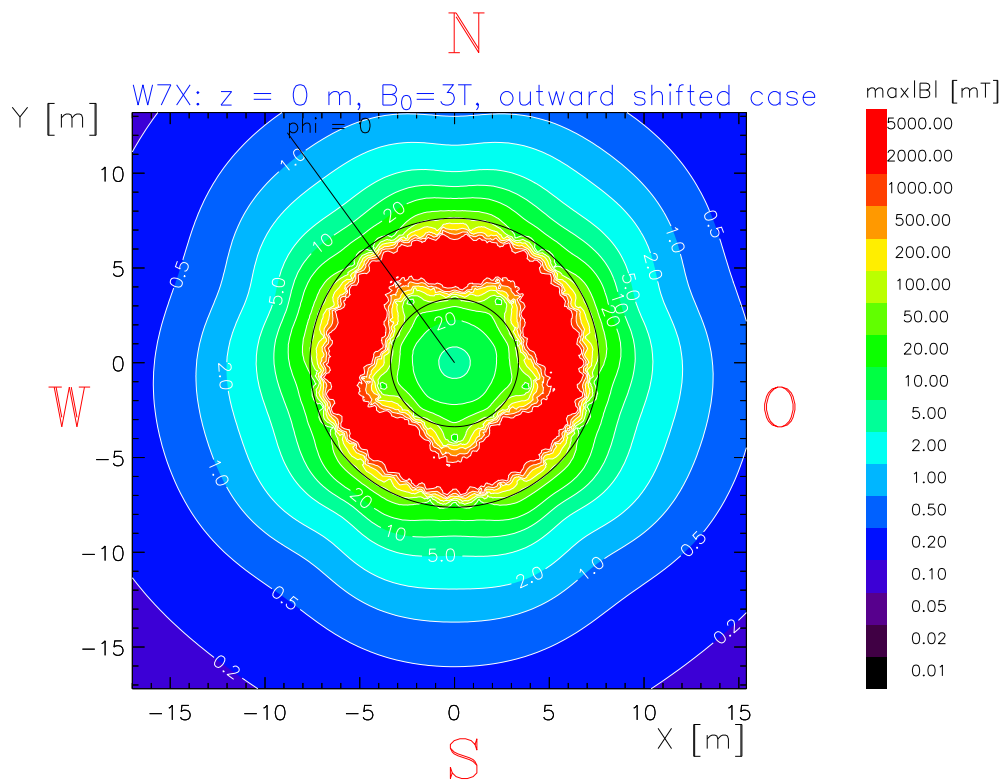


Abbildung 4.9: *B-Feld in Ebene $z = 0.00$ m, Outward-shift-Fall.*

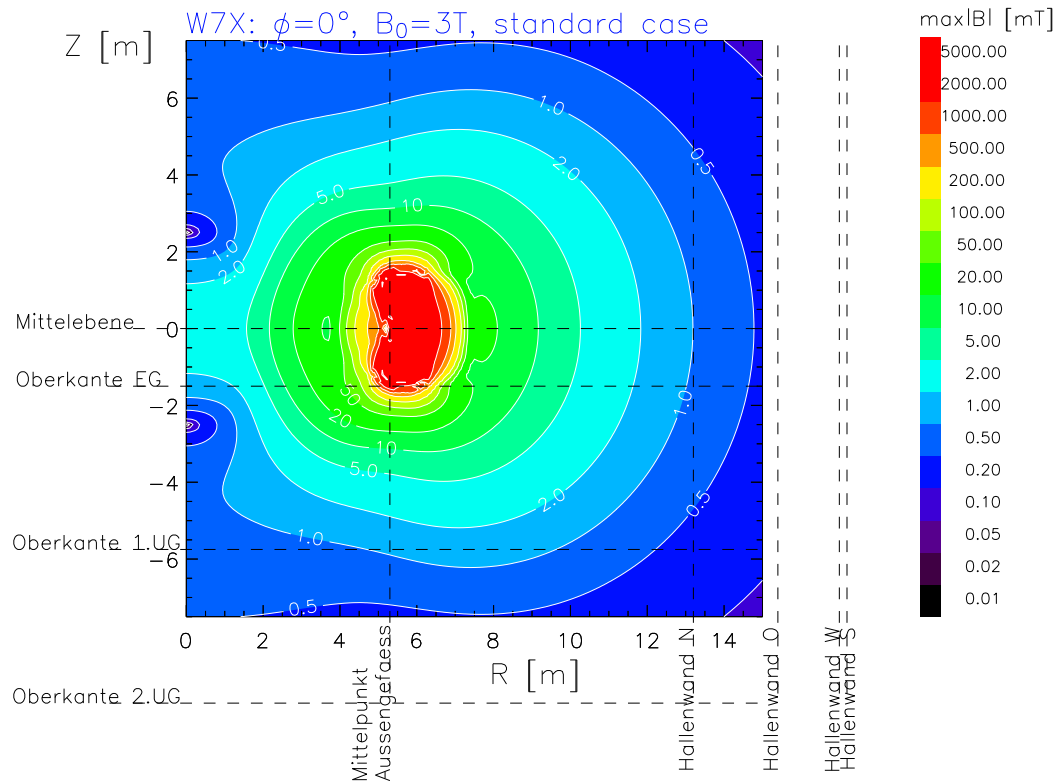


Abbildung 4.10: B -Feld in der Bohnenebene $\varphi = 0^0$, Standard-Fall.

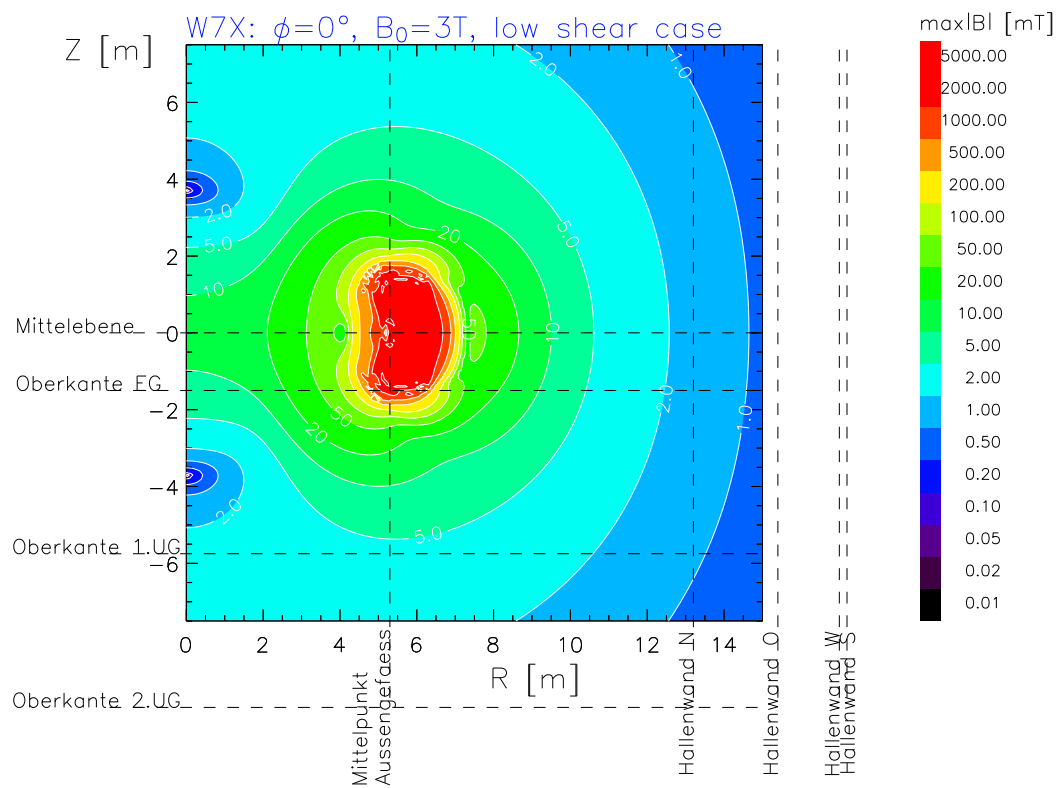


Abbildung 4.11: B -Feld in der Bohnenebene $\varphi = 0^0$, Low-shear-Fall.

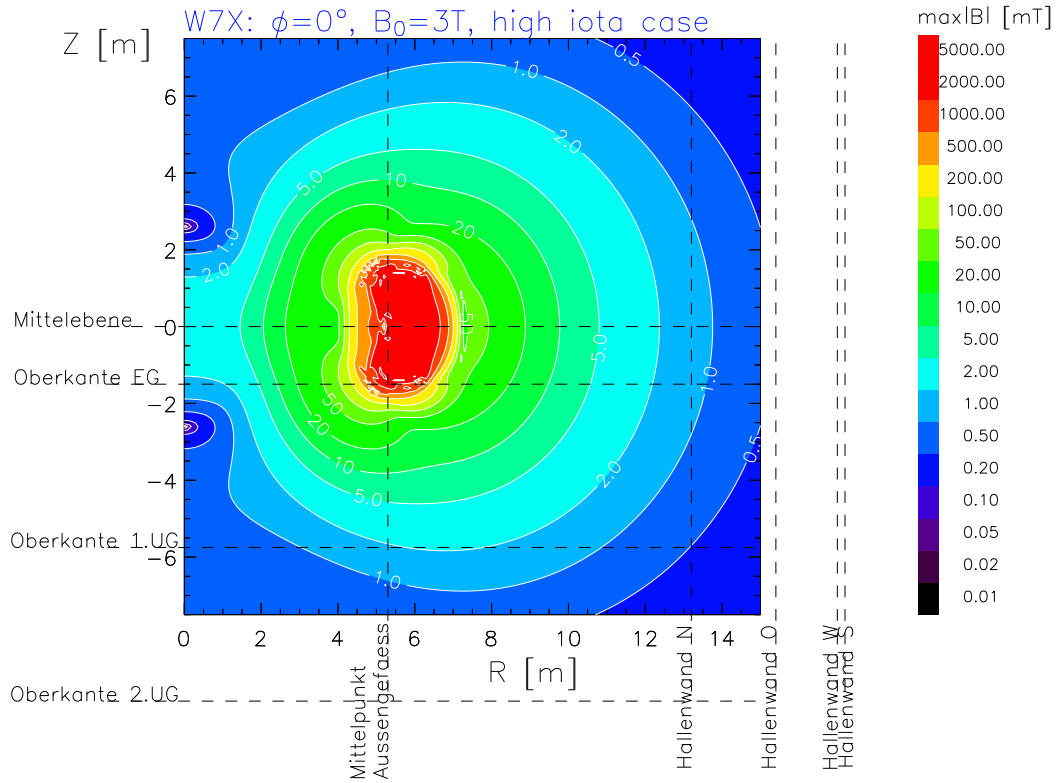


Abbildung 4.12: B -Feld in der Bohnenebene $\phi = 0^\circ$, High-iota-Fall.

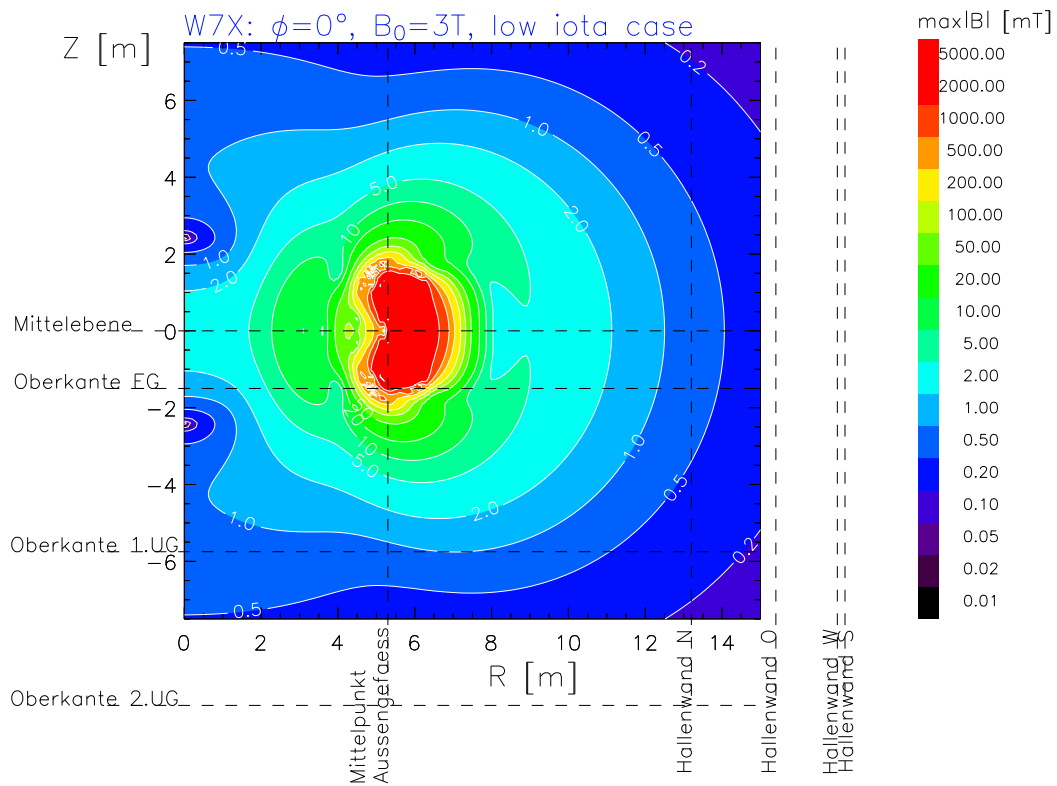


Abbildung 4.13: B -Feld in der Bohnenebene $\phi = 0^\circ$, Low-iota-Fall.

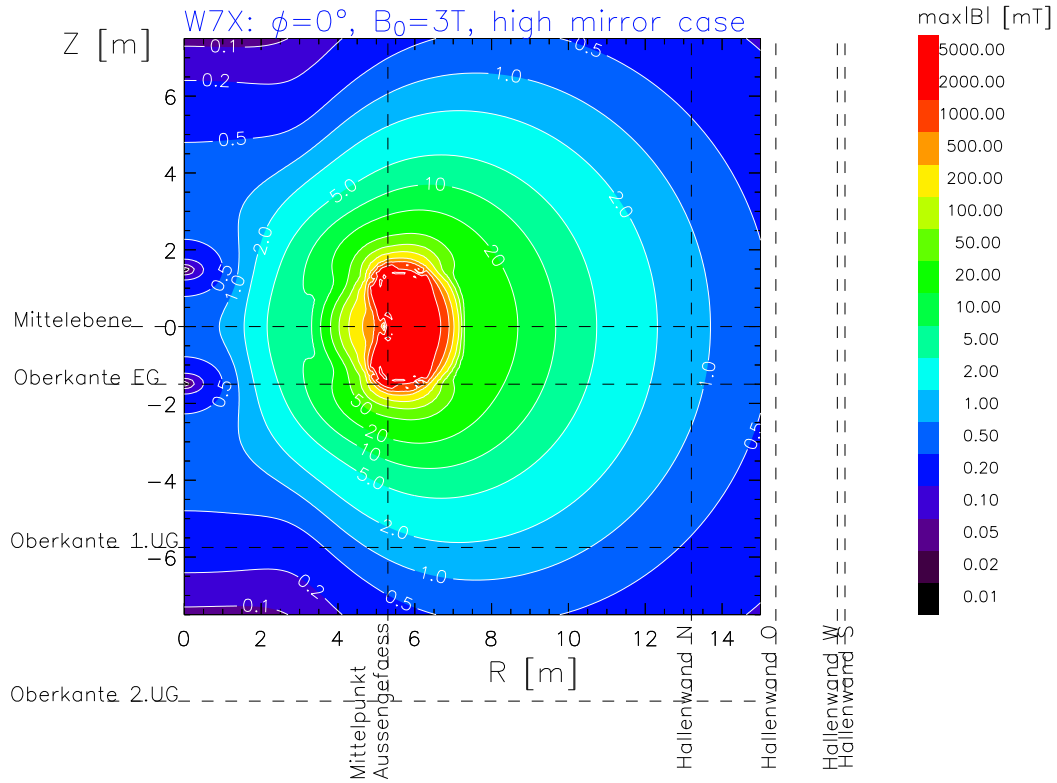


Abbildung 4.14: B -Feld in der Bohnenebene $\varphi = 0^0$, High-mirror-Fall.

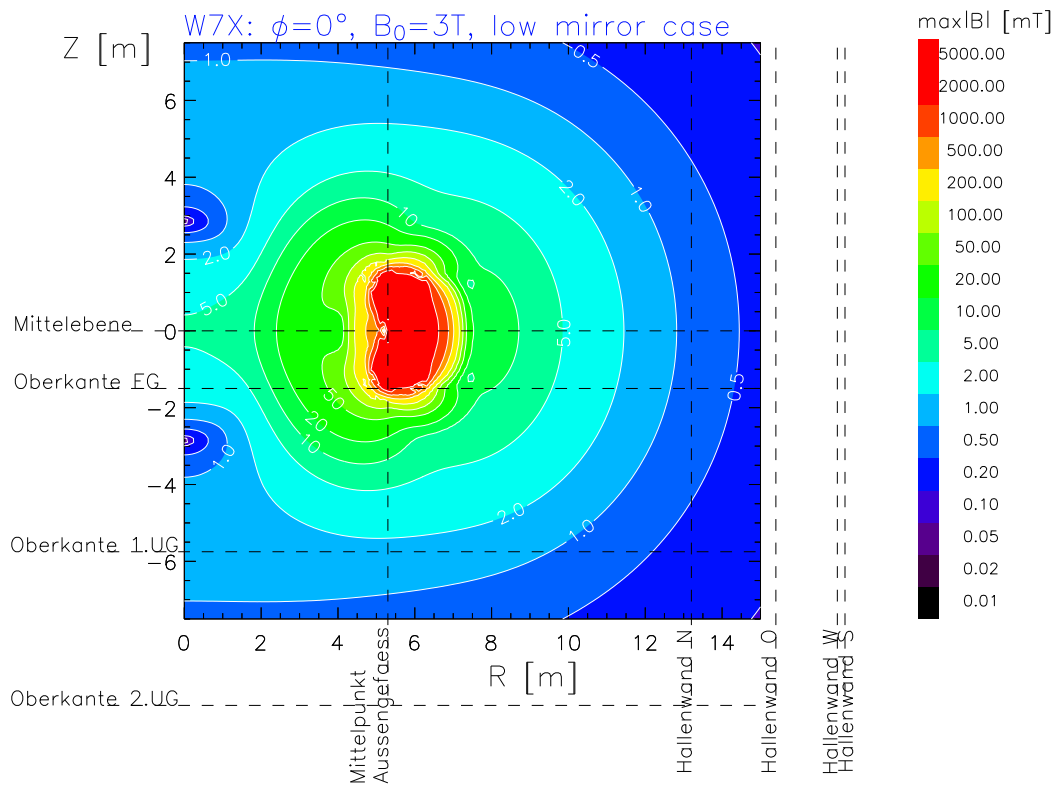


Abbildung 4.15: B -Feld in der Bohnenebene $\varphi = 0^0$, Low-mirror-Fall.

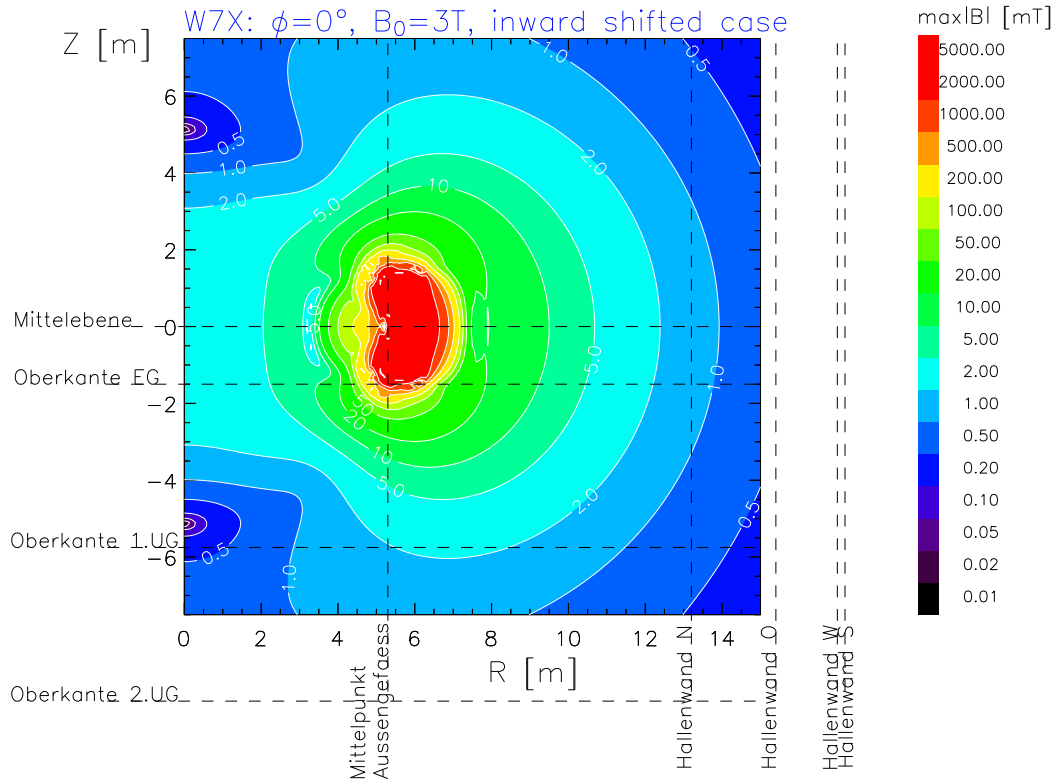


Abbildung 4.16: B -Feld in der Bohnenebene $\varphi = 0^0$, Inward-shift-Fall.

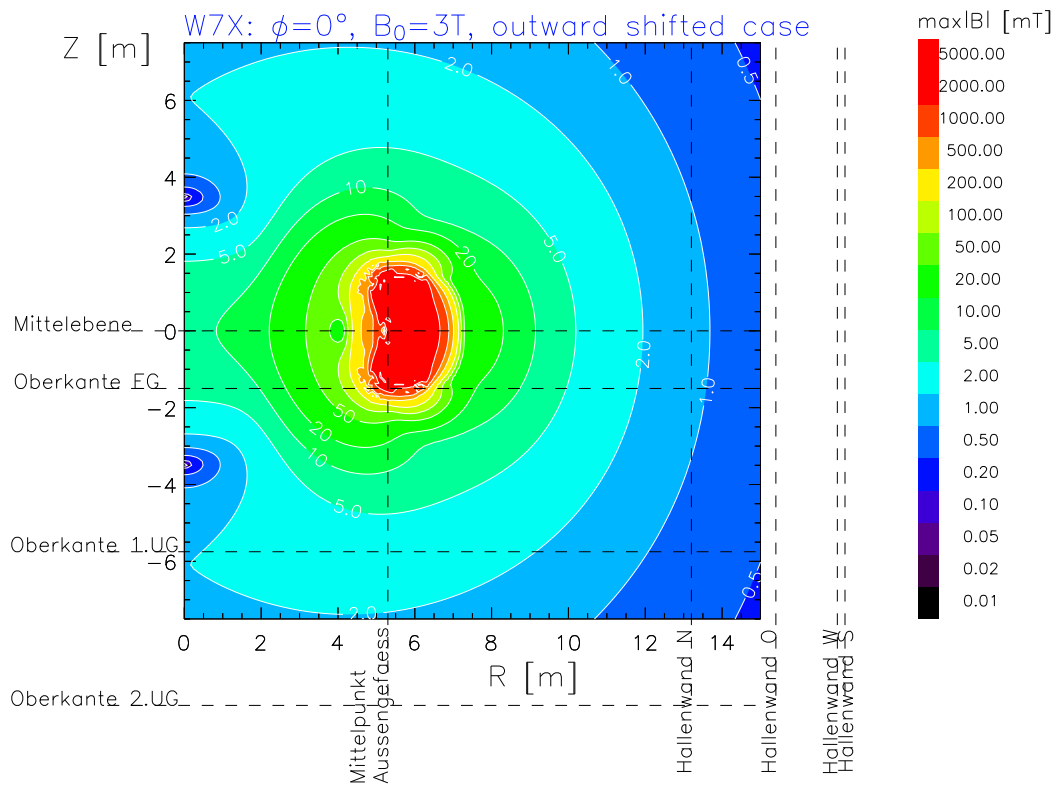


Abbildung 4.17: B -Feld in der Bohnenebene $\varphi = 0^0$, Outward-shift-Fall.

4.2.3 Streufeld des Standard-Falles in ausgewählten Ebenen

In diesem Abschnitt werden die Niveaulinien-Plots der Betragswerte des magnetischen Feldes des Standardfalles für ausgewählte Horizontalebene und deren komplementäre Ebenen dargestellt, und zwar für die Ebenen $z = \pm 1.50$ m, die Ebenen $z = \pm 4.25$ m und die Ebenen $z = \pm 8.10$ m. Die Stellaratorsymmetrie der Konfiguration wird durch Betrachtung der komplementären Ebenen augenfällig.

- Horizontalebene $z = +1.50$ m: Abbildung 4.18
- Horizontalebene $z = -1.50$ m: Abbildung 4.19
- Horizontalebene $z = +4.25$ m: Abbildung 4.20
- Horizontalebene $z = -4.25$ m: Abbildung 4.21
- Horizontalebene $z = +8.10$ m: Abbildung 4.22
- Horizontalebene $z = -8.10$ m: Abbildung 4.23

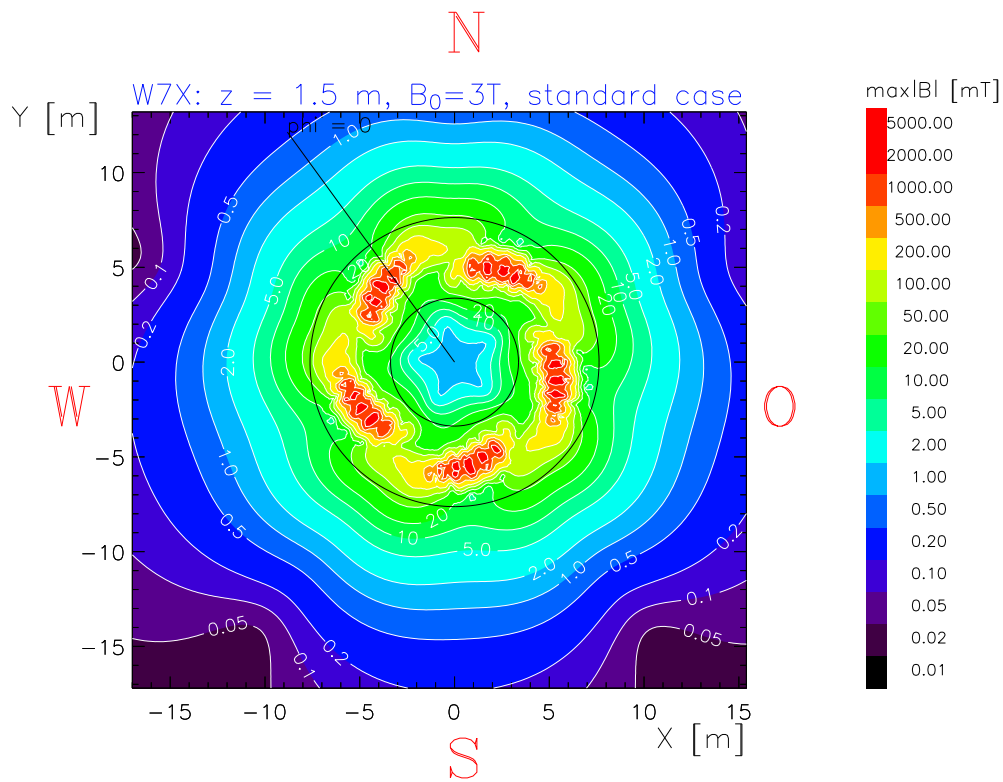


Abbildung 4.18: B -Feld in Ebene $z = +1.50 \text{ m}$, Standard-Fall.

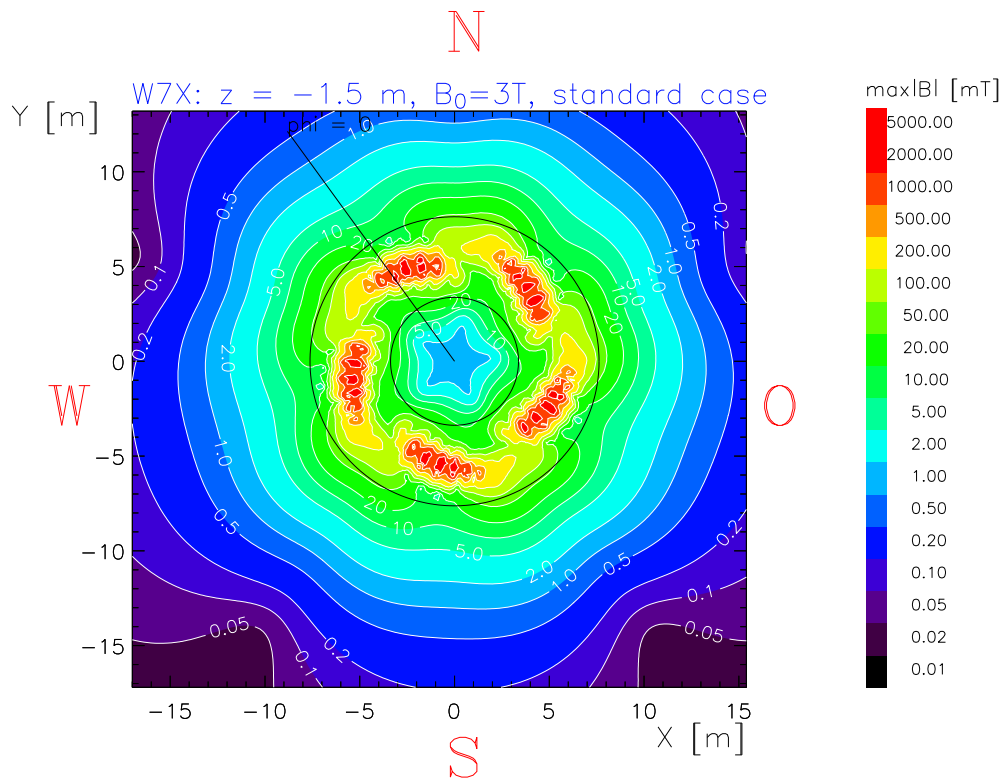


Abbildung 4.19: B -Feld in Ebene $z = -1.50 \text{ m}$, Standard-Fall.

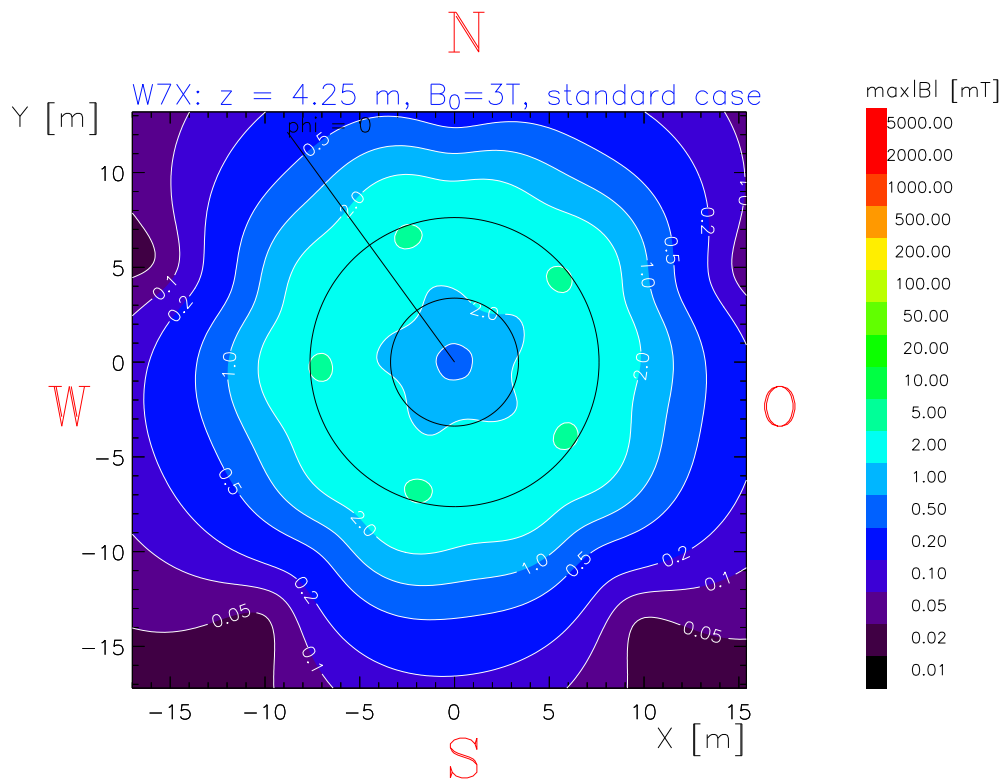


Abbildung 4.20: B -Feld in Ebene $z = +4.25$ m, Standard-Fall.

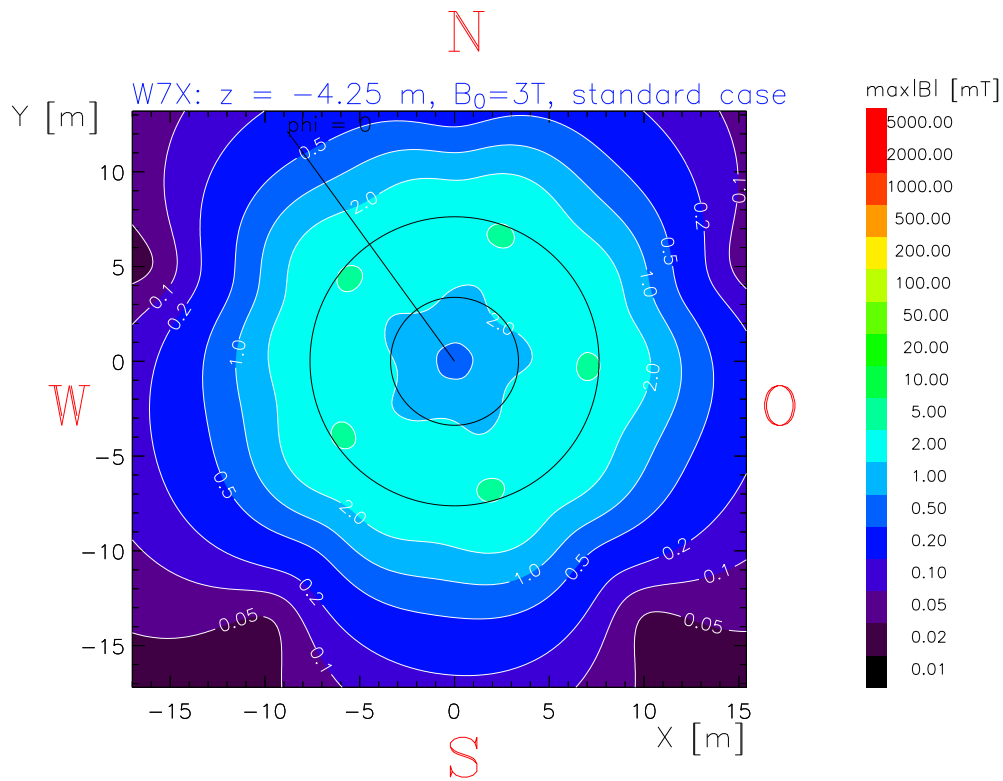


Abbildung 4.21: B -Feld in Ebene $z = -4.25$ m, Standard-Fall.

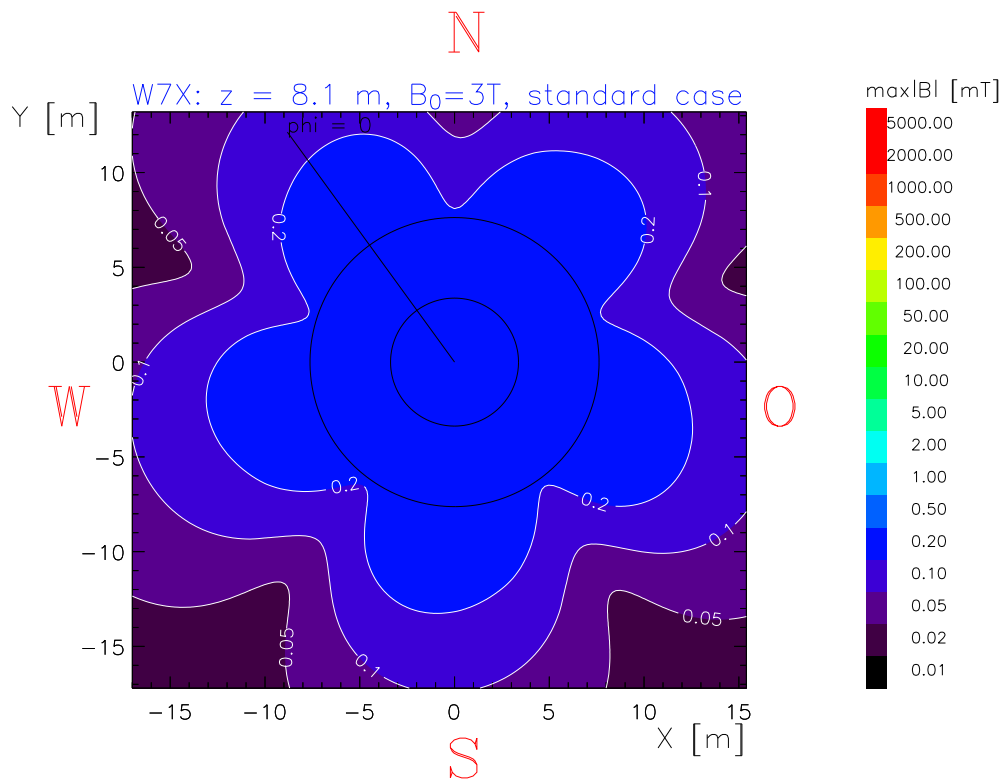


Abbildung 4.22: *B-Feld in Ebene $z = +8.10$ m, Standard-Fall.*

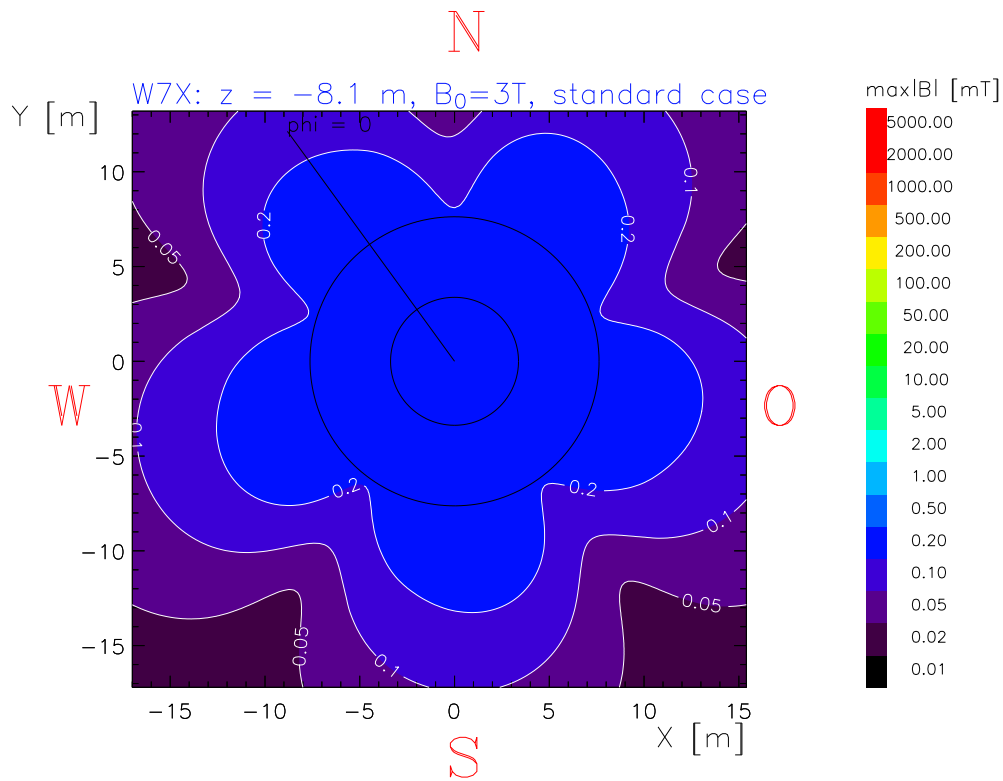


Abbildung 4.23: *B-Feld in Ebene $z = -8.10$ m, Standard-Fall.*

4.3 Darstellung in Magnetfeldkarten

In den Magnetfeldkarten erfolgt die Darstellung der Maxima der Feldwerte aus den Betriebsfällen, bezogen auf den jeweiligen Punkt des Raumes, d.h. als Kombination der einzelnen Betriebsfälle. Die Magnetfeldkarte zeigt also kein reales Magnetfeld, sondern eine Verteilung nicht gleichzeitig, aber örtlich erreichbarer Grenzwerte. Außerdem wird registriert und graphisch dargestellt, welcher Betriebsfall das Maximum in dem betreffenden Raumpunkt liefert. Auf diese Weise erhält man einen Überblick über die Betriebsfälle mit den größten Streufeldern.

4.3.1 Magnetfeldkarten: B_{max}-Feld als Funktion des Ortes

Die kombinierten Werte des Maximalfeldes aus den verschiedenen Betriebsfällen werden für die folgenden Ebenen dargestellt:

- Horizontalebene $z = 0.00$ m: Abbildung 4.24
- Horizontalebene $z = 1.50$ m: Abbildung 4.25
- Horizontalebene $z = -4.25$ m: Abbildung 4.26
- Horizontalebene $z = -8.10$ m: Abbildung 4.27
- Toroidalebene $\varphi = 0^0$: Abbildung 4.28
- Toroidalebene $\varphi = 36^0$: Abbildung 4.29

4.3.2 Magnetfeldkarten: Betriebsfall als Funktion des B_{max}-Feldes

Für den kombinierten Wert des Maximalfeldes wird der verursachende Betriebsfall registriert und dargestellt:

- Horizontalebene $z = 0.00$ m: Abbildung 4.30
- Horizontalebene $z = 1.50$ m: Abbildung 4.31
- Horizontalebene $z = -4.25$ m: Abbildung 4.32
- Horizontalebene $z = -8.10$ m: Abbildung 4.33
- Toroidalebene $\varphi = 0^0$: Abbildung 4.34
- Toroidalebene $\varphi = 36^0$: Abbildung 4.35

Magnetfeldkarte

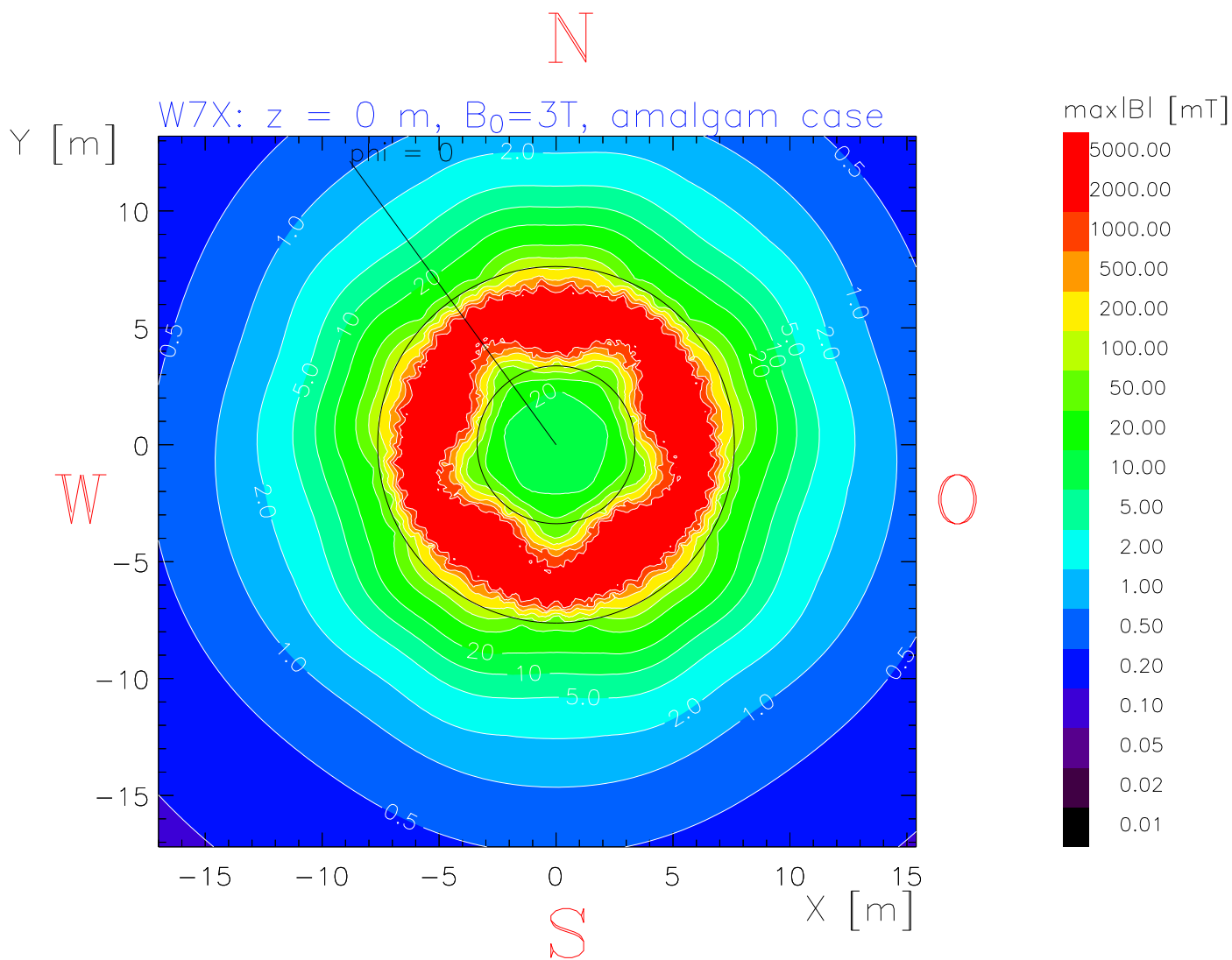


Abbildung 4.24: Maximales B -Feld als Funktion des Ortes, Ebene $z = 0.00$ m.

Magnetfeldkarte

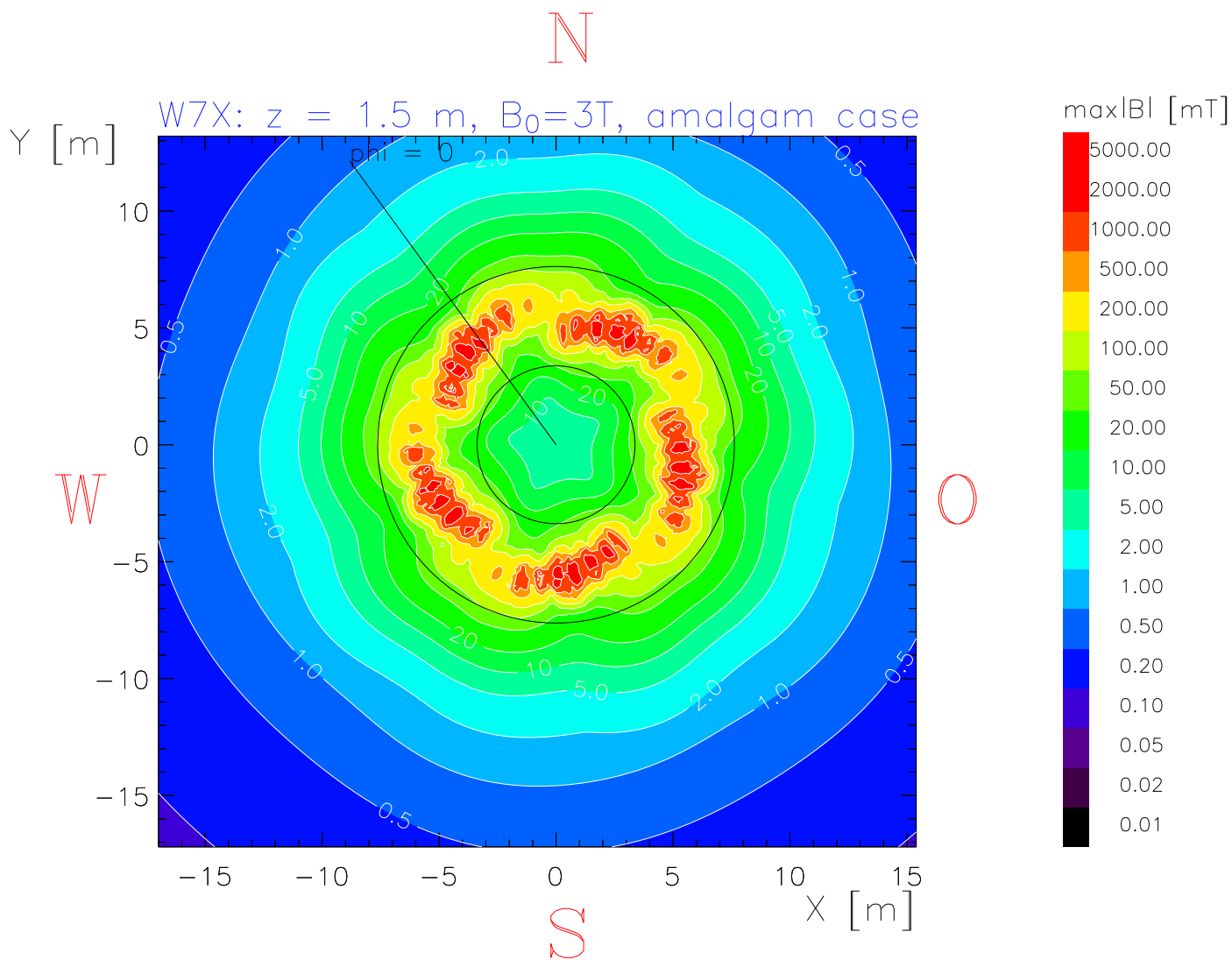


Abbildung 4.25: Maximales B -Feld als Funktion des Ortes, Ebene $z = 1.50$ m.

Magnetfeldkarte

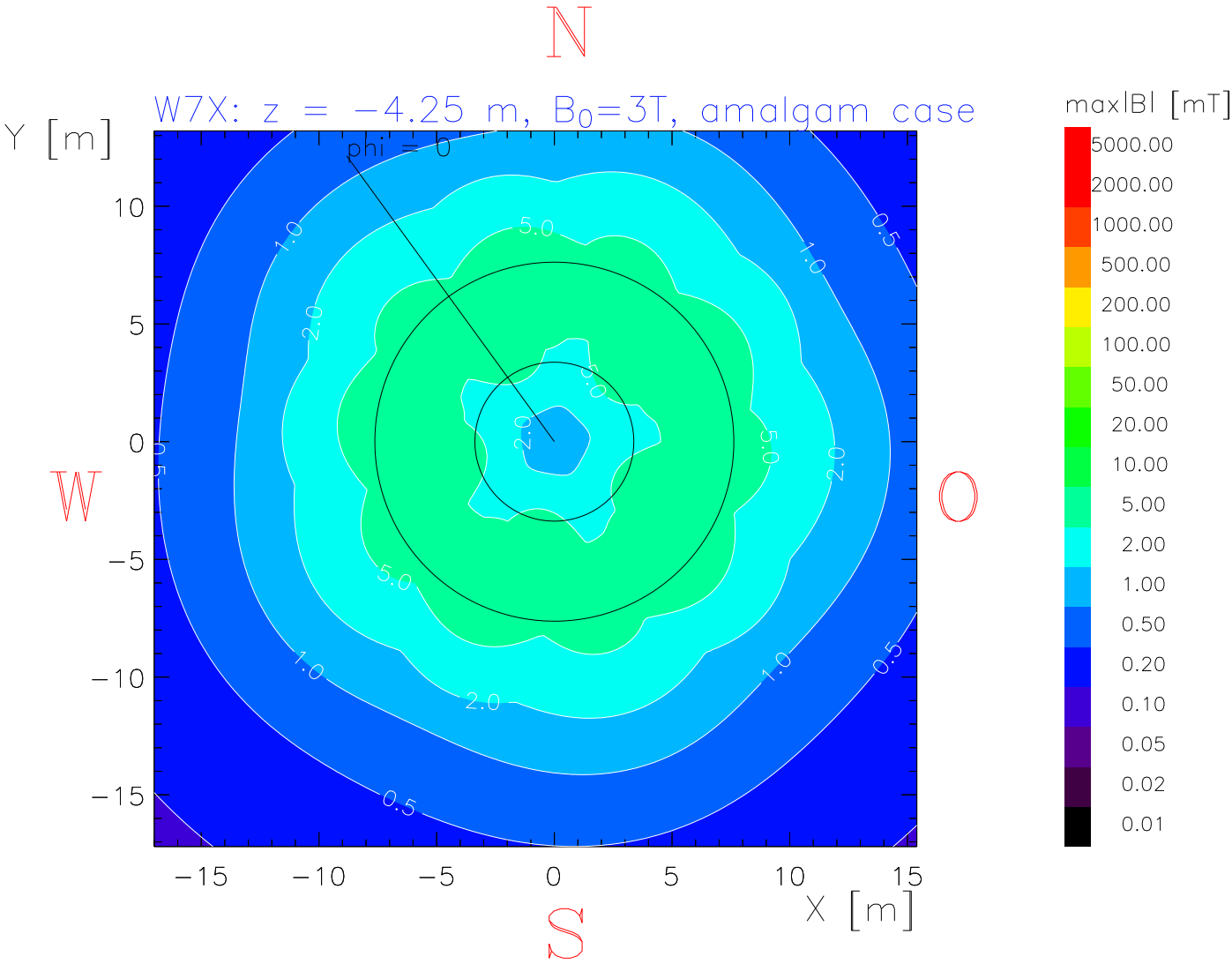


Abbildung 4.26: Maximales B-Feld als Funktion des Ortes, Ebene $z = -4.25$ m.

Magnetfeldkarte

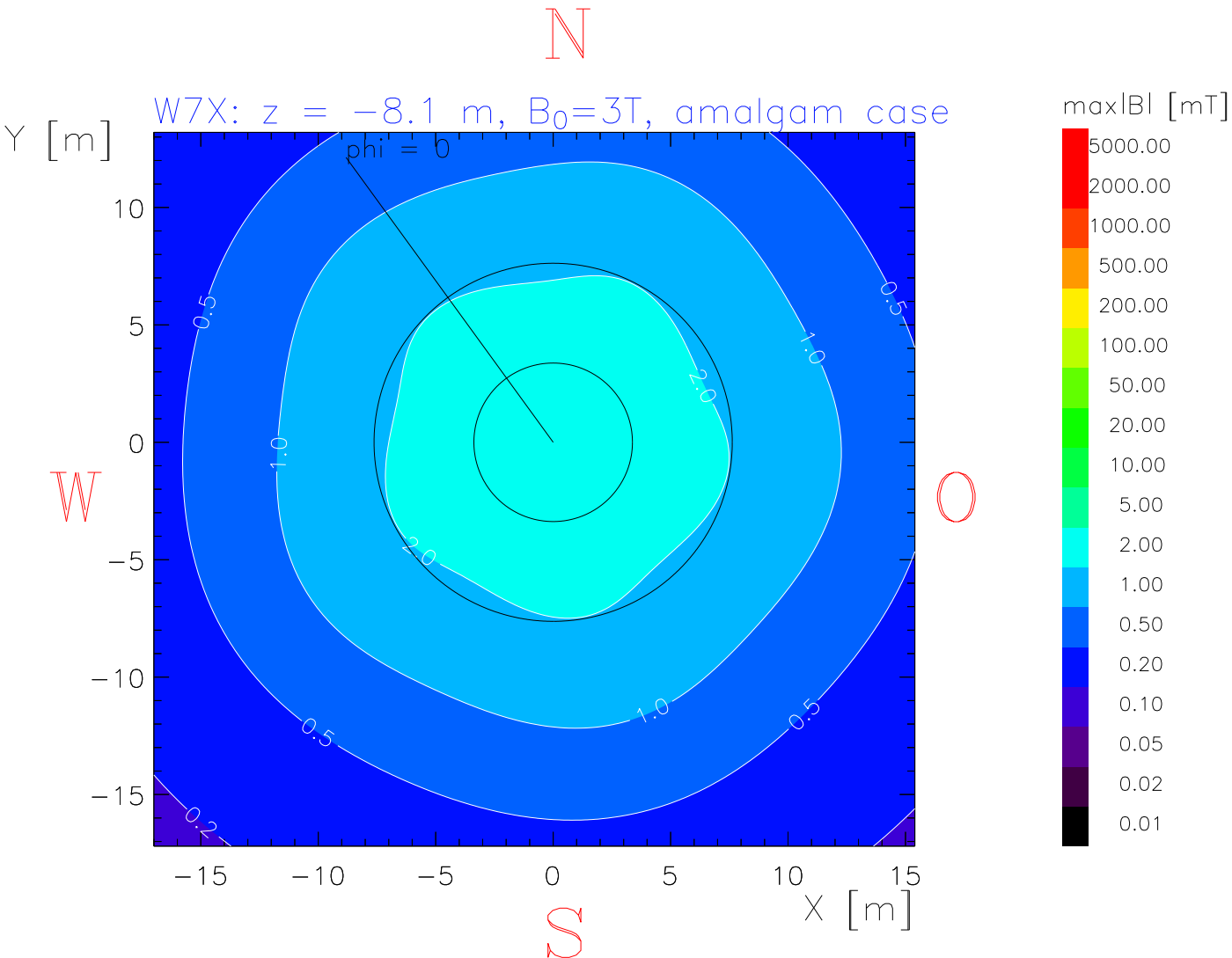


Abbildung 4.27: Maximales B-Feld als Funktion des Ortes, Ebene $z = -8.10$ m.

Magnetfeldkarte

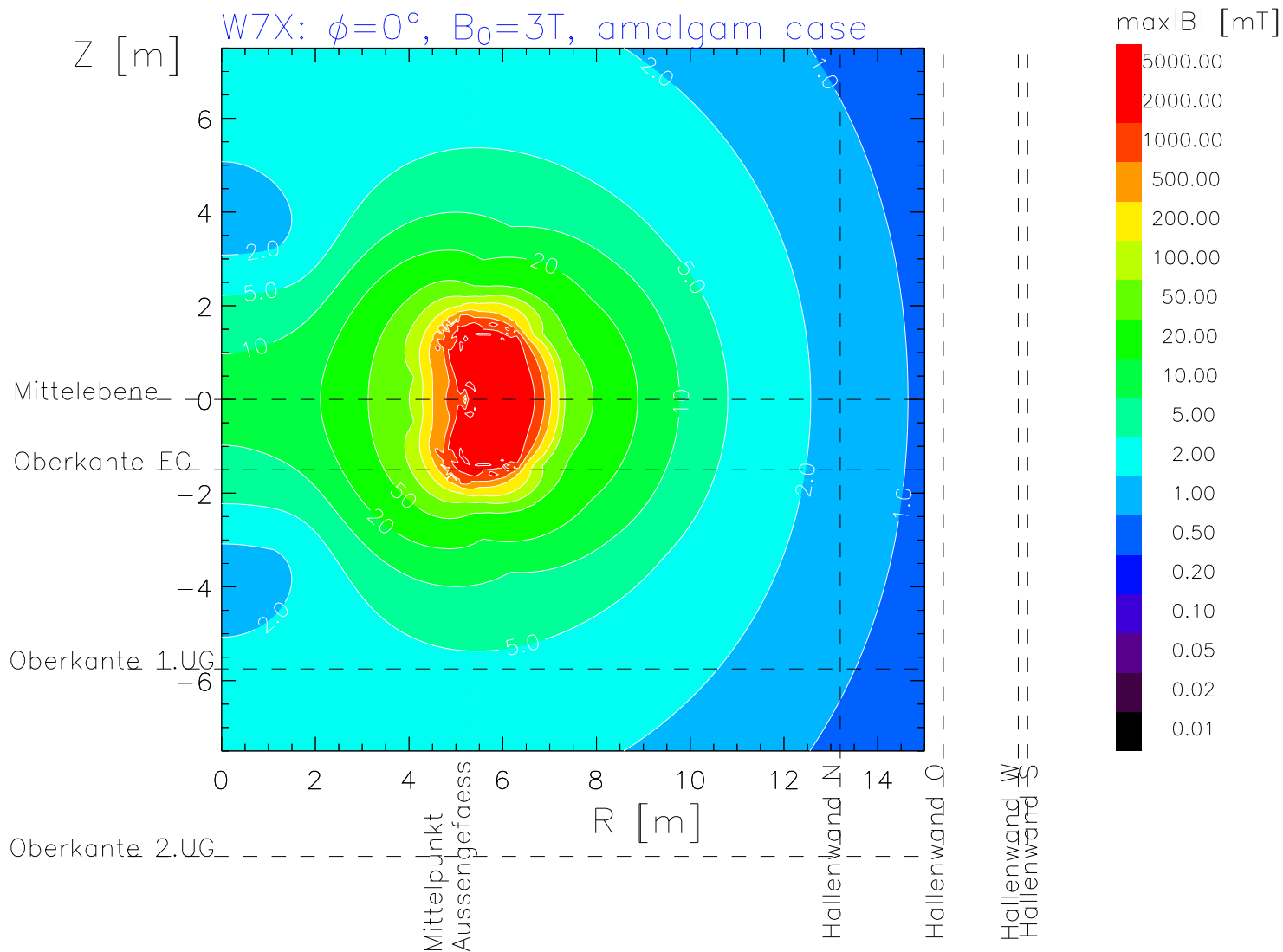


Abbildung 4.28: Maximales B -Feld als Funktion des Ortes, Bohnenebene $\phi = 0^\circ$.

Magnetfeldkarte

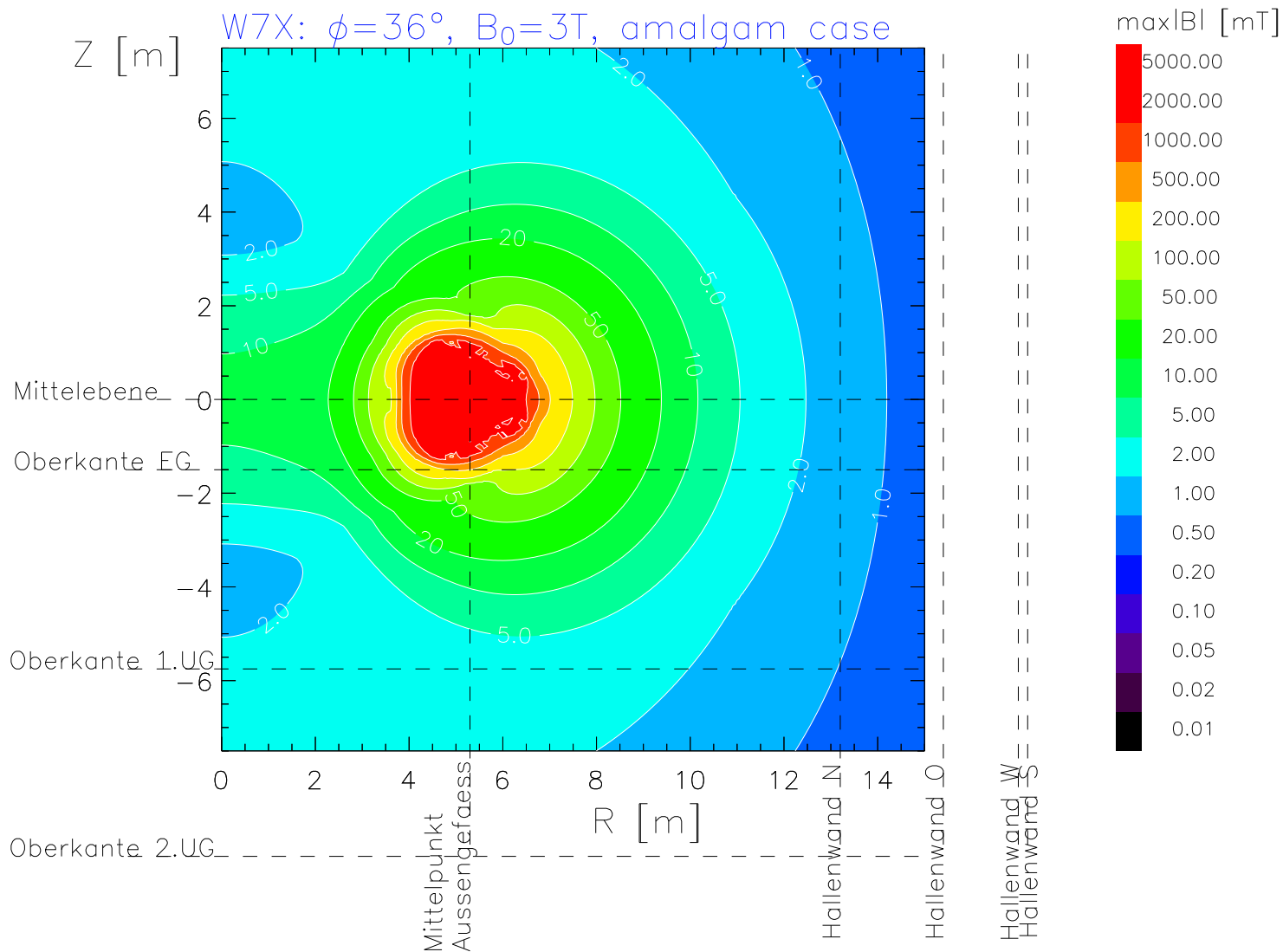
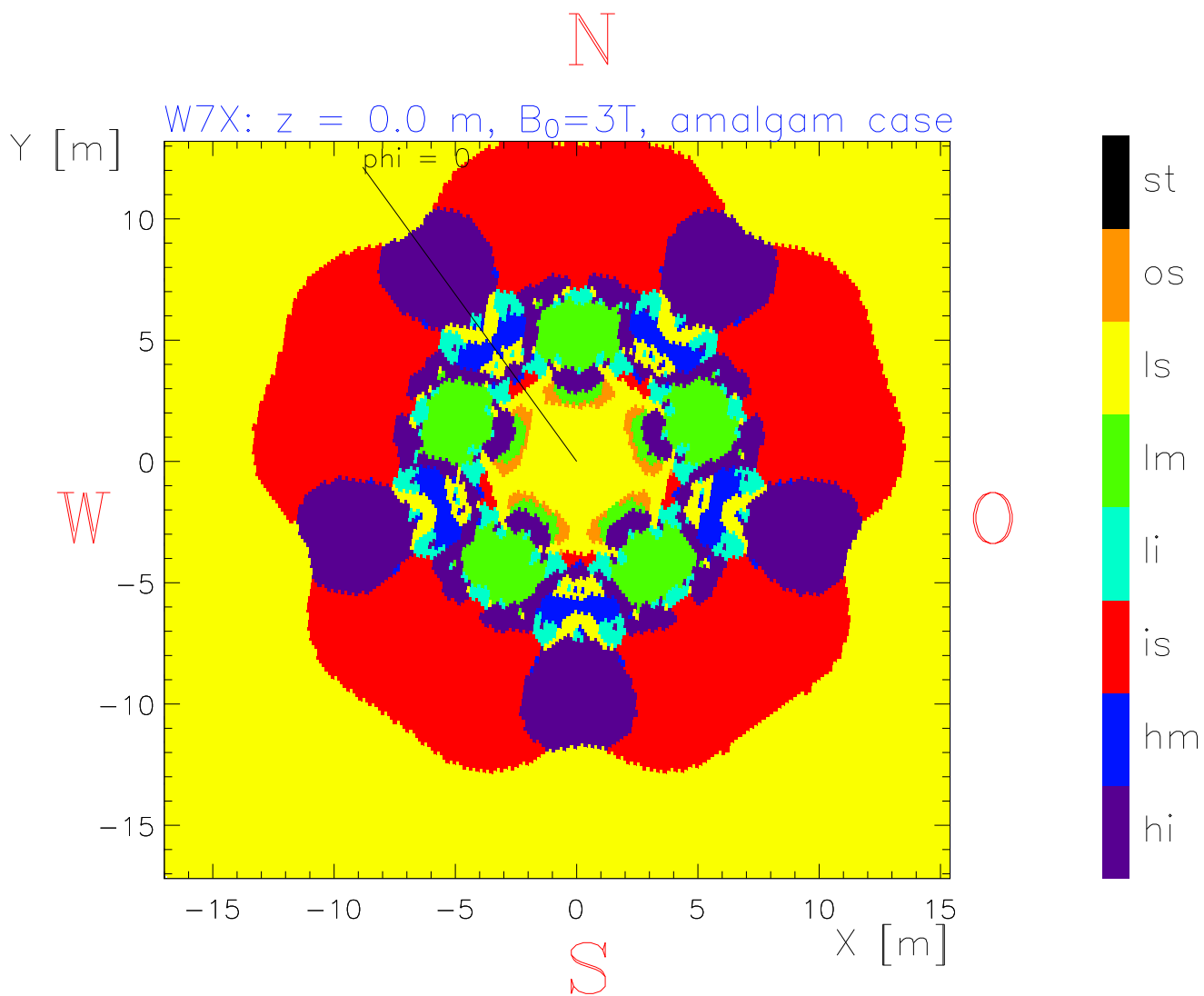


Abbildung 4.29: Maximales B -Feld als Funktion des Ortes, Dreiecksebene $\phi = 36^\circ$.

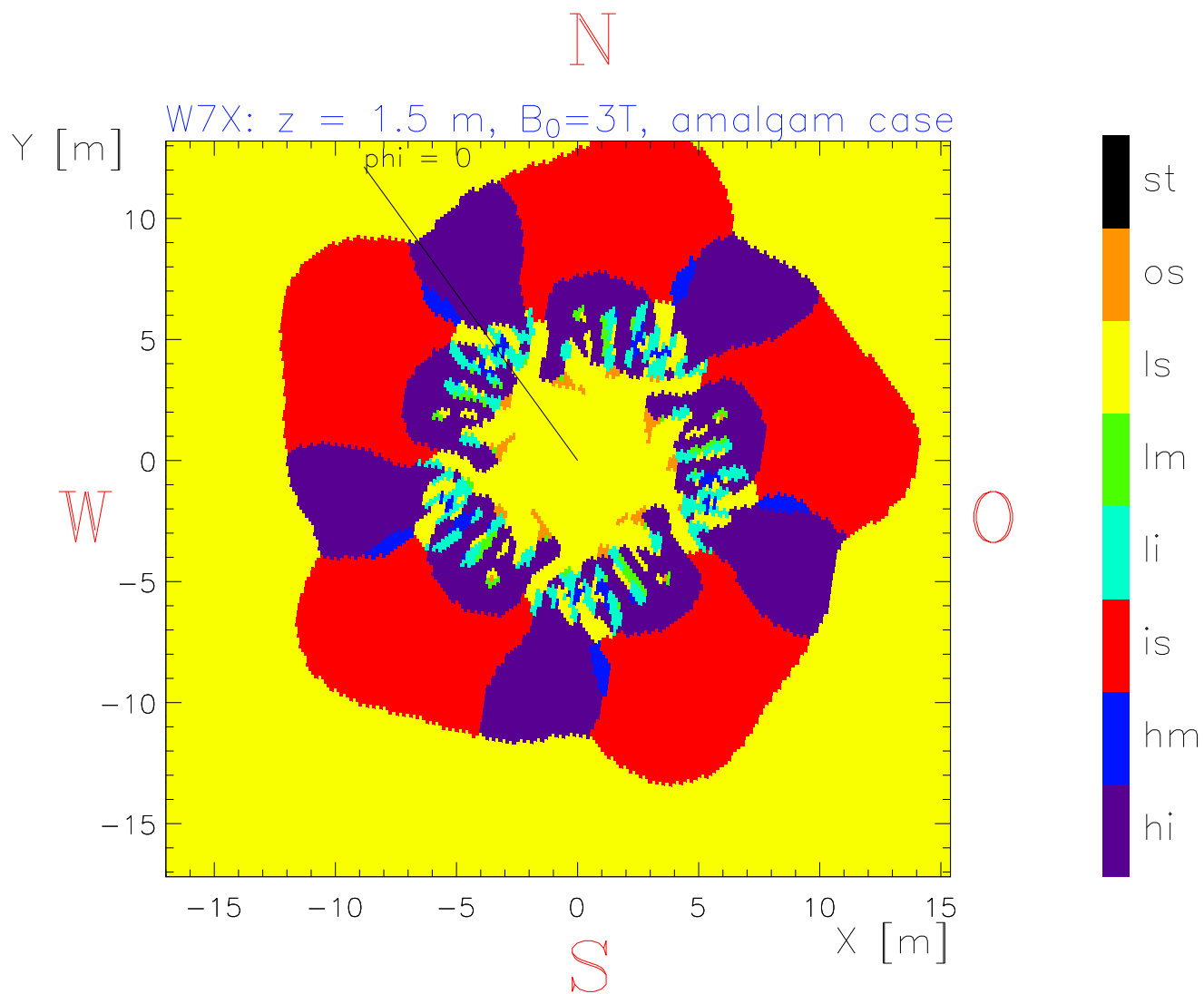
Magnetfeldkarte



st – standard case
 os – outward shifted case
 ls – low shear case
 lm – low mirror case
 li – low ι case
 is – inward shifted case
 hm – high mirror case
 hi – high ι case

Abbildung 4.30: Betriebsfall als Funktion des maximalen B -Feldes, Ebene $z = 0.00$ m.

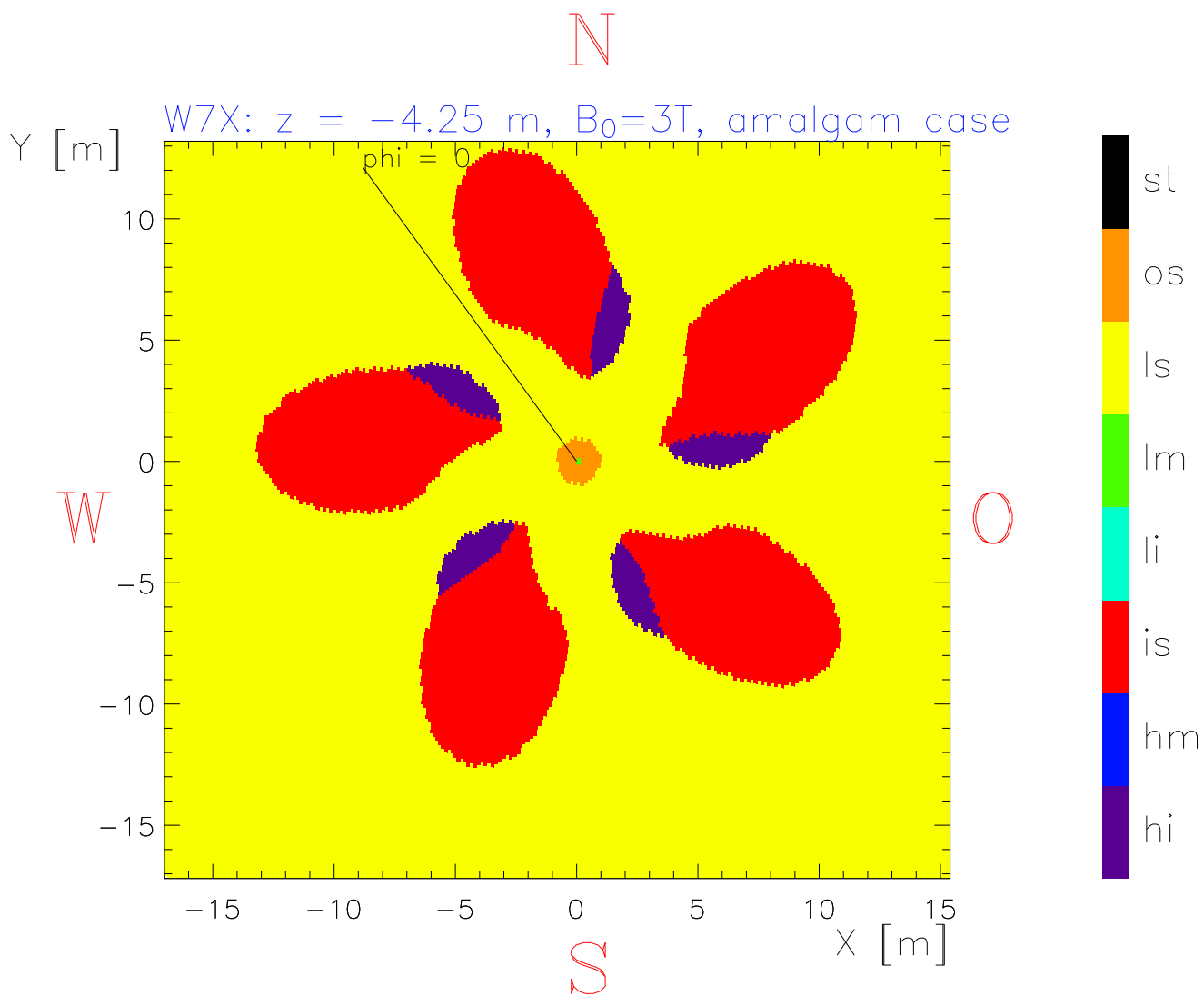
Magnetfeldkarte



- st – standard case
- os – outward shifted case
- ls – low shear case
- lm – low mirror case
- li – low ι case
- is – inward shifted case
- hm – high mirror case
- hi – high ι case

Abbildung 4.31: Betriebsfall als Funktion des maximalen B -Feldes, Ebene $z = 1.50 \text{ m}$.

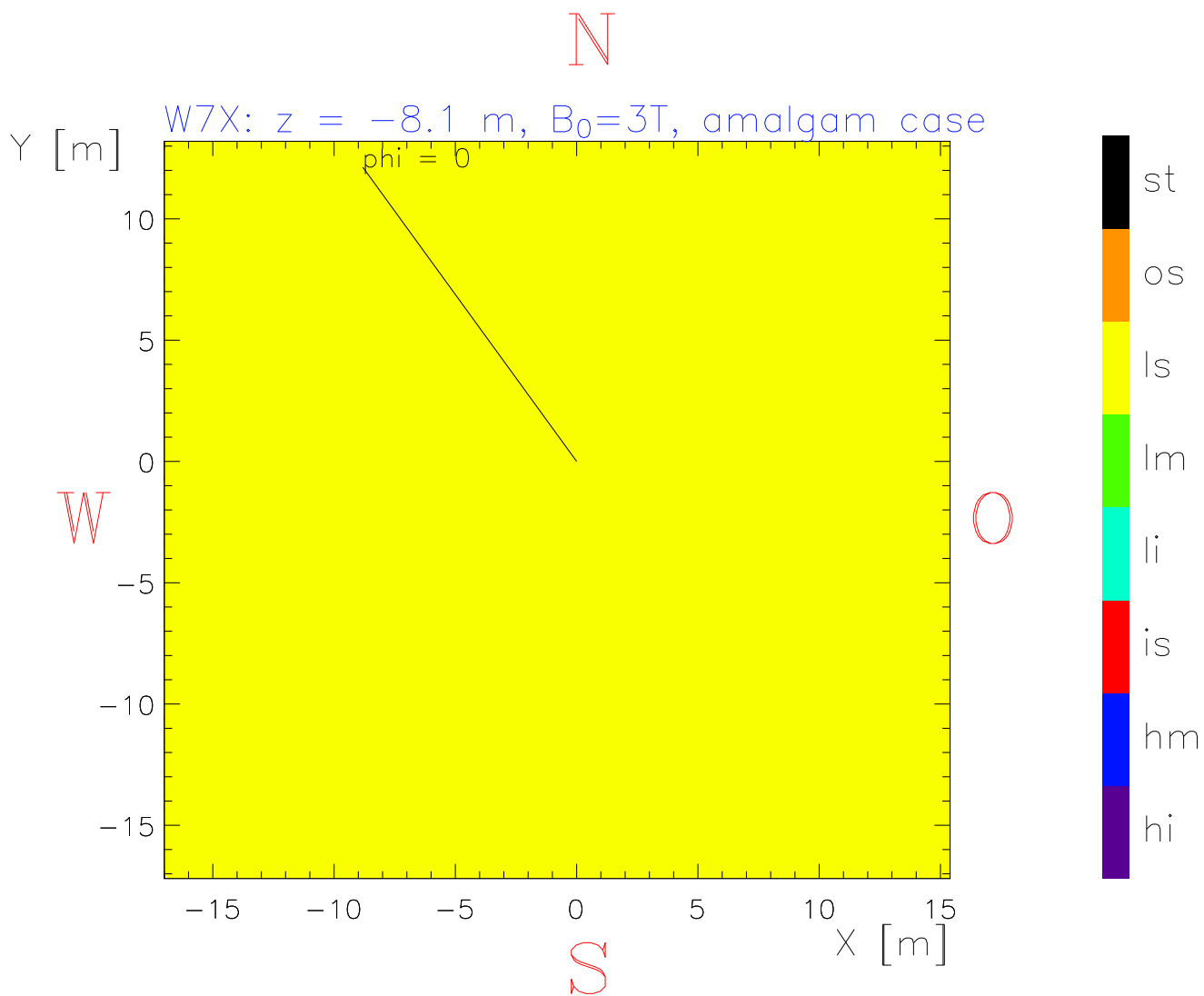
Magnetfeldkarte



- st – standard case
- os – outward shifted case
- ls – low shear case
- lm – low mirror case
- li – low ι case
- is – inward shifted case
- hm – high mirror case
- hi – high ι case

Abbildung 4.32: Betriebsfall als Funktion des maximalen B-Feldes, Ebene $z = -4.25$ m.

Magnetfeldkarte



- st – standard case
- os – outward shifted case
- ls – low shear case
- lm – low mirror case
- li – low ι case
- is – inward shifted case
- hm – high mirror case
- hi – high ι case

Abbildung 4.33: Betriebsfall als Funktion des maximalen B-Feldes, Ebene $z = -8.10$ m.

Magnetfeldkarte

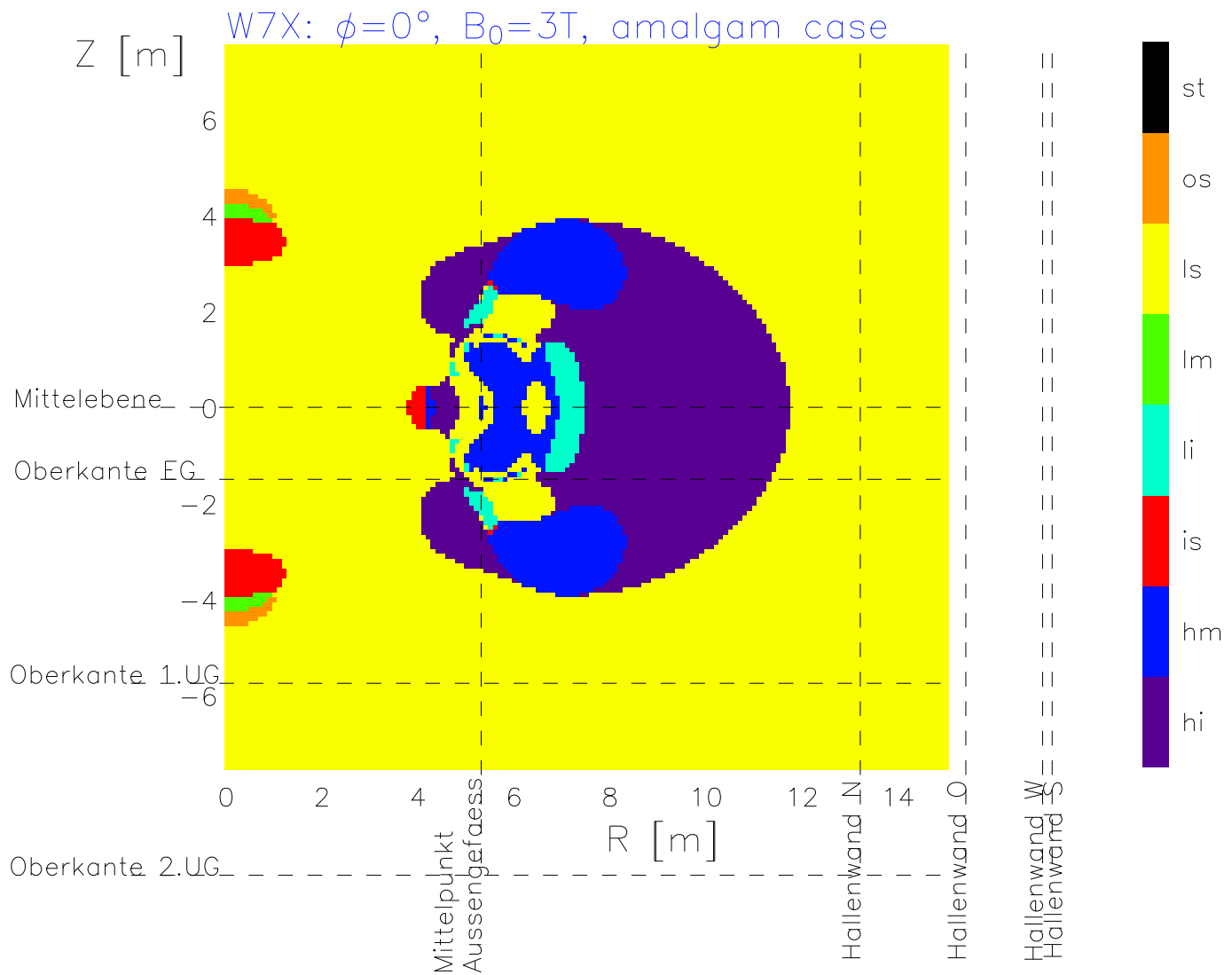


Abbildung 4.34: Betriebsfall als Funktion des B_{max} -Feldes, Bohnenebene $\varphi = 0^\circ$.

Magnetfeldkarte

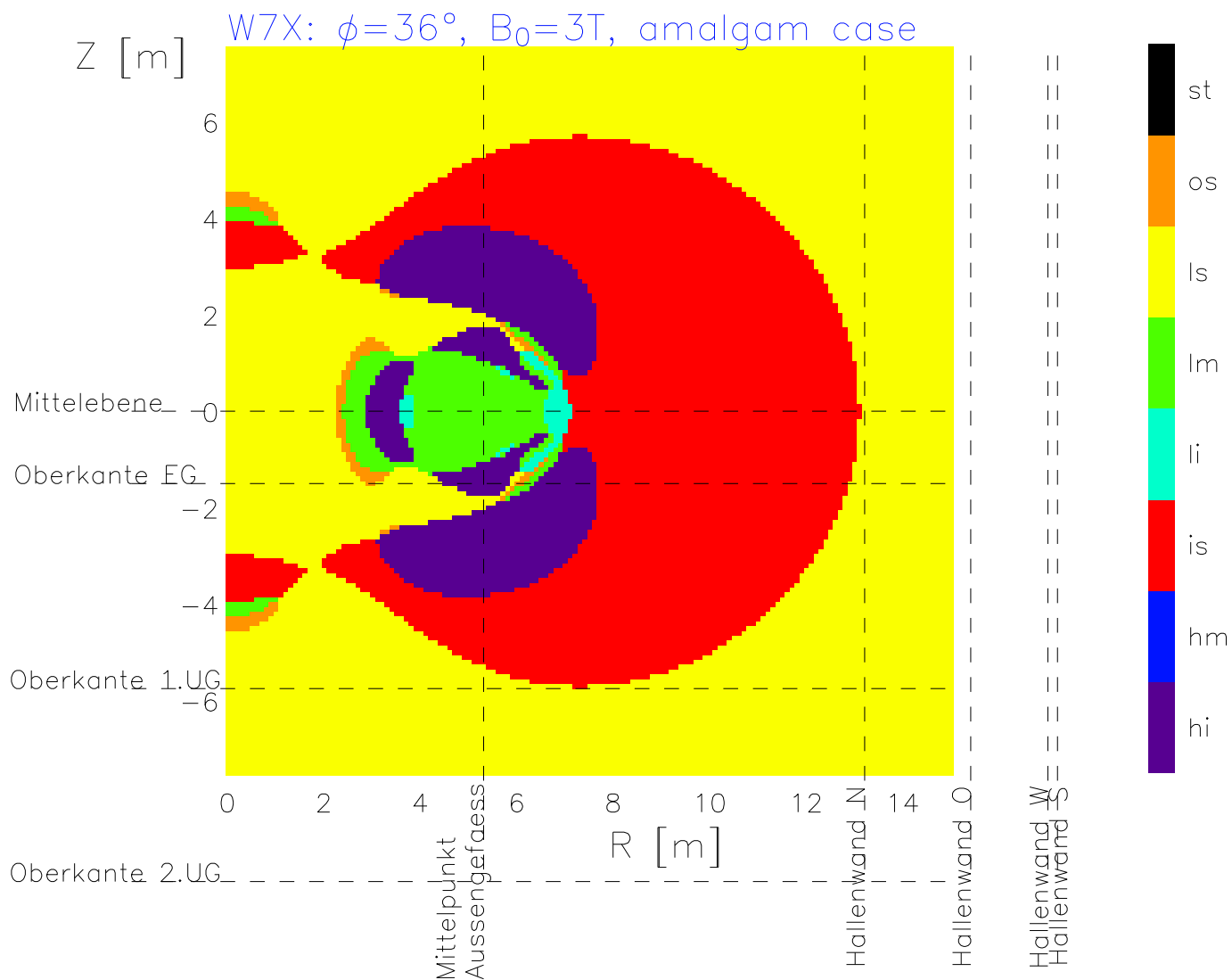


Abbildung 4.35: Betriebsfall als Funktion des B_{max} -Feldes, Dreiecksebene $\varphi = 36^\circ$.

Kapitel 5

Zusammenfassung

Das Streufeld des Spulensystems von Wendelstein 7-X wurde in 8 definierten Betriebsfällen berechnet. Die Ergebnisse der Berechnungen stehen als Datensätze mit einem linearen Inkrement von 0.20 m zur Verfügung und sind für ausgewählte Ebenen graphisch dargestellt. Außerdem sind die Maxima der Feldwerte aus den Betriebsfällen in Magnetfeldkarten zusammengefaßt. Diese Magnetfeldkarten zeigen kein reales Magnetfeld, sondern eine Verteilung nicht gleichzeitig, aber örtlich erreichbarer Grenzwerte. In den Magnetfeldkarten sind sowohl die Magnetfeldmaxima als Funktion des Ortes, als auch die Betriebsfälle als Funktion der Magnetfeldmaxima dargestellt.

Die Ergebnisse der Berechnungen zeigen, dass die zugrundeliegende Magnetfeldkonfiguration vom Helias-Typ durch ein relativ geringes Streufeld gekennzeichnet ist. Mehr als 90% der Magnetfeldenergie ist im Torusbereich gespeichert. Das gilt für alle betrachteten Betriebsfälle, wobei die einzelnen Betriebsfälle um wenige Prozent differieren.

In größerer Entfernung vom Spulensystem ($R \geq 13$ m, $|z| \geq 6$ m) liefert der Betriebsfall "Low-shear" das größte Streufeld. Das ist verständlich, denn das Streufeld enthält in diesem Betriebsfall eine relativ hohe Bz-Feldkomponente, die vor allem von den vom Strom gegensinnig durchflossenen planaren Zusatzspulen erzeugt wird. Betrachtet man in den Magnetfeldkarten die Feldverteilung in der Torusmittelebene bei $z = 0.00$ m und geht radial nach außen, so beträgt der Feldwert bei $R = 7$ m, d.h. unmittelbar am äußeren Kryostaten, etwa 100 mT, bei $R = 10$ m etwa 10 mT, bei $R = 13$ m etwa 1 mT und bei $R = 16$ m etwa 0.1 mT (1 Gauss). Der Betrag des magnetischen Streufeldes nimmt also in größerer Entfernung vom Torus mit r^{-3} ab, wie erwartet.

Danksagung: Wir bedanken uns bei Frau H. Laqua und Herrn H. Niedermeyer für wertvolle Hinweise und anregende Diskussionen zum dargestellten Themenkreis.

FINIS
