

Simulation

der durch das P2-Experiment erzeugten Direktstrahlung und der remanenten Radioaktivität

von

Matou Stemmler

Juni 2018

Abschlussarbeit zur Erlangung des akademischen Grades
„Bachelor of Science“ (B.Sc.) in Physik



JOHANNES GUTENBERG
UNIVERSITÄT MAINZ

1. Gutachter: Prof. Dr. Kurt Aulenbacher
2. Gutachter: Prof. Dr. Niklaus Berger

Ich versichere, dass ich die Arbeit selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt sowie Zitate kenntlich gemacht habe.

Mainz, den [Datum] [Unterschrift]

Matou Stemmler
B2
Helmholtz-Institut Mainz
Staudingerweg 18
Johannes Gutenberg-Universität D-55099 Mainz
mstemmle@students.uni-mainz.de

Inhaltsverzeichnis

| | |
|--|-----------|
| 1. Einleitung | 1 |
| 2. Grundlagen | 3 |
| 2.1. Aufbau und Funktionsweise von MESA | 3 |
| 2.2. Äquivalenzdosis | 5 |
| 2.3. Bremsstrahlung | 5 |
| 2.4. Neutronenproduktion | 9 |
| 2.4.1. Kernphotoeffekt | 10 |
| 2.4.2. Riesenresonanz | 11 |
| 2.5. Bildung und Zerfall von Radionukliden | 11 |
| 2.6. Magnetfeld eines Solenoiden | 13 |
| 2.7. Funktionsweise von FLUKA | 14 |
| 3. Simulation | 16 |
| 3.1. Geometrie | 16 |
| 3.2. Materialien | 24 |
| 3.3. Magnetfeld | 26 |
| 3.4. Starteinstellungen | 27 |
| 4. Direktstrahlung | 29 |
| 4.1. Zielsetzung | 29 |
| 4.2. Ausgangssimulation | 29 |
| 4.3. Verbesserungsmöglichkeiten | 34 |
| 4.3.1. Simulation Variante 1 | 35 |
| 4.3.2. Simulation Variante 2 | 38 |
| 4.3.3. Simulation Variante 3 | 40 |
| 4.3.4. Vergleich der drei Varianten | 42 |
| 4.3.5. Simulation Variante 4 | 43 |
| 4.4. Fazit | 46 |

Inhaltsverzeichnis

| | |
|--|-----------|
| 5. Remanente Radioaktivität | 48 |
| 5.1. Zielsetzung | 48 |
| 5.2. Erzeugte Isotope | 48 |
| 5.2.1. Übersicht der erzeugten Isotope | 48 |
| 5.2.2. Langlebige Isotope | 49 |
| 5.2.3. Aktivierung der Luft | 54 |
| 5.3. Aktivitätsverteilung | 58 |
| 5.4. Erzeugte Dosisleistung | 59 |
| 5.5. Fazit | 63 |
| 6. Weitere Simulationen | 64 |
| 6.1. Kohlenstoff-Target | 64 |
| 6.2. Blei-Target | 66 |
| 6.3. Deuterium-Target | 67 |
| 7. Zusammenfassung der Ergebnisse | 69 |
| 8. Ausblick | 71 |
| 9. Danksagung | 72 |
| A. Anhang | 75 |
| A.1. Magnetfeld | 75 |
| A.2. Direktstrahlung | 77 |
| A.2.1. Ausgangssimulation | 77 |
| A.2.2. Simulation Variante 1 | 86 |
| A.2.3. Simulation Variante 2 | 93 |
| A.2.4. Simulation Variante 3 | 100 |
| A.2.5. Simulation Variante 4 | 107 |
| A.3. Remanente Radioaktivität | 114 |
| A.3.1. Erzeugte Isotope | 114 |
| A.3.2. Aktivitätsverteilung | 124 |
| A.3.3. Erzeugte Dosisleistung | 129 |

1. Einleitung

In den kommenden Jahren soll in der Johannes Gutenberg-Universität Mainz am Institut der Kernphysik neben dem existierenden Elektronenbeschleuniger MAMI (**MA**inzer **MI**krotron) ein weiterer Elektronenbeschleuniger namens MESA (**MA**inz **E**nergy-recovering **S**uperconducting **A**ccelerator) gebaut werden. Es handelt sich hierbei um einen Energierückgewinnungs-Linearbeschleuniger. Bei dieser Art von Beschleunigern wird durch die Rückgewinnung der kinetischen Energie der beschleunigten Elektronen ein sehr energiesparender Betriebsmodus ermöglicht.

Der neue MESA-Beschleuniger bietet unter anderem die Voraussetzungen für das P2-Experiment. Dieses befasst sich mit hochpräzisen Messungen des Mischungswinkels der elektroschwachen Vereinheitlichung. Für diese Messung wird ein flüssiges Wasserstoff-Target mit spinpolarisierten Elektronen bestrahlt. Die Elektronen wechselwirken mit dem Proton (Atomkern des Wasserstoffs) in Form von elastischer Streuung und geben danach ihre Energie im Strahlfänger ab.

Im Zuge der Planung des Aufbaus von MESA und des P2-Experiments ergeben sich diverse strahlenschutztechnische Herausforderungen, die den Betrieb des Beschleunigers und den sicheren Umgang mit ihm betreffen. In dieser Arbeit sollen die Ausmaße der Direktstrahlung und der remanenten Radioaktivität, die durch das P2-Experiment erzeugt werden, untersucht werden. Zu diesem Zweck wird die Monte-Carlo-Simulationssoftware FLUKA verwendet.

Zu Beginn der Arbeit werden die hierfür erforderlichen Grundlagen erörtert. Anschließend wird der grundsätzliche Aufbau der Simulation beschrieben und diese durchgeführt. Aufgrund ihrer Ergebnisse werden insgesamt vier Verbesserungsmöglichkeiten dieser Simulation dargestellt. Sowohl die Ausgangssimulation als auch die aus ihr resultierenden Varianten befassen sich ausschließlich mit der Direktstrahlung. Im Folgenden wird auf der Basis der verbesserten Simulation auf das Thema der remanenten Radioaktivität eingegangen. Anschließend werden drei weitere Simulationen mit veränderten Targetmaterialien durchge-

1. Einleitung

führt. Am Ende der Arbeit erfolgt eine Zusammenfassung der Ergebnisse sowie ein Ausblick.

2. Grundlagen

In diesem Kapitel werden die zum Verständnis dieser Arbeit notwendigen Grundlagen besprochen. Dazu gehört unter anderem der Aufbau und die Funktionsweise des Beschleunigers MESA. Des Weiteren wird auf den Begriff der Äquivalenzdosis und die physikalischen Kenntnisse zu den Themen Bremsstrahlung, Neutronenproduktion und der Bildung und dem Zerfall von Radionukliden eingegangen. Außerdem wird kurz das Magnetfeld eines Solenoiden erörtert. Zum Schluss wird die Funktionsweise des Simulationsprogramms FLUKA erklärt.

2.1. Aufbau und Funktionsweise von MESA

Bei dem Mainz Energy-recovering Superconducting Accelerator handelt es sich um einen im Bau befindlichen energierückgewinnenden Linearbeschleuniger, mit dem sich nach Fertigstellung Elektronen bei einem maximalen Strom von 1 mA auf die Energien von bis zu 155 MeV beschleunigen lassen. Im Folgenden wird auf den Aufbau und die Funktionsweise eingegangen.

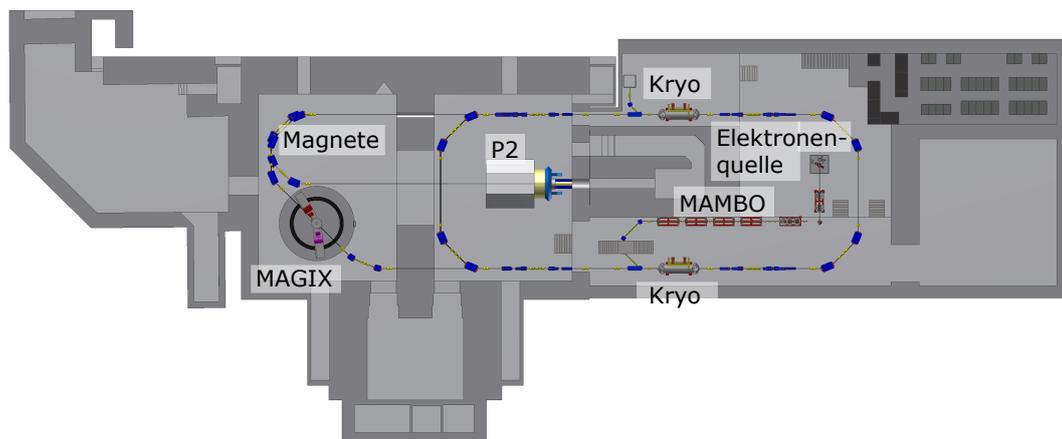


Abbildung 2.1.: Die Abbildung zeigt den geplanten Aufbau des Beschleunigers MESA. Alle wichtigen Beschleunigerelemente sind durch ihre Bezeichnung hervorgehoben. [1]

2. Grundlagen

In der Grafik ist der geplante Aufbau von MESA abgebildet. Die wichtigsten Bauelemente sind dort beschriftet. Dabei handelt es sich um mehrere Elektromagnete, die Elektronenquelle, den Vorbeschleuniger MAMBO, die zwei Kryomodule (in der Grafik als Kryo bezeichnet), das MAGIX-Experiment und das P2-Experiment [2]. In dieser Arbeit wird der Betrieb hinsichtlich strahlenschutztechnischer Fragen des P2-Experiments simuliert. Das MAGIX-Experiment ist ein weiteres Experiment des Beschleunigers und wird in dieser Arbeit nicht behandelt.

Teilchenquelle:

Den Anfang des Beschleunigers stellt die Teilchenquelle dar. Aus dieser werden durch Laserbeschuss auf eine lichtempfindliche Oberfläche Elektronen ausgelöst. Diese werden zu Paketen gebündelt in den Vorbeschleuniger MAMBO (**MilliAMpereBOoster**) geleitet. Der Vorbeschleuniger ist 6,7 m lang und beschleunigt die Elektronen mithilfe elektromagnetischer Wechselfelder auf eine Energie von 5 MeV. An dieser Stelle bewegen sich die Elektronen bereits mit annähernd Lichtgeschwindigkeit.

Elektromagnete:

Die Elektromagnete werden in der Grafik durch die dunkel-blauen Körper dargestellt.

In MESA sind in etwa 60 Dipolmagnete und über 100 Quadrupolmagnete verbaut. Die Dipolmagnete dienen dabei als Ablenkmagnete. Sie halten den Strahl auf seiner vorbestimmten Bahn in der Strahlführung. Die Quadrupolmagnete funktionieren im Prinzip wie Linsen, nur für den Teilchenstrahl. Durch sie wird der Strahl auf eine ausreichend kleine Fläche fokussiert gehalten, um Strahlverluste zu vermeiden.

Beschleunigermodule:

MESA enthält zwei Beschleunigermodule, die auch Kryomodule genannt werden. Es handelt sich hierbei um 2 m lange isolierte Körper, in denen supraleitende Hohlraumresonatoren verbaut sind. Diese beschleunigen die Elektronen mit Hilfe eines elektrischen Wechselfelds in einem speziell geformten Hohlraum. In diesem Hohlraum wird durch eine hin- und her reflektierte elektromagnetische Welle eine stehende Welle ausgebildet (Resonanz erwünscht). Je nachdem, wann die Teilchenpakete in das Kryomodul eintreten, können sie sowohl beschleunigt als auch gebremst werden. Dieser Eigenschaft verdankt MESA seine energieeffiziente Betriebsart. Durch den Bremsvorgang kann zuvor eingesetzte Energie wiedergewonnen werden.

2. Grundlagen

Der Aufbau von MESA leitet den Teilchenstrahl drei Mal durch beide Module (Rezirkulation). Die Elektronen gewinnen jeweils 25 MeV an einem Modul, sodass sie nach drei Zirkulationen eine Energie von 155 MeV besitzen.

Kühlkreislauf:

An den Resonatoren liegen Spannungen von mehr als 12,5 Millionen Volt pro Meter an. Diese können nur dann aufrecht erhalten werden, wenn die Resonatoren supraleitend sind. Dadurch kann elektrischer Wechselstrom fast ohne Energieverlust fließen. Deshalb müssen die Resonatoren kontinuierlich gekühlt werden. Zur Kühlung wird Helium verwendet. Dieses kühlt die Resonatoren auf 2 K ($-271,3^{\circ}\text{C}$) ab. [3]

2.2. Äquivalenzdosis

Der Begriff der Äquivalenzdosis wird im Strahlenschutz verwendet. Er drückt die Energiedosis ionisierender Strahlung unter Berücksichtigung der relativen biologischen Wirksamkeit aus. Somit setzt sich die Äquivalenzdosis H wie folgt zusammen:

$$H = \omega \cdot D$$

Abhängig von der Strahlungsart wird jeder Energiedosis D ein Wichtungsfaktor ω zugeteilt, der sich nach der Art der Strahlung und ihrem Potential, biologische Schäden zu verursachen, richtet. Dieser reicht von 1 (Photon) bis 20 (Alpha-Teilchen). Neutronen bekommen abhängig von ihrer kinetischen Energie einen Wert von 5 bis 20 zugewiesen. Auf diesem Weg können die Energiedosen verschiedener Strahlungsarten direkt miteinander verglichen und bewertet werden. H wird dabei in der Einheit Sv (Sievert) und D in der Einheit J/kg angegeben. ω ist einheitslos [4].

2.3. Bremsstrahlung

Bremsstrahlung bezeichnet die Photonen, die durch die Wechselwirkung geladener Teilchen mit dem Coulombfeld von Atomkernen entstehen. Das Spektrum beziehungsweise die Energieverteilung der Photonen ist kontinuierlich. Ihre maximale Energie ergibt sich aus der maximalen Energie der Elektronen. Diese können nur so viel Energie verlieren, wie sie auch besitzen.

2. Grundlagen

Die Erzeugung von Bremsstrahlung bildet die Grundlage für die Entstehung von Teilchenschauern. Die erzeugten Photonen können ab einer Energie von 1,022 MeV, welche der Ruhemasse eines Elektron-Positron-Paares entspricht, Paarbildung erzeugen. Abhängig von der Energie des paarbildenden Photons können das entstandene Elektron und das Positron im weiteren Durchgang der Materie wiederum Energie durch Emission von Bremsstrahlung verlieren. Da der Beschleuniger MESA mit Energien von 155 MeV betrieben wird, kann von der Wiederholung dieses Prozesses ausgegangen werden. Das entstehende Bild wird als Teilchenschauer bezeichnet. In der folgenden Abbildung ist eine Aufnahme eines solchen Schauers zu sehen:

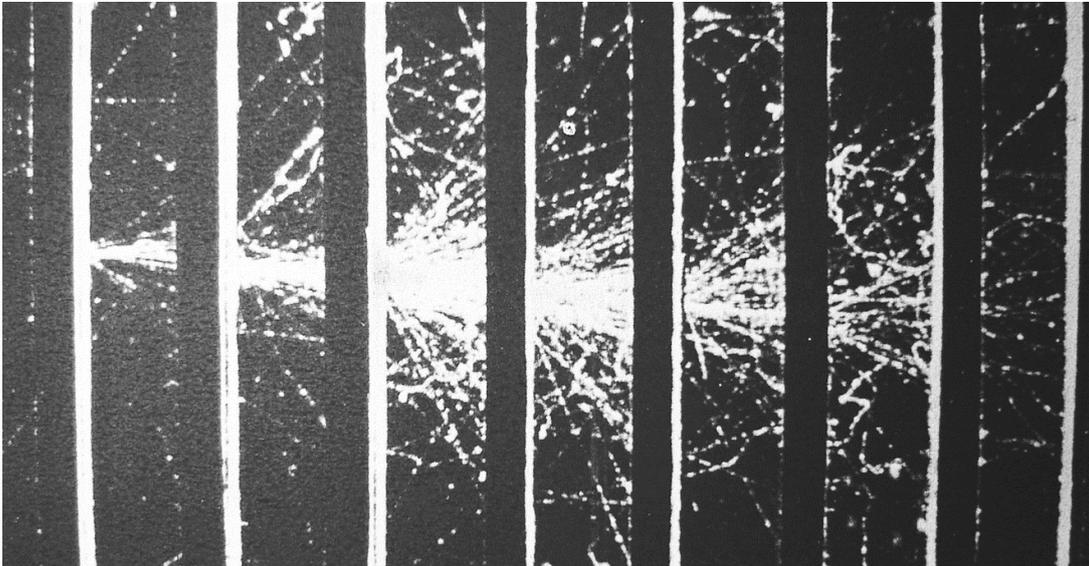


Abbildung 2.2.: Elektromagnetischer Schauer [5]

In der Grafik baut sich der elektromagnetische Schauer von links kommend auf und erreicht nach einer gewissen Tiefe ein Maximum an geladenen Teilchen. Neben dem Schauermaximum ist auch die Ortsdosisleistung maximal, da es, unabhängig von der Energie der Teilchen, nur auf deren Anzahl ankommt. Nach dem Schauermaximum reicht die mittlere Energie der Photonen nicht mehr zur Erzeugung von Elektron-Positron-Paaren aus. Dementsprechend verringert sich die Anzahl der Teilchenspuren nach dieser Tiefe, da die geladenen Teilchen schnell abgebremst werden. Die Photonen hingegen werden in der Abbildung nicht gezeigt. Sie transportieren Energien von bis zu einigen MeV durch die Abschirmung und verursachen über die Photon-Elektron-Wechselwirkungen auch außerhalb dieser geladene Teilchen. Diese definieren dort die Ortsdosisleistung.

2. Grundlagen

Dadurch stellt die Abschirmung hochenergetischer Photonen neben Neutronen den Strahlenschutz vor eine große Herausforderung.

Um herauszufinden, welche Ausmaße Abschirmungen besitzen müssen, damit sie auch Photonen absorbieren, sind Kenntnisse zu den möglichen Prozessen von Photonen mit Materie erforderlich. Die drei dominanten Prozesse für die Dämpfung der Ortsdosisleistung, die von den Photonen ausgeht, sind der Photoeffekt, der Compton-Effekt und die Paarbildung. In der folgenden Grafik soll gezeigt werden, in welchen Energiebereichen welche Prozesse stattfinden:

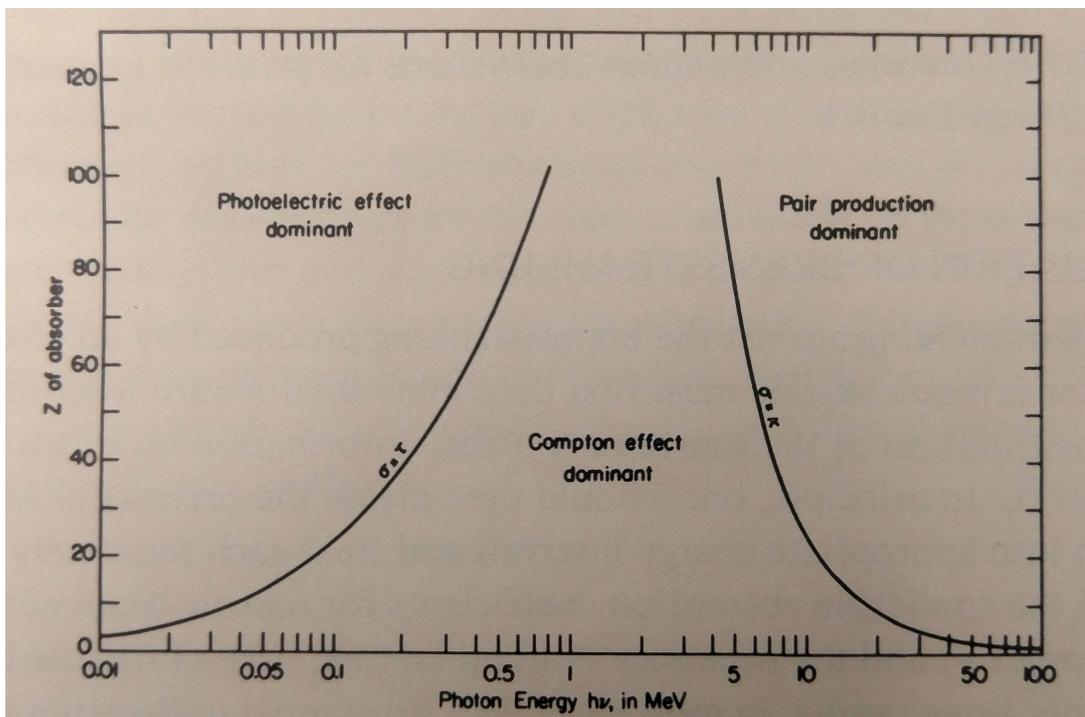


Abbildung 2.3.: Diagramm, das das relative Vorkommen der drei Photonen-Wechselwirkungen zeigt. [6]

Die Verteilung der Prozesse ist klar zu erkennen. Die Paarbildung dominiert den höher gelegenen Energiebereich. Sie ermöglicht die Schauerbildung. Nachdem die Energie der Photonen im Schauer nicht mehr groß genug für weitere Paarbildungsprozesse ist, folgt der Bereich, der von dem Compton-Effekt dominiert ist. Der Photoeffekt überwiegt erst bei sehr kleinen Photonenergien.

Ein Maß für die Dämpfung der Ortsdosisleistung durch eine Abschirmung stellt der Massenschwächungskoeffizient dar. Dieser ist der Quotient aus dem Absorptionskoeffizient und der Dichte des jeweiligen Materials (in diesem Fall Wasser). Er drückt aus, wie stark die elektromagnetische Strahlung, abhängig

2. Grundlagen

von ihrer Photonenenergie beim Passieren eines Materials, gedämpft wird. Die Abnahme der Ortsdosisleistung wird durch die folgende Formel beschrieben:

$$I = I_0 \cdot e^{-\frac{\mu}{\rho} \cdot \rho \cdot d}$$

Dabei ist $\frac{\mu}{\rho}$ der Massenschwächungskoeffizient und d die Eindringtiefe in das Material. ρ bezeichnet die Dichte des Materials. In der folgenden Grafik wird der Massenschwächungskoeffizient gegen die Photonenenergie aufgetragen. Die resultierenden Linien geben Auskunft zu der Stärke der Dämpfung für die jeweiligen Prozesse der Photonen.

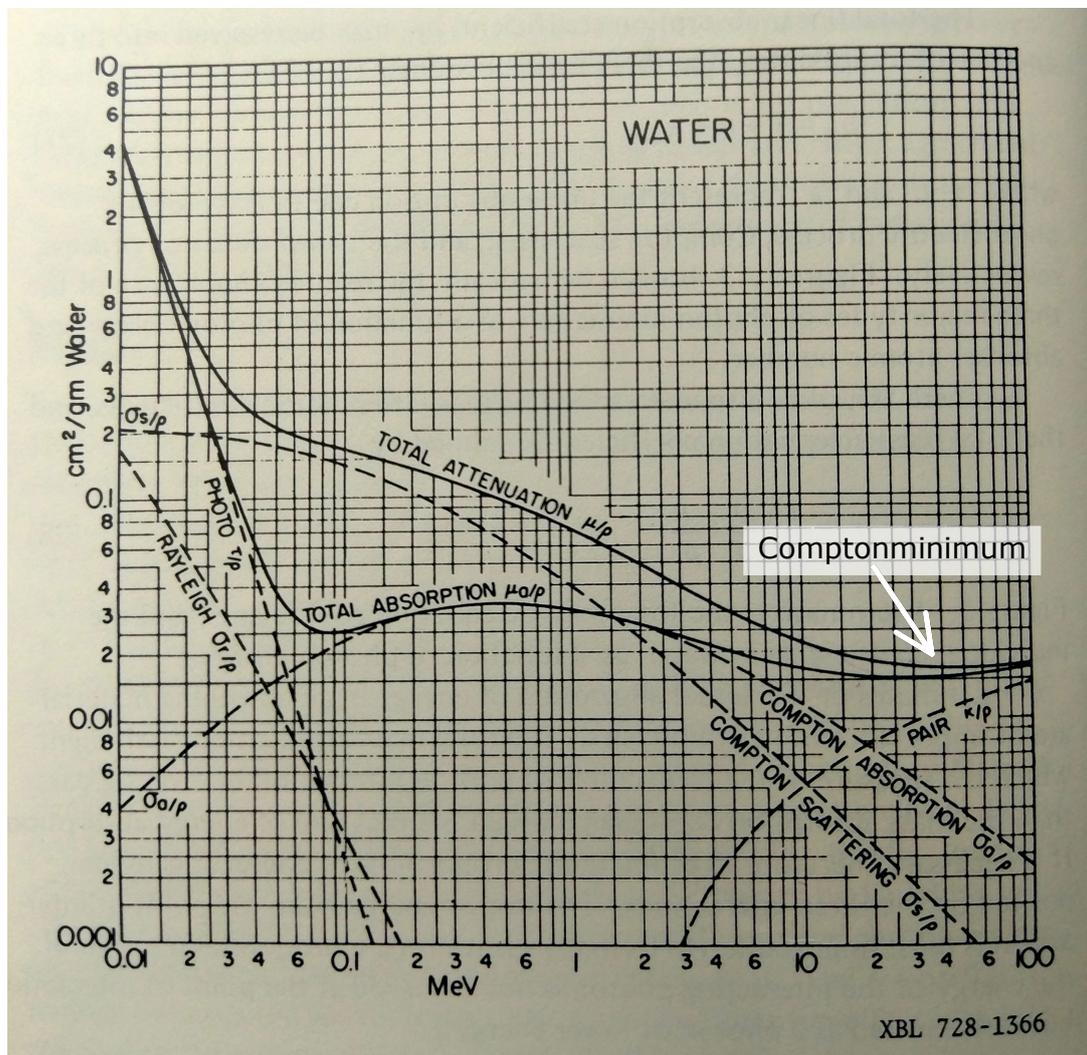


Abbildung 2.4.: Der Massenschwächungskoeffizient für Photonen in Wasser [6]

Der vorherrschende Prozess, der bei Energien von bis zu einigen MeV die

2. Grundlagen

Photonen-Energie dämpft, ist der Compton-Prozess. Der höher energetische Anteil der Photonen wird in Paarbildung umgesetzt und ist auf der Grafik nicht vollständig dargestellt. Der Massenschwächungskoeffizient steigt allerdings im weiteren Verlauf wieder an. Dies ist ebenfalls an der Linie "Pair" erkennbar. Infolgedessen kann das sogenannte Comptonminimum bestimmt werden. Bei der Betrachtung der gesamten Abschwächung ("total attenuation") ist am rechten Rand der Grafik ein Minimum vorhanden. An dieser Stelle beträgt der Massenschwächungskoeffizient $0,02 \frac{\text{cm}^2}{\text{g}}$. Dies bedeutet, dass bei einer Abschirmung von $50 \frac{\text{g}}{\text{cm}^2}$ die Ortsdosisleistung der Photonen um den Faktor $1/e$ gesenkt wird. Da der Comptonprozess nur an Elektronen stattfindet, ergibt sich für den Massenschwächungskoeffizienten eine Abhängigkeit von Kernladung Z durch Kernmasse A . Dieser Wert variiert nicht stark für alle Materialien abgesehen von Wasserstoff. Somit stellt $50 \frac{\text{g}}{\text{cm}^2}$ eine Faustregel für die Abschwächung von Photonen im Comptonminimum und damit für die Abschwächung eines Schauers dar [6, 7, 8].

2.4. Neutronenproduktion

Ein weitaus größeres Problem ist die Produktion von Neutronen. Diese haben ein anderes Abbremsverhalten beim Durchgang durch Materie. Neutronen verlieren Teile ihrer Energie nur durch Stöße mit den Atomkernen, bis sie schließlich von einem solchen eingefangen werden. Dadurch haben Neutronen eine relativ lange Lebensdauer und können somit auch viel längere Wege bis zu ihrem Zerfall zurücklegen [6].

Die folgende Grafik führt die Wahrscheinlichkeit der Neutronenproduktion in Abhängigkeit der Photonenenergie auf. Es werden drei verschiedene Linien zu sehen sein, die für die unterschiedlichen Prozesse der Neutronenproduktion stehen. In dieser Arbeit werden allerdings nur zwei davon näher behandelt. Die dritte Neutronenquelle spielt keine Rolle, da die nötige Energie für den dahinter stehenden Prozess nicht vorhanden ist. Nach der Grafik werden die zwei relevanten Prozesse näher erörtert.

2. Grundlagen

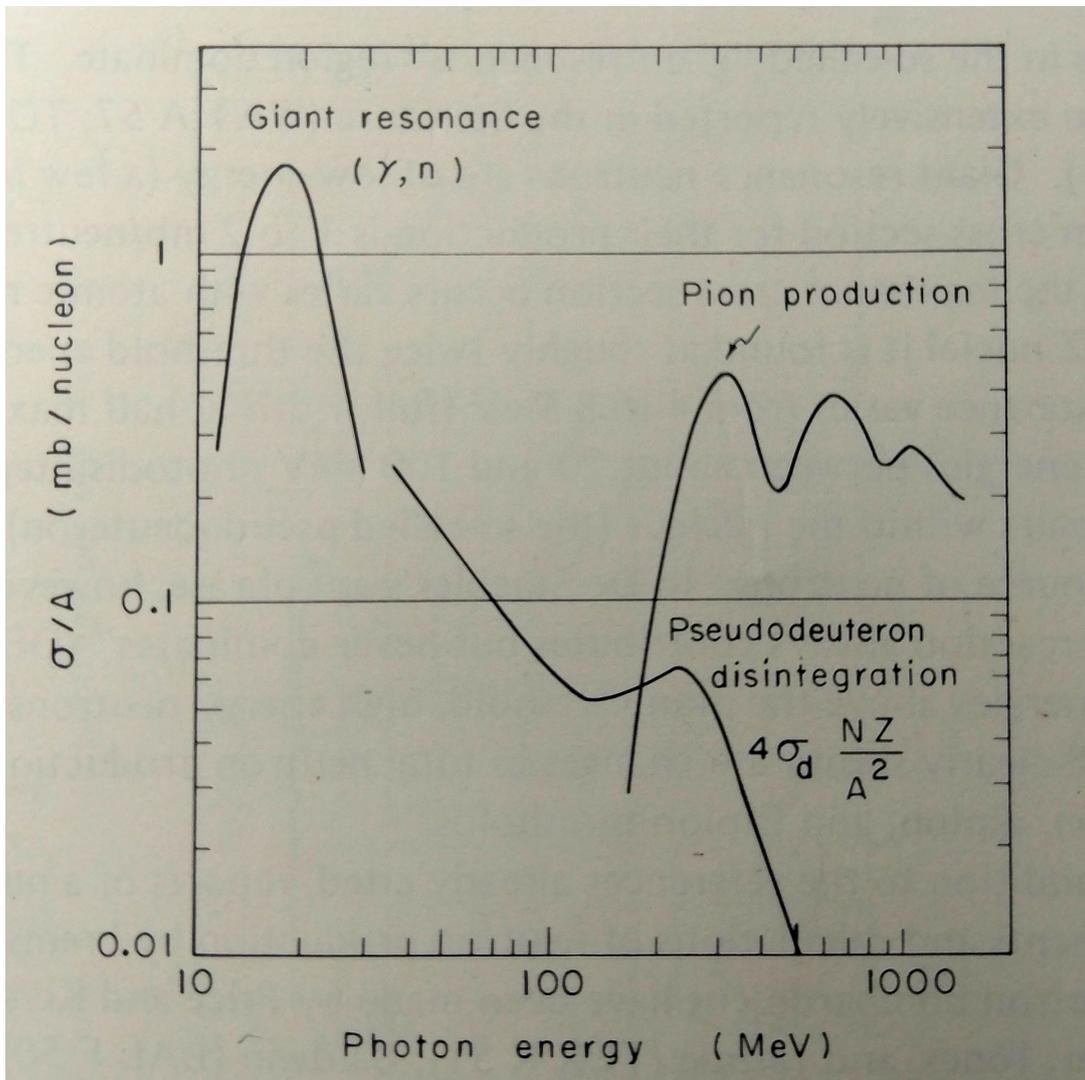


Abbildung 2.5.: Der gesamte Wirkungsquerschnitt pro Nukleon für die Neutronenproduktion als Funktion der Photonenenergie. [6]

2.4.1. Kernphotoeffekt

Beim Kernphotoeffekt löst ein Photon eine Kernreaktion aus, bei der aus dem Kern ein oder mehrere Bestandteile herausgeschlagen werden. Dafür muss die Energie des Photons mindestens der Bindungsenergie des am schwächsten gebundenen Neutrons entsprechen. Die kleinste Energie, bei der dieser Effekt auftreten kann, liegt bei 2,18 MeV. Mit dieser Energie können Neutronen aus Deuterium herausgeschlagen werden [9, 10].

2. Grundlagen

2.4.2. Riesenresonanz

Eine weitere Möglichkeit der Neutronenentstehung ist die Riesenresonanz. Hierunter ist eine Schwingungs-Anregung von Atomkernen durch Photonen zu verstehen, die in einer Nukleonen-/Kernemission endet. Dieser Prozess wird bei Photonenenergien von 10 bis 30 MeV beobachtet. Im Vergleich zum Kernphotoeffekt ist die Wahrscheinlichkeit der Neutronenproduktion durch diesen Prozess um einen Faktor 10 höher [11].

2.5. Bildung und Zerfall von Radionukliden

Zunächst wird die Bildung von Radionukliden thematisiert. Hierfür ist die Anzahl der pro Zeit- und Volumeneinheit im Aktivierungsmaterial stattfindenden Einfangreaktionen zu bestimmen. Die Anzahl der Aktivierungen pro Sekunde wird auch Aktivierungsrate R genannt und berechnet sich wie folgt:

$$R = N \cdot \sigma \cdot \Phi$$

Hierbei ist N die Anzahl der Atomkerne pro cm^3 im Aktivierungsmaterial, σ der Wirkungsquerschnitt und Φ die herrschende Neutronenflussdichte. Der Wirkungsquerschnitt ist ein Maß für die Wahrscheinlichkeit der zur Aktivierung führenden Kernreaktion des Neutroneneinfangs. Die Neutronenflussdichte beschreibt, wie viele Neutronen pro Zeiteinheit durch eine Flächeneinheit am Aktivierungsort treten.

Um die Anzahl der nach einer bestimmten Bestrahlungszeit t_b vorhandenen radioaktiver Kerne zu berechnen, muss neben der Aktivierungsrate auch der Zerfall der radioaktiven Isotope beachtet werden, da dieser gleichzeitig mit deren Bildung einsetzt. Deswegen wird zunächst der reine Zerfall von einem bereits aktivierten Nuklid betrachtet. Danach werden die Bildung und der Zerfall von Radionukliden miteinander in Verbindung gebracht.

Die Aktivität A , auch Zerfallsrate genannt, bezeichnet die Anzahl der pro Zeiteinheit stattfindenden Zerfälle einer radioaktiven Stoffmenge. Sie wird in der Einheit Becquerel (Bq) angegeben. Ein Becquerel entspricht dabei einem Zerfall pro Sekunde.

$$A = -\frac{dK}{dt} = \lambda \cdot K$$

In der Differentialgleichung (DGL) des radioaktiven Zerfalls stellt K die An-

2. Grundlagen

zahl der bereits vorhandenen radioaktiven Kerne N_0 und λ ist die Zerfallskonstante. Diese lässt sich über ihre Beziehung mit der Halbwertszeit $T_{1/2}$ wie folgt berechnen:

$$\lambda = \frac{\ln(2)}{T_{1/2}}$$

Mit Hilfe der Methode der Trennung der Variablen ergibt sich die folgende Lösung für die Differentialgleichung:

$$K(t) = K_0 \cdot e^{-\lambda t}$$

K_0 ist hierbei die Anzahl der radioaktiven Kerne zu Beginn der Abklingzeit $t_a = 0$ der Aktivität. Diese beginnt mit dem Ende des Strahlbetriebs am Beschleuniger.

Um den korrekten Zeitverlauf der Aktivität ermitteln zu können, wird die Differentialgleichung um ein Glied erweitert:

$$\frac{dK}{dt} = -\lambda \cdot K + N \cdot \sigma \cdot \Phi$$

Hierbei lässt sich $N \cdot \sigma$ zum makroskopischen Wirkungsquerschnitt Σ zusammenfassen. Die Anfangsbedingung dieser DGL lautet $K(t = 0) = 0$. Folglich sind zu Beginn der Strahlungszeit keine radioaktiven Kerne vorhanden. Die Lösung sieht somit wie folgt aus:

$$K(t) = \frac{\Sigma \cdot \Phi}{\lambda} [1 - e^{-\lambda t}]$$

Gemäß der Gleichung für die Aktivität des reinen Zerfalls kann diese Gleichung für die Aktivität wie folgt umgeformt werden:

$$A(t) = \Sigma \cdot \Phi [1 - e^{-\lambda t}]$$

Der Ausdruck in der eckigen Klammer strebt für steigende Strahlungszeiten gegen 1, weshalb eine maximale Aktivität existiert. Diese wird als Sättigungsaktivität A_s bezeichnet.

$$A(t \rightarrow \infty) = A_s = \Sigma \cdot \Phi$$

An dieser Stelle werden pro Zeiteinheit genauso viele radioaktive Kerne gebildet wie auch wieder zerfallen. Nach einer Bestrahlungszeit von fünf Halbwerts-

2. Grundlagen

zeiten eines Isotops ist bereits 97% der Sättigungsaktivität erreicht.

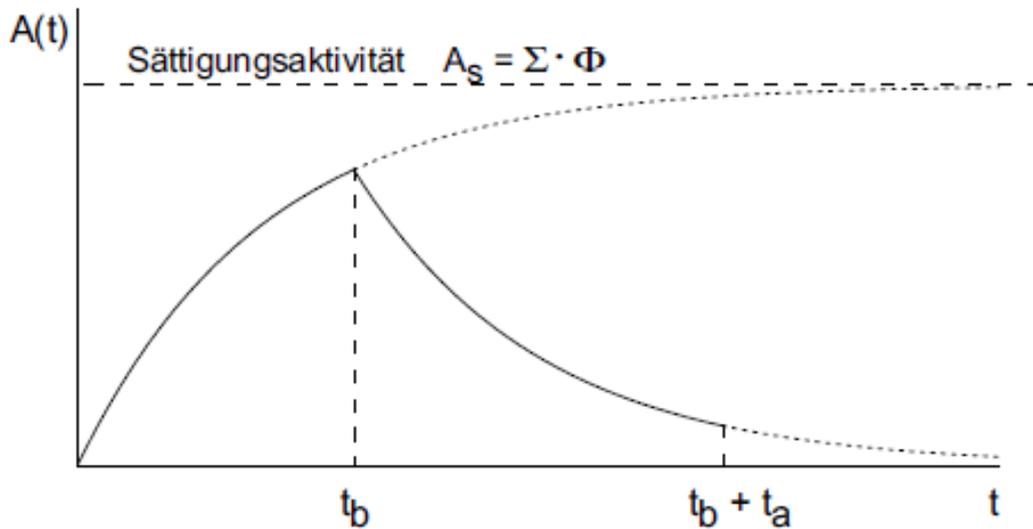


Abbildung 2.6.: Beispiel für den zeitlichen Verlauf der Aktivierung und des Zerfalls eines Radionuklids [12]

In der Grafik entspricht t_b der Bestrahlungszeit und t_a der Abklingzeit nach Ende der Aktivierung [12].

2.6. Magnetfeld eines Solenoiden

In diesem Abschnitt wird kurz auf das Magnetfeld eines Solenoiden eingegangen.

Ein Solenoid bezeichnet eine Zylinderspule, bei der die Drahtwicklung auf einem Zylindermantel liegt. Solenoiden werden verwendet, wenn ein räumlich möglichst konstantes Magnetfeld erzeugt werden soll. Die folgende Grafik zeigt das Magnetfeld einer idealen Zylinderspule. Diese zeichnet sich dadurch aus, dass der Abstand der Drahtwindungen im Verhältnis zum Durchmesser sehr klein ist und sie somit eine hohe Anzahl von Windungen besitzt.

2. Grundlagen

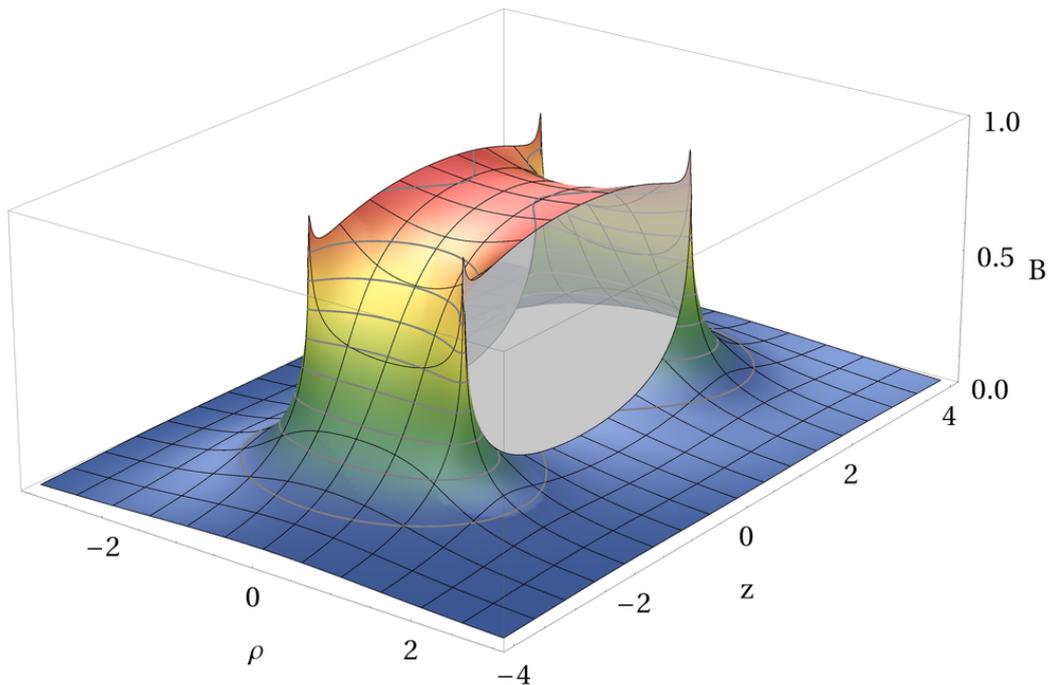


Abbildung 2.7.: 3D-Grafik der absoluten Magnetfeldstärke eines Solenoiden mit einem Verhältnis Länge zu Radius $L/R = 4$ [13].

2.7. Funktionsweise von FLUKA

Für die Simulationen wird das Programm FLUKA verwendet. Dieses wurde zwischen 1962 und 1965 in CERN entwickelt und seitdem fortwährend weiterentwickelt. Es ist für strahlenschutztechnische Probleme optimiert.

FLUKA basiert auf dem Prinzip der Monte-Carlo-Simulationen. Es simuliert schrittweise die Schauerbilder von primären Strahlteilchen bei ihren Wechselwirkungen mit Materie. Dem Programm liegt eine Datenbank zugrunde, die jedem möglichen Ereignis, an dem das Primär- oder Schauerteilchen teilnehmen kann, ein Wahrscheinlichkeitsintervall zuweist. Jedes Teilchen bekommt eine Zufallszahl zugeordnet. Liegt diese in dem Wahrscheinlichkeitsintervall des Ereignisses, tritt das Ereignis ein. Dieser Vorgang wiederholt sich bis eine energetische Untergrenze oder das Ende des zu simulierenden Raumes erreicht wird. Für jeden Durchlauf der Simulation entsteht ein neues Schauerbild. FLUKA summiert schließlich alle Ergebnisse auf, sodass die Betrachtung eines Teilchenstrahls möglich wird. Je mehr Simulationen gemacht werden, desto genauer und besser wird die daraus resultierende Statistik für den Teilchenstrahl. [14]

2. Grundlagen

Das Programm ist an dem Institut der Kernphysik in Mainz bekannt und wurde hinsichtlich der Richtigkeit seiner Ergebnisse an mehreren Experimenten positiv getestet. Es existiert eine Arbeit zu der Einführung von FLUKA in Mainz von Steffen Heidrich [15].

3. Simulation

Bei der Erstellung der Simulation des P2-Experiments müssen mehrere Schritte in FLUKA durchgeführt werden. Zunächst muss die Geometrie der Umgebung und des Experiments so genau wie möglich in FLUKA programmiert werden. Da jedes Bauteil aus unterschiedlichen Materialien besteht, müssen diese ihren Gebieten zugewiesen werden. Zusätzlich enthält das Experiment ein Magnetfeld, das es zu erstellen gilt. Außerdem müssen die Starteinstellungen besprochen werden.

3.1. Geometrie

Zunächst folgt eine Erklärung zur Erstellung der Geometrie in FLUKA. Die Formen und Strukturen der Hallen und des Experiments werden mit einem Baukastensystem erstellt. Es stehen verschiedene geometrische Formen (z.B. Rechteck, Kugel, Zylinder, Trichter,..) auf der Arbeitsoberfläche von FLUKA zur Verfügung. Aus diesen Formen werden Gebiete definiert, indem die einzelnen Formen entweder voneinander abgezogen oder addiert werden oder deren Schnittmenge gebildet wird. Zusätzlich besteht die Möglichkeit, Transformationen (Translation und Rotation) für einzelne Formen zu definieren. Auf diese Art und Weise können alle möglichen Formen konstruiert werden.

Die Informationen zur Geometrie der Umgebung und des P2-Experiments selbst werden in Form von Bauplänen und einem 3D-Modell des Experiments (Autodesk Inventor) entnommen. Es werden die Experimentierhallen 1, 2 und 3, sowie die Verladehallen Nord und Ost als Umgebung modelliert. Da die Experimentierhallen 2 und 3 und die Verladehalle Ost bereits existieren, kann deren tatsächliche Geometrie mit den dazugehörigen Bauplänen abgeglichen werden. Die Experimentierhalle 1 und die Verladehalle Nord werden erst in den folgenden Jahren gebaut, weshalb sich zurzeit nur an den Plänen orientiert werden kann.

In der folgenden Grafik wird die Geometrie der 1. Simulation gezeigt. Diese

3. Simulation

dient als erster Anhaltspunkt für den weiteren Verlauf der Arbeit und beinhaltet den grundlegenden Aufbau der Simulation. In den danach folgenden Simulationen wird die Geometrie des Aufbaus jeweils geändert. Diese Änderungen werden später in Verbindung mit der jeweiligen Simulation erläutert.

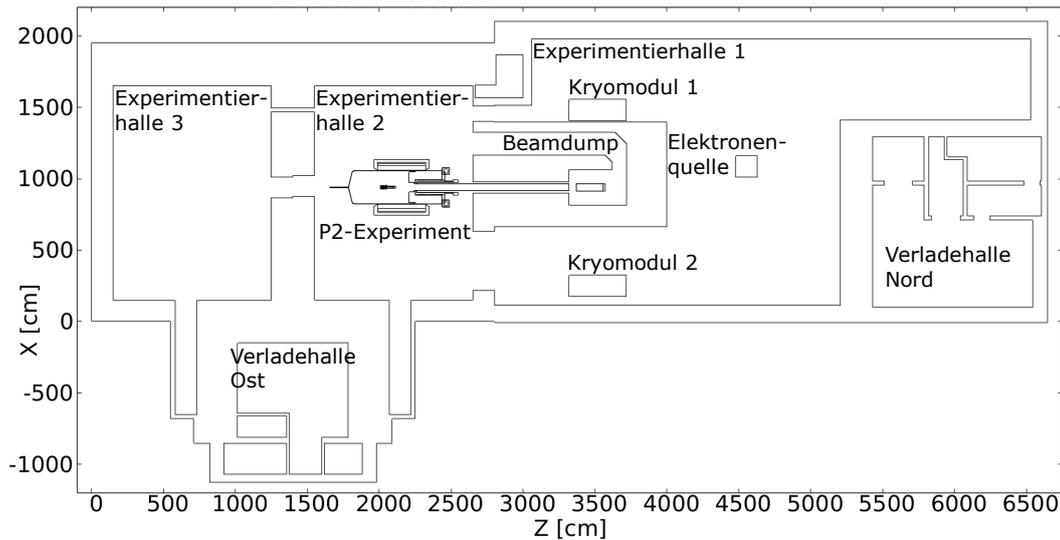


Abbildung 3.1.: Die Geometrie der Experimentier- und Verladehallen und die Positionen der zwei Kryomodule und der Elektronenquelle

Die Grafik stellt die in FLUKA erstellte Geometrie auf der Strahlhöhe dar. Diese befindet sich 2,2 m über dem Hallenboden und 7,3 m unter der Erde. Die Zugänge der Verladehallen in die Experimentierhallen sind in dieser Simulation nicht vorhanden, da diese bei Betrieb des Beschleunigers ohnehin geschlossen wären.

Die Kryomodule befinden sich auf der Grafik über und unter dem Beamdump. Die Unterkante der Kryomodule liegt im Vergleich zur Strahlführung 40 cm höher. An dieser Stelle der Halle befindet sie sich 1,4 m über dem Boden. Die Kryomodule sind 2 m lang und haben einen Radius von 40 cm.

Die Elektronenquelle befindet sich rechts neben dem Beamdump. Ursprünglich sollte diese 4,9 m über dem Hallenboden installiert werden. Allerdings liegt die Quelle aufgrund von Änderungen an ihrem Aufbau ungefähr 50 cm tiefer.

Es folgen weitere Informationen zu den einzelnen Bauabschnitten. Dies ist notwendig, weil viele Durchbrüche, die der Strahlführung von MESA dienen, zwischen den Hallen nicht in der Grafik zu sehen sind. Außerdem soll auf wichtige Punkte im Aufbau der Simulation hingewiesen werden.

3. Simulation

Experimentierhalle 1:

Die Experimentierhalle 1 ist Teil der Erweiterung, die für MESA gebaut wird. In ihr werden später die Elektronenquelle für den Beschleuniger und die zwei Kryomodule stehen, die für die Beschleunigung der Elektronen zuständig sind. Diese sind gegenüber Strahlung eher empfindlich und sollen dementsprechend möglichst geringer Belastung ausgesetzt werden. Die Positionen der Kryomodule und der Elektronenquelle werden als Kästen in der Grafik angezeigt.

Die Halle 1 ist zweigeteilt. Der Abschnitt über dem Beamdump und der Abschnitt unter dem Beamdump und bis zu Verladehalle Nord befinden sich 1,2 m über dem restlichen Teil der Halle.

Experimentierhalle 2:

Aus der Grafik ergibt sich, dass das P2-Experiment in Experimentierhalle 2 steht. Der Aufbau des Experiments wird später betrachtet. Die Halle besitzt Durchbrüche in die Verladehalle Ost sowie in die Experimentierhallen 1 und 3. Nicht alle Durchbrüche sind auf der Grafik zu sehen, da sie nicht in dem gewählten Schnitt der Grafik liegen. Außerdem führt von Halle 2 ein Treppenhaus an die Erdoberfläche. Hier muss später geprüft werden, ob Strahlung durch das Treppenhaus an die Oberfläche gelangt.

Experimentierhalle 3:

In der Experimentierhalle 3 wird das zweite Experiment von MESA, namens MAGIX, stehen. Da MAGIX und das P2-Experiment nicht parallel durchgeführt werden können, wird sich diese Arbeit nicht mit MAGIX beschäftigen. Die Experimentierhalle 3 ist sowohl mit Experimentierhalle 2 als auch mit der Verladehalle Ost über mehrere Durchbrüche verbunden. Diese Durchbrüche dienen der Strahlführung des Beschleunigers und der Lüftungsanlagen.

Verladehalle Ost:

Die Verladehalle Ost hat Durchbrüche zu den Hallen 2 und 3. In ihr befindet sich der Zugang zu einem Lastenaufzug und einem Raum, der zu einem Treppenhaus führt. In diesem Gebäudeteil stellt sich die Frage, ob überhaupt Strahlung nachzuweisen ist. Für diesen Fall wäre das Ausmaß der Strahlung zu untersuchen.

Verladehalle Nord:

Die Verladehalle Nord beinhaltet den Zugang zu einem Lastenaufzug und dem Treppenhaus. Es stellt sich dieselbe Frage wie in der Verladehalle Ost.

Beamdump:

Der Beamdump, auch Strahlfänger genannt, ist über Experimentierhalle 2 begehbar. Allerdings ist er aufgrund hoher Reststrahlung vorheriger Experimente

3. Simulation

strahlenschutzrechtlicher Sperrbereich. Im Strahlfänger wird der Teilchenstrahl vernichtet. Er spielt somit eine zentrale Rolle in der Planung der weiteren Abschirmungen rund um das P2-Experiment. Die Konzipierung der zusätzlichen Abschirmung des Strahlfängers wird Teil dieser Arbeit sein.

Die folgende Grafik zeigt den Aufbau des Strahlfängers in der zurzeit existierenden Form. Alle in dieser Arbeit folgenden Veränderungen der Abschirmungen um den Strahlfänger werden an gegebener Stelle präsentiert.

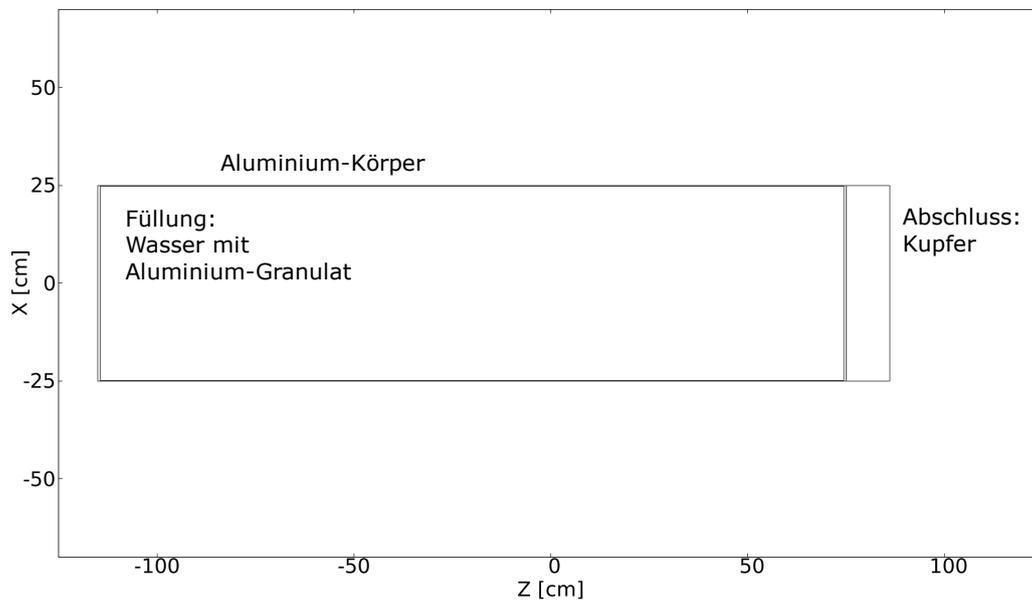


Abbildung 3.2.: Geometrie und Beschaffenheit des Strahlfängers

Der Strahlfänger ist zweigeteilt. Er besteht aus einem 2 m langem Aluminiumzylinder, der mit Wasser und Aluminiumgranulat gefüllt ist. Das Aluminium wird verwendet, um die Aufaktivierung des Strahlfängers möglichst gering zu halten. Den Abschluss bildet ein einfacher Kupfer-Block. Die folgende Grafik ist ein Bild des Strahlfängers in der 5°-Halle:

3. Simulation

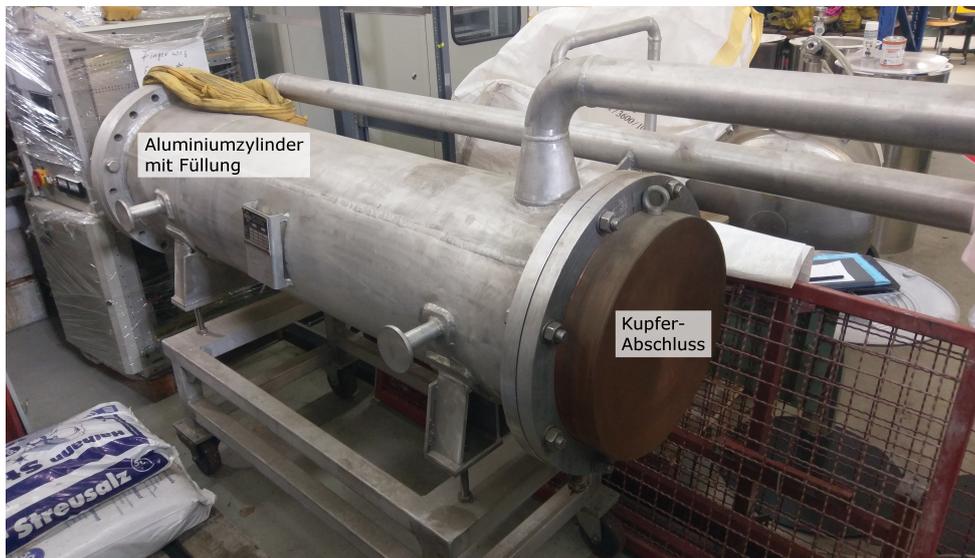


Abbildung 3.3.: Bild des Strahlfängers in der 5°-Halle

Im Folgenden wird der Aufbau des P2-Experiments beschrieben. Die Geometrie des P2-Experiments in FLUKA wird mit Hilfe eines 3D-Modells modelliert. Dieses wird in der folgenden Grafik dargestellt:

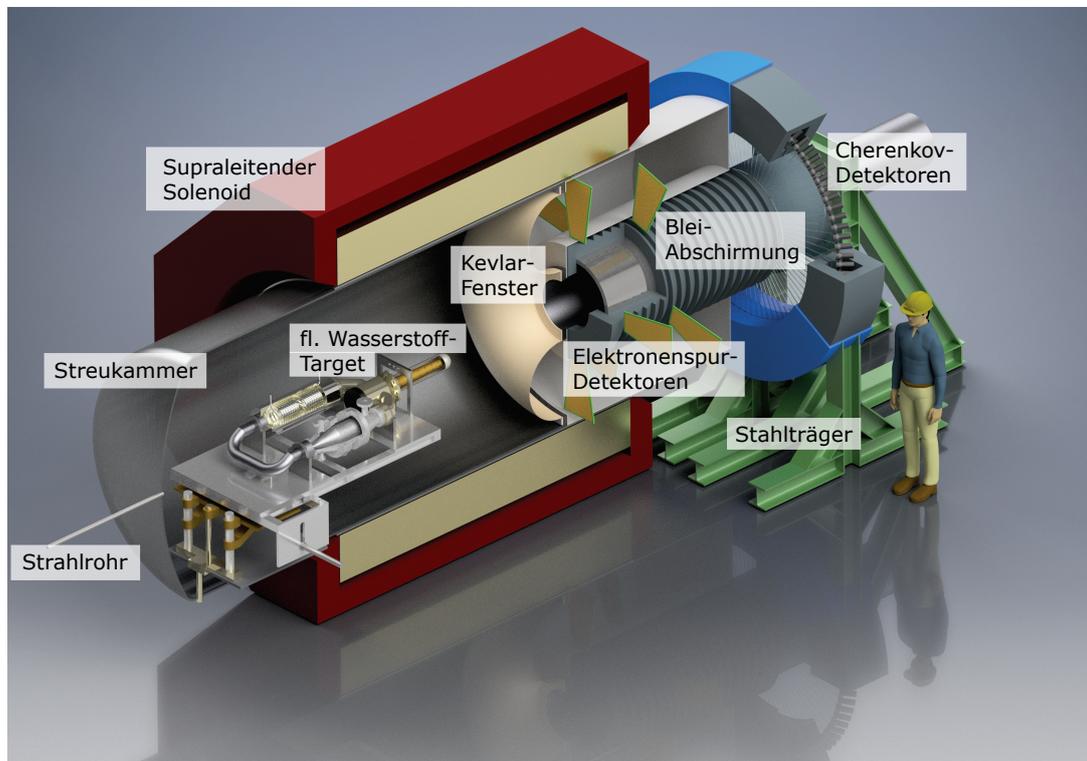


Abbildung 3.4.: Ausschnitt aus dem Programm Autodesk Inventor von dem 3D-Modell des P2-Experiments [16]

3. Simulation

Für den Aufbau des P2-Experiments in der Simulation folgt eine weitere Grafik:

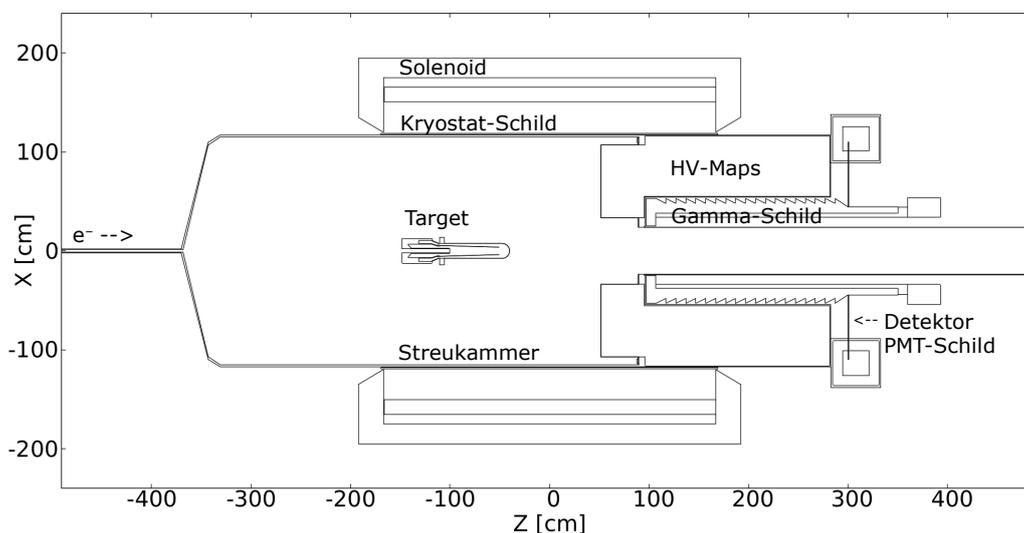


Abbildung 3.5.: Die Geometrie des P2-Experiments – Schnitt auf Strahlhöhe

In dieser Grafik ist ein Schnitt des Experiments von oben zu sehen. Der Elektronenstrahl tritt auf der linken Seite in das Experiment ein. Es folgt eine Erklärung zu den in der Grafik benannten Gebieten.

Streukammer:

Die Streukammer erstreckt sich mit dem Strahlrohr durch das gesamte Experiment. Ihre Wände sind 2 cm dick. Die Front der Streukammer ist ursprünglich gewölbt. Diese Form wird mit Hilfe von Kegeln nachgestellt. Der Radius der Außenseite beträgt 117,2 cm.

Solenoid:

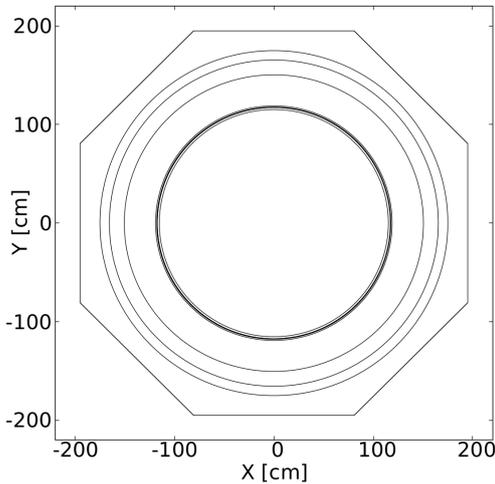
Der Solenoid besteht aus zwei Teilen, dem Joch und der Spule. Das Joch ist von außen achteckig und von innen zylindrisch ausgehöhlt (siehe Abb. 3.6). Der Ein- und Ausgang des Jochs wird nach innen hin kleiner. Innerhalb des Jochs liegt die 15 cm dicke Spule.

Kryostat-Schild:

Das Schild ist sehr dünn und deswegen nicht gut auf der Grafik zu erkennen. Es befindet sich um die Streukammer herum und ist 5 mm dick. Das Schild wird durch eine 1,2 cm dicke Schicht an Ort und Stelle gehalten. Der Kryostat selbst konnte aufgrund seiner Komplexität und mangels Informationen zu seinem Aufbau nicht in die Simulation eingebaut werden. Er würde sich eigentlich

3. Simulation

hinter dem Schild befinden.



Die tatsächlichen Formen von Solenoid, Streukammer und Kryostat-Schild sind in Abb. 3.5 nicht genau zu erkennen und werden mit der linken Abbildung noch einmal verdeutlicht. Die Grafik stellt dabei einen Schnitt bei $Z=0$ dar. Fast alle Bauelemente in dem Aufbau des P2-Experiments sind zylinderförmig.

Abbildung 3.6.: Die Geometrie des P2-Experiments – Schnitt bei $Z=0$

HV-MAPS:

HV-MAPS bedeutet High Voltage Monolithic Active Pixel Sensors. Es handelt sich um eine Detektor Technologie. Die Detektoren dieser Technologie sind so dünn, dass sie in dieser Simulation unerheblich sind. Dementsprechend sind sie nicht modelliert. Ihre Umgebung muss jedoch modelliert werden. Über ein Fenster grenzt das Gebiet der HV-MAPS an die Streukammer. Dieses Fenster ist 1 mm dünn. Es hat eine runde Form (siehe Abb. 3.4). Diese kann mit FLUKA nicht modelliert werden, sodass diese Rundung in der Simulation durch ein Viereck mit demselben Volumen ersetzt wird. Das Fenster ist mit Schrauben an der Hülle der Streukammer befestigt. Die Wandstärke der HV-MAPS Umgebung beträgt 1 cm.

Gamma-Schild:

Das Gamma-Schild besteht aus drei Bauelementen, das zylinderförmige Schild selbst, die Aufhängung und das Gerüst, welches das gesamte Schild hält. Die Konstruktion befindet sich zum größten Teil innerhalb der HV-MAPS Umgebung. Das Schild besitzt eine optimierte Form und kann anhand seiner Zacken erkannt werden. Die Aufhängung greift von innen und verbindet das Schild mit dem Gerüst. Das Gerüst ist in dem gewählten Schnitt in Form von zwei Rechtecken dargestellt.

PMT-Schild:

Die Photomultiplier müssen gut vor Strahlung abgeschirmt sein. Deswegen be-

3. Simulation

finden sie sich in einem Ring hinter der HV-MAPS Umgebung. Dieser Ring soll für die Abschirmung sorgen und besteht aus zwei Teilen, der Abschirmung und dem Mantel, der diese zusammenhält.

Detektor:

Der Detektor muss mit den Photomultipliern verbunden sein. Durch eine Öffnung in der Abschirmung reicht er bis kurz vor das Gamma-Schild. Der Detektor ist 1 cm dünn.

Target:

Das Target besteht aus dem Körper und dem Targetmaterial, also seiner Füllung. Die folgende Graphik soll dessen Aufbau besser verständlich machen:

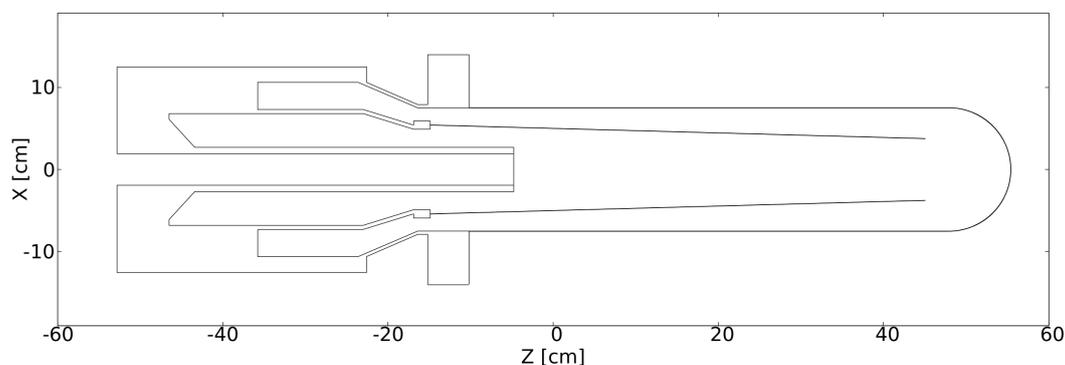


Abbildung 3.7.: Die Geometrie des Targets

Der Teilchenstrahl trifft von links mittig auf das Target. Die innere Form ist dem Kühlsystem und der damit verbundenen Pumpe geschuldet. Vom Auftreffpunkt bis zum Ende des Targets durchläuft der Strahl ungefähr 60 cm Targetmaterial. Das entspricht 6,7% der Strahlungslänge von Wasserstoff.

3. Simulation

3.2. Materialien

Jedem in der Geometrie definierten Gebiet muss noch ein Material zugewiesen werden. Diese werden in der folgenden Tabelle aufgeführt. Die Zusammensetzung wird in Massenanteilen angegeben.

Tabelle 3.1.: Alle in der Simulation verwendeten Materialien mit der Zuordnung zu den jeweiligen Gebieten

| Gebiet | Material | Zusammensetzung | Dichte [$\frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$] |
|------------------------------|-------------------------------|--|---|
| Gebäude und Umgebung: | | | |
| Wände | Beton | O(53,0%) Si(33,7%) Ca(4,4%) Al(3,3%) Na(1,6%) Fe(1,4%) K(1,3%) H(1,0%) Mg(0,2%) C(0,1%) Eu(0,01%) | 2,3 |
| Luft | Luft | N(75,5%) O(23,2%) Ar(1,2%) C(<0,1%) | 0,0012 |
| Erdboden | Sand | Si(47%) O(53%) | 2,32 |
| Strahlfänger: | | | |
| Körper | Aluminium-Legierung | Al(97%) Mg(3%) | 2,70 |
| Füllung | Wasser mit Aluminium-Granulat | Al(59,0%) H(36,4%) O(4,6%) | 2,00 |
| Abschluss | Kupfer | Cu(100%) | 8,96 |
| Solenoid: | | | |
| Joch | Eisen-Legierung | Fe(98,8%) Mn(0,6%) Si(0,4%) C(0,1%) P(0,05%) S(0,05%) | 7,87 |
| Spule | Niob-Titan-Legierung | Ni(50%) Ti(50%) | 6,54 |
| Kryostat-Schild: | | | |
| Schild | Blei-Legierung | Pb(96%) Sb(4%) | 11,16 |
| Schild Halter | rostfreier Stahl | Fe(74%) Cr(18%) Ni(8%) | 8,00 |

3. Simulation

Tabelle 3.1.: (Fortführung der Tabelle)

| Gebiet | Material | Zusammensetzung | Dichte [$\frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$] |
|-----------------------------|-----------------------------|--|---|
| Gamma- / PMT-Schild: | | | |
| Schild | Blei-Legierung | Pb(96%) Sb(4%) | 11,16 |
| Schild Halter | rostfreier Stahl | Fe(74%) Cr(18%) Ni(8%) | 8,00 |
| Gerüst | rostfreier Stahl | Fe(67,1%) Cr(18,5%) Ni(11,3%) Mn(2,0%) Si(1,0%) P(<0,1%) S(<0,1%) C(<0,1%) | 7,8 |
| Streukammer: | | | |
| Körper | Aluminium-Legierung | Al(97%) Mg(3%) | 2,70 |
| Fenster | Kevlar | C(50,0%) H(35,7%) O(7,15%) N(7,15%) | 1,44 |
| Schrauben | rostfreier Stahl | Fe(74%) Cr(18%) Ni(8%) | 8,00 |
| Target: | | | |
| Körper | Aluminium-Legierung | Al(97%) Mg(3%) | 2,70 |
| Target | fl. Wasserstoff | H(100%) | 0,07 |
| HV-Maps: | | | |
| Körper | Aluminium-Legierung | Al(97%) Mg(3%) | 2,70 |
| Gas | Helium | He(100%) | 0,0002 |
| Detektor: | | | |
| Detektor | Quarzglas (fused silica) | Si(47%) O(53%) | 2,32 |

In der Tabelle werden den verschiedenen Gebieten Überschriften zugeordnet, damit sie schneller gefunden werden können.

Viele der in Tabelle 3.1 aufgelisteten Materialien sind bereits vorgefertigt in der Datenbank von FLUKA und können somit für die Simulation genutzt werden. Dazu gehören zum Beispiel die Zusammensetzung von Beton, der Luft und dem rostfreien Stahl. Viele spezifische Verbindungen oder Legierungen liegen FLUKA allerdings nicht vor und müssen somit manuell erstellt werden. Bei einigen Legierungen ist ihre finale Zusammensetzung jedoch noch unbekannt. In

3. Simulation

diesem Fall werden mögliche Zusammensetzungen auf fachspezifischen Seiten im Internet recherchiert und in die Simulation aufgenommen. Die Dichte einzelner Materialien, die aufgrund mangelnder Informationen nicht bestimmt werden können, werden mit Hilfe der Dichten der betroffenen Elemente abgeschätzt.

Im Falle der Gerüste von Gamma- und PMT-Schild wird die Dichte, wie im Folgenden beschrieben, angepasst. Die einzelnen Träger des Gerüsts werden vereinfacht als rechteckige Blöcke dargestellt. Das Volumen des tatsächlichen Gerüsts beträgt allerdings nur 7,4%. Um dennoch die richtige Menge an Atomkernen für eine mögliche Aktivierung zu erhalten, wird die Dichte von ursprünglich $7,8 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$ auf $0,57 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$ herunter gesetzt.

3.3. Magnetfeld

Das P2-Experiment bedient sich dem Magnetfeld eines Solenoiden in Verbindung mit einer Bleiabschirmung und optimierter Geometrie, um mögliche unerwünschte Elektronen herauszufiltern. Da geladene Teilchen in Magnetfeldern abgelenkt werden, muss die Simulation das Feld beinhalten.

FLUKA besitzt die Möglichkeit, ein Magnetfeld direkt über die Benutzeroberfläche zu definieren. Allerdings gibt es bestimmte Einschränkungen. So können nur Felder, die in eine Richtung zeigen und zudem homogen sind, direkt eingebaut werden. Falls das nicht der Fall ist, wie vorliegend, kann FLUKA eine Routine zu dem Magnetfeld einbinden. Die besagte Routine bedarf der Feldkarte des gewünschten Magnetfeldes. Diese Feldkarte zu dem Solenoiden existiert zwar, jedoch beinhaltet sie nur die Hälfte des Magnetfeldes und ist zudem in Zylinderkoordinaten abgespeichert. Im Gegensatz dazu verwendet FLUKA das kartesische Koordinatensystem.

Die Routine formuliert den Prozess des Magnetfeld-Einlesens in FLUKA. Dafür wird zuerst das Magnetfeld aus der Feldkarte geladen. Anschließend werden die kartesischen in zylindrische Koordinaten umgewandelt. Diesen Koordinaten wird dann der Vektor und die Feldstärke des Magnetfeldes zugewiesen. Anschließend werden die zylindrischen Koordinaten mit der neu gewonnenen Information zurück in kartesische Koordinaten transformiert. FLUKA ist somit bekannt, an welcher Stelle das Magnetfeld in welche Richtung zeigt und wie stark es an diesem Punkt ist. Zudem wird die Routine bezüglich der notwendigen Spiegelung erweitert, sodass das komplette Feld in FLUKA eingelesen wird.

In der folgenden Grafik wird das Magnetfeld gezeigt. Mit Hilfe eines Python-

3. Simulation

Skripts kann kontrolliert werden, ob das Magnetfeld richtig in FLUKA übernommen wird.

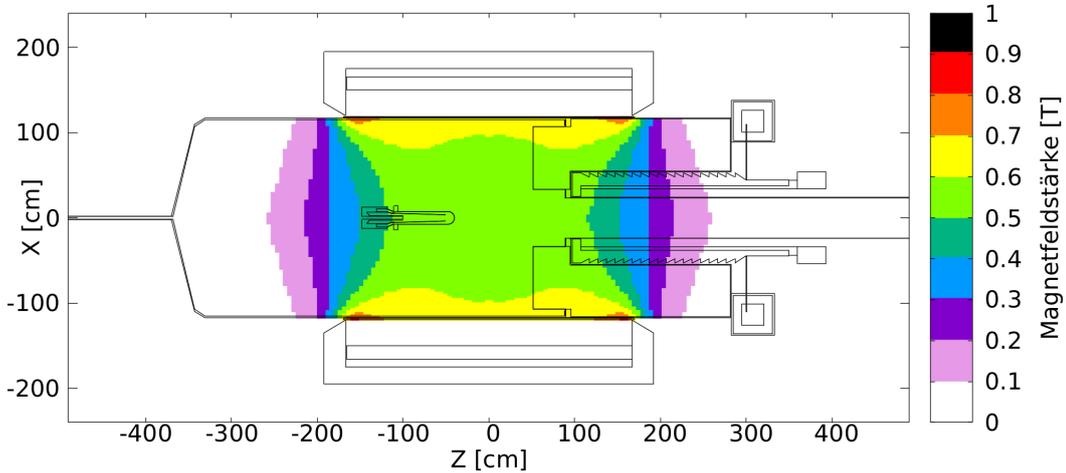


Abbildung 3.8.: Das Magnetfeld des Solenoiden in FLUKA - Schnitt durch Strahlhöhe (vgl. mit Abb. 2.7 möglich)

Der Verlauf der Vektorfeldlinien des Magnetfeldes ist in dieser Grafik nicht enthalten, da die Feldlinien bei der Größe der Grafik nicht zu erkennen sind. Im Anhang befindet sich zur Veranschaulichung eine weitere Grafik (A.1).

3.4. Starteinstellungen

Alle Elektronen haben nach dem Beschleunigungsvorgang eine Energie von 155 MeV. Der voraussichtliche Strahlstrom für das Experiment beträgt $150 \mu\text{A}$. Dies entspricht:

$$\frac{150 \cdot 10^{-6} \frac{\text{C}}{\text{s}}}{1,602 \cdot 10^{-19} \text{C}} \approx 9,375 \cdot 10^{14} \frac{1}{\text{s}}$$

Bei einem Strahlstrom von $150 \mu\text{A}$ treffen also jede Sekunde ungefähr $9,375 \cdot 10^{14}$ Teilchen auf das Target.

Im Folgenden werden zwei verschiedene Simulationen durchgeführt. Die Erste befasst sich mit der Direktstrahlung während des Strahlbetriebs. Die Simulation ermittelt die Verteilung der Äquivalenzdosisleistung in der simulierten Umgebung. Diese wird von FLUKA in Einheiten von $\frac{\text{pSv}}{\text{prim}}$ ausgegeben. "prim" steht in diesem Kontext für Primärteilchen. In den folgenden Grafiken wird die Dosisleistung bei einem Strahlstrom von $150 \mu\text{A}$ in $\frac{\mu\text{Sv}}{\text{h}}$ angegeben. Es folgt die Umrechnung:

3. Simulation

$$1 \frac{\text{pSv}}{\text{prim}} = 9,375 \cdot 10^{14} \frac{\text{pSv}}{\text{s}} = 9,375 \cdot 10^{14} \cdot 3600 \cdot 10^{-6} \frac{\mu\text{Sv}}{\text{h}} = 3,4 \cdot 10^{12} \frac{\mu\text{Sv}}{\text{h}}$$

Die zweite Simulation zielt auf die remanente Radioaktivität als Folge der Direktstrahlung ab. Diese Simulation erzeugt Informationen zu den Aktivitäten der Isotope nach unterschiedlichen Abklingzeiten, der Verteilung der Aktivität in den Experimentierhallen und die Äquivalenzdosisleistung, die von der Aktivität ausgeht. Die "remanente Dosisleistung" wird in Einheiten von $\frac{\text{pSv}}{\text{s}}$ und die Aktivität in Bq ausgegeben. Da die Dosisleistung erneut in $\frac{\mu\text{Sv}}{\text{h}}$ angegeben werden soll, gilt die folgende Umrechnung:

$$1 \frac{\text{pSv}}{\text{s}} = 3600 \cdot 10^{-6} \frac{\mu\text{Sv}}{\text{h}} = 3,6 \cdot 10^{-3} \frac{\mu\text{Sv}}{\text{h}}$$

Für die Simulation der remanenten Radioaktivität ist die Strahlzeit von großer Bedeutung, da mit steigender Strahlzeit mehr radioaktive Nuklide erzeugt werden. Weil der reguläre Betrieb des Beschleunigers MAMI alle zwei Wochen einen Wartungstag vorsieht, wird auch für MESA von Strahlzeiten von ungefähr zwei Wochen ausgegangen. Anhand der Ergebnisse dieser Simulation können anschließend Abschätzungen zu längeren Strahlzeiten gemacht werden.

4. Direktstrahlung

4.1. Zielsetzung

Mit Hilfe der folgenden Simulationen in diesem und dem folgenden Kapitel sollen Schwachpunkte in der bisherigen Planung der strahlenschutztechnischen Maßnahmen rund um den Aufbau des neuen Beschleunigers MESA und des P2-Experiments gefunden werden. Dieses Kapitel beschäftigt sich vor allem mit dem Thema Direktstrahlung und der daraus resultierenden Dosisleistungsverteilung während des Strahlbetriebs.

Bei Bestrahlungsexperimenten an MAMI haben sich Verdachtsmomente ereignet, dass bereits Dosen von 1 Sv zum Absturz von Computern und/oder zum Löschen von Speichern führen. Deswegen ist auch bei MESA zu beachten, dass diese vor möglichst großer Dosisleistung abgeschirmt sind. Die Dosis soll zumindest für das Produktionsintervall von zwei Wochen deutlich unter 1 Sv gehalten werden, also am Besten weniger als $1 \frac{\text{mSv}}{\text{h}}$ (Mündliche Mitteilung von Prof. Dr. Kurt Aulenbacher).

Zunächst wird sich ein erster Eindruck über die bisherige Situation verschafft. Dazu wird eine Simulation durchgeführt, die auf der zuvor erklärten Ausgangslage basiert. Anschließend werden drei Möglichkeiten zur Verbesserung der Strahlenschutzmaßnahmen diskutiert. Das Ziel ist es, die günstigste Lösung, sowohl in Hinsicht der bestmöglichen Verbesserung als auch der Machbarkeit, zu finden.

4.2. Ausgangssimulation

Im Folgenden werden die Ergebnisse der ersten Simulation erörtert. Zunächst wird betrachtet, wo die Strahlung überhaupt hingelangt. Die Werte der Dosisleistung sind hier irreführend, da diese über die komplette Höhe der Simulation gemittelt werden. Für genauere Betrachtungen folgen später weitere Grafiken, die die Dosisleistung über einen kleineren Bereich um die Höhe des Teilchenstrahls mitteln.

4. Direktstrahlung

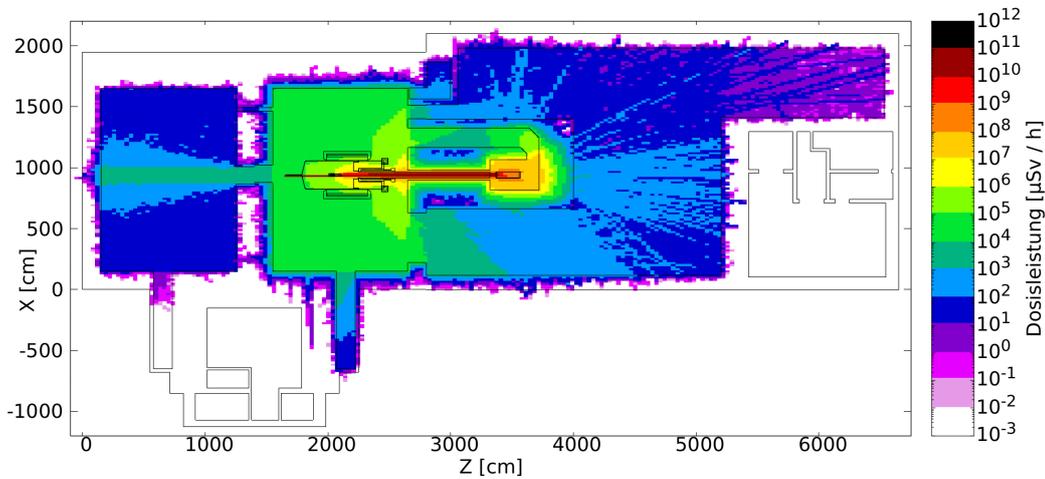


Abbildung 4.1.: Äquivalenzdosisleistung während des Strahlbetriebs. Die Dosisleistung wird über die komplette Höhe der Simulation gemittelt. Die maximale Ortsdosisleistung liegt entsprechend höher.

Die Grafik zeigt, dass keine Strahlung in die Verladehalle Nord vordringt. Durch einen Durchbruch gelangt Strahlung in sehr geringen Maßen in die Verladehalle Ost. Der angesprochene Durchbruch liegt an einem höher gelegenen Bereich in der Einbringöffnung der Verladehalle, in dem diese breiter wird, als die Grafik zu erkennen gibt.

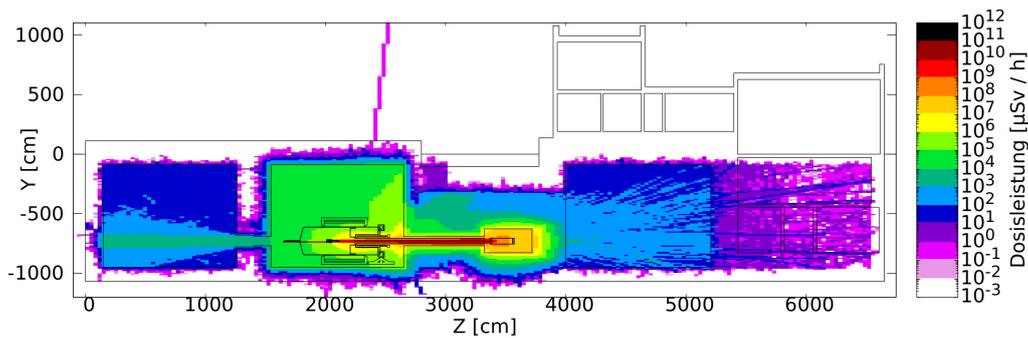


Abbildung 4.2.: Äquivalenzdosisleistung während des Strahlbetriebs. Die Grafik stellt einen Schnitt durch die X-Achse bei $X=940$ dar. Die Dosisleistung wird über die komplette Breite der Simulation gemittelt. Die maximale Ortsdosisleistung liegt entsprechend höher.

Anhand dieser Grafik kann erkannt werden, ob Strahlung aus den Hallen in die darüber liegenden Gebäude gelangt. Es gilt erneut die Stärke der Dosisleistung zu ignorieren.

4. Direktstrahlung

Es ist ersichtlich, dass einzelne Teilchen durch die Hallendecke gelangt sind. Über den Experimentierhallen 2 und 3 existiert noch ein Erdhügel, der in dieser Simulation nicht modelliert wurde. Es kann davon ausgegangen werden, dass die geringe Menge an Strahlung, die durch die Hallendecke dringt, in diesem Erdhügel ihre restliche Energie verliert.

Die vorliegende Grafik erweckt den Anschein, dass Strahlung in die Verladehalle Nord eindringt. Dies ist jedoch nicht der Fall, wie Abb 4.1 zeigt, da die Dosisleistung in Abb 4.2 über die komplette Breite der Simulation gemittelt wird.

Des Weiteren sollen die für den Strahlenschutz kritischen Stellen untersucht werden. Eine dieser Stellen stellt das Treppenhaus dar. Dieses befindet sich am rechten oberen Ende der Experimentierhalle 2 und ist von dieser auch zu betreten. Die folgende Grafik soll klären, ob Strahlung über das Treppenhaus nach oben gelangt.

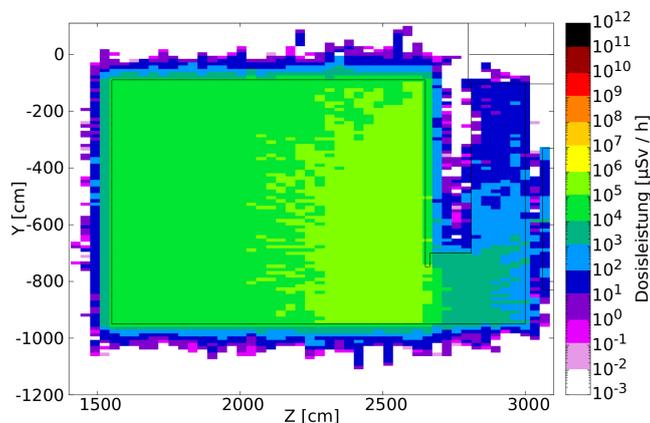


Abbildung 4.3.: Äquivalenzdosisleistung während Strahlbetrieb. Die Grafik zeigt Experimentierhalle 2 und das Treppenhaus. Der Schnitt für die Geometrie wird bei $X=1600$ gewählt.

Das Treppenhaus wird in der Simulation als Schacht modelliert. Wie zu erkennen ist, kommt keine größere Dosisleistung am oberen Ende des Treppenhauses an. Zu berücksichtigen ist jedoch, dass die Treppen selbst in der Simulation nicht modelliert sind. Diese würden das Vordringen der Strahlung erschweren, weshalb dort eine geringere Ortsdosisleistung vorzufinden wäre. Folglich werden keine strahlenschutztechnischen Maßnahmen für das Treppenhaus benötigt.

Es folgt eine Grafik, die die Äquivalenzdosisleistung genauer betrachtet. Diesmal wird die Dosisleistung über einen Meter um die Strahlhöhe gemittelt. Dadurch ergibt sich ein Überblick über die Äquivalenzdosisleistung auf Strahlhöhe. Zusätzlich folgt eine weitere Grafik zur Dosisleistung, die nur von den Neutronen ausgeht:

4. Direktstrahlung

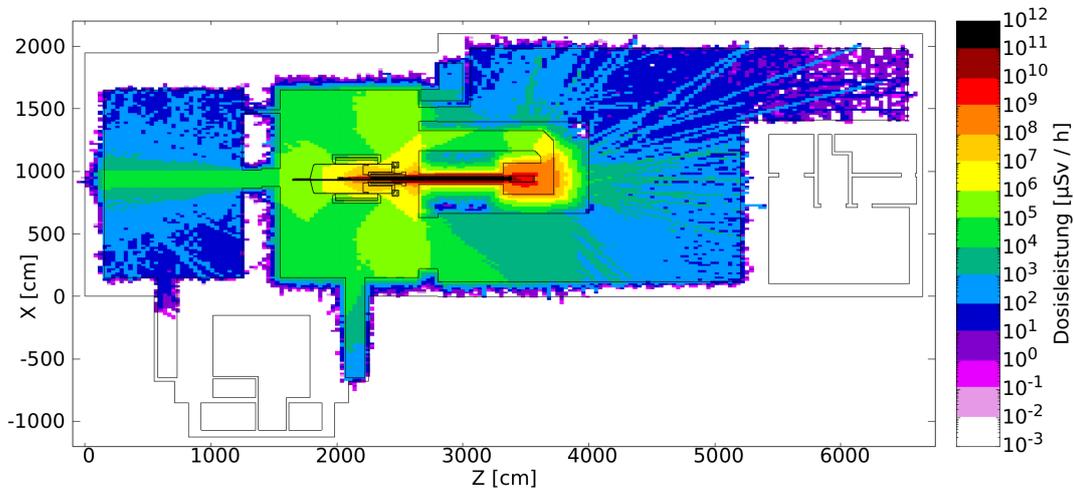


Abbildung 4.4.: Äquivalenzdosisleistung während des Strahlbetriebs. Die Dosisleistung wird über einen Meter um die Strahlhöhe gemittelt.

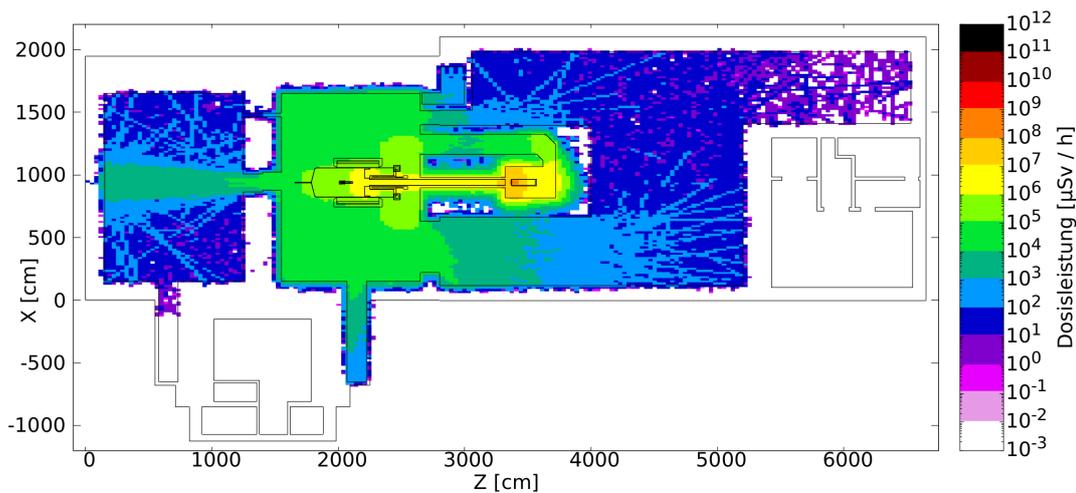


Abbildung 4.5.: Äquivalenzdosisleistung der Neutronen während des Strahlbetriebs. Die Dosisleistung wird über einen Meter um die Strahlhöhe gemittelt.

Mehrere Aspekte fallen bei der Betrachtung beider Grafiken auf. Einerseits tritt sehr viel Strahlung durch den Beamdump in Experimentierhalle 1. Der Strahlfänger scheint hier nicht auszureichen. Anhand der Neutronen-Dosis lässt sich erkennen, dass es sich hierbei hauptsächlich um Photonen handelt. Lediglich an den Seiten in Richtung der Kryomodulen treten auch Neutronen aus dem Beamdump aus. Andererseits tritt sehr viel Strahlung durch die zwei Durchgänge zwischen Experimentierhalle 2 und 1. Dabei handelt es sich auch zum großen Teil um Neutronen.

4. Direktstrahlung

Anhand dieser zwei Grafiken ist bereits erkennbar, dass der Strahlfänger ohne eine weitere Abschirmung nicht ansatzweise für den Betrieb des Beschleunigers ausreicht. Besonders kritisch sind die Positionen der Kryomodule und der Elektronenquelle, da diese im Verdacht stehen, bei größeren Dosen nicht mehr einwandfrei zu funktionieren. In diesem Fall ist kein Betrieb des Beschleunigers möglich. Deswegen wird in den folgenden Kapiteln nach möglichen Verbesserungen gesucht.

Bevor jedoch mögliche Verbesserungen vorgestellt werden, wird die Dosisleistung an den Positionen der Kryomodule und der Elektronenquelle bestimmt. Dafür befinden sich im Anhang weitere Grafiken (A.6, A.7, A.8 und A.9), die die Dosisleistung über die relevanten Höhen mittelt. Dies erlaubt es, genauere Aussagen zu treffen. Die Ergebnisse sind in der folgenden Tabelle festgehalten:

Tabelle 4.1.: Dosisleistung an den Kryomodulen und der Elektronenquelle – 1. Simulation

| Dosisleistung | Gesamt- [$\mu\text{Sv/h}$] | Neutronen [$\mu\text{Sv/h}$] |
|------------------|------------------------------|--------------------------------|
| Kryomodul 1 | $10^2 - 10^4$ | $10^1 - 10^3$ |
| Kryomodul 2 | $10^3 - 10^4$ | $10^2 - 10^4$ |
| Elektronenquelle | $10^1 - 10^4$ | $10^0 - 10^2$ |

Da Neutronen aufgrund ihrer Langlebigkeit große Strecken zurücklegen können, stellen sie den Strahlenschutz vor ein Problem. Dementsprechend sollen sie möglichst gut abgeschirmt werden. Aus diesem Grund wird ein Energiespektrum der Neutronen simuliert, die durch den unteren Durchgang in Halle 1 treten. Anhand dieses Spektrums kann dann die bestmögliche Abschirmung für die Neutronen diskutiert werden.

4. Direktstrahlung

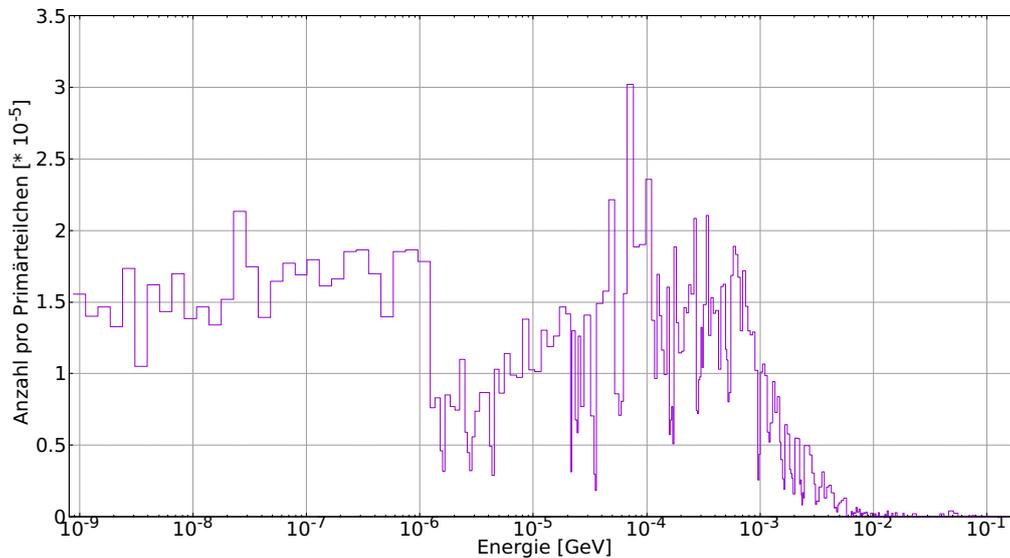


Abbildung 4.6.: Das Energiespektrum der Neutronen, die durch die untere Öffnung von Halle 2 in 1 treten.

4.3. Verbesserungsmöglichkeiten

Im Folgenden werden hinsichtlich des Strahlenschutzes drei verschiedene Varianten für eine verbesserte Geometrie vorgestellt, die so tatsächlich umsetzbar sind. Dafür werden zunächst die Änderungen in der Geometrie präsentiert, bevor die Ergebnisse und die Verbesserungen diskutiert werden. Nach Darstellung der drei Varianten werden diese miteinander verglichen sowie die möglichen Vor- und Nachteile erläutert. Wichtig ist vor allem, dass das Bauwerk für die Zusatzabschirmungen nicht verändert werden muss.

Eine nachfolgende Änderung der Geometrie ist für alle drei Varianten identisch. Es ist notwendig, eine zusätzliche Abschirmung um den Strahlfänger zu bauen. Diese wird in den zwei Grafiken 4.7 gezeigt.

Die zusätzliche Abschirmung ist 20 cm dick und 50 cm hoch. Die Länge beträgt 150 cm. Sie besteht aus der bereits bekannten Blei-Antimon-Verbindung (siehe Tab. 3.1). Hierbei ergibt sich ein Volumen von 0,36 m³. Bei einer Dichte von 11,16 $\frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$ entspricht dies einer Masse von 4,02 t. Die Abschirmung ist möglichst nah an dem Strahlfänger zu platzieren, damit so viel Strahlung wie möglich durch die zusätzliche Schicht treten muss.

Es ist weiterhin möglich, direkt zu dem Strahlfänger mit seiner zusätzlichen Abschirmung zu gelangen sowie um diesen herum zu laufen.

4. Direktstrahlung

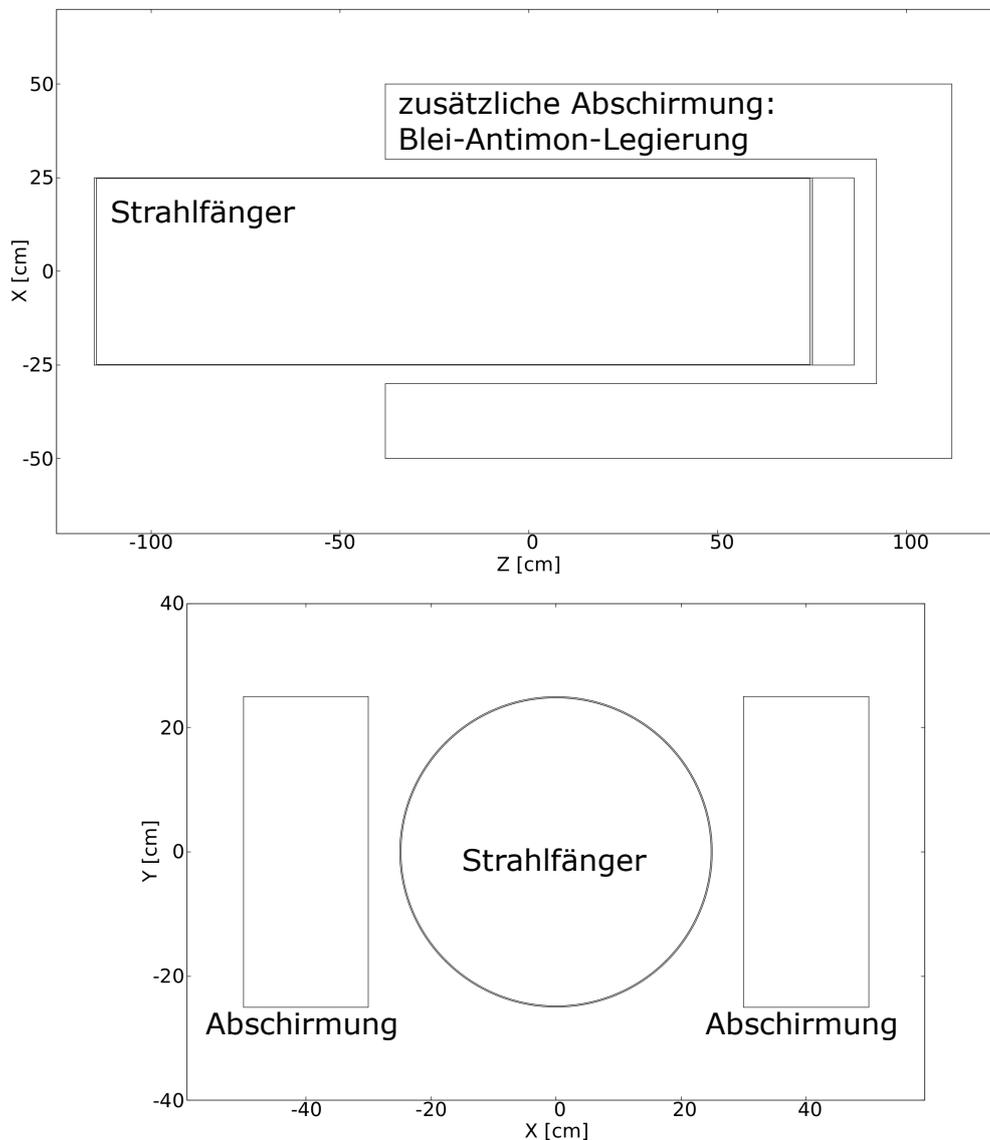


Abbildung 4.7.: Strahlfänger mit der zusätzlichen Abschirmung in U-Form

Des Weiteren ist anzumerken, dass die zusätzliche Abschirmung in dieser Simulation nicht auf dem Boden steht, weshalb für ihre Realisierung mindestens noch ein Betonaufbau unter der U-Form gebaut werden müsste. Außerdem besitzt der Strahlfänger in diesem Aufbau der Abschirmung keinen Deckel. Im weiteren Verlauf der Arbeit wird sich herausstellen, dass dieser Boden und ein zusätzlicher Deckel für den Strahlfänger wichtige Punkte darstellen.

4.3.1. Simulation Variante 1

In der nächsten Grafik werden alle Änderungen der Geometrie gezeigt:

4. Direktstrahlung

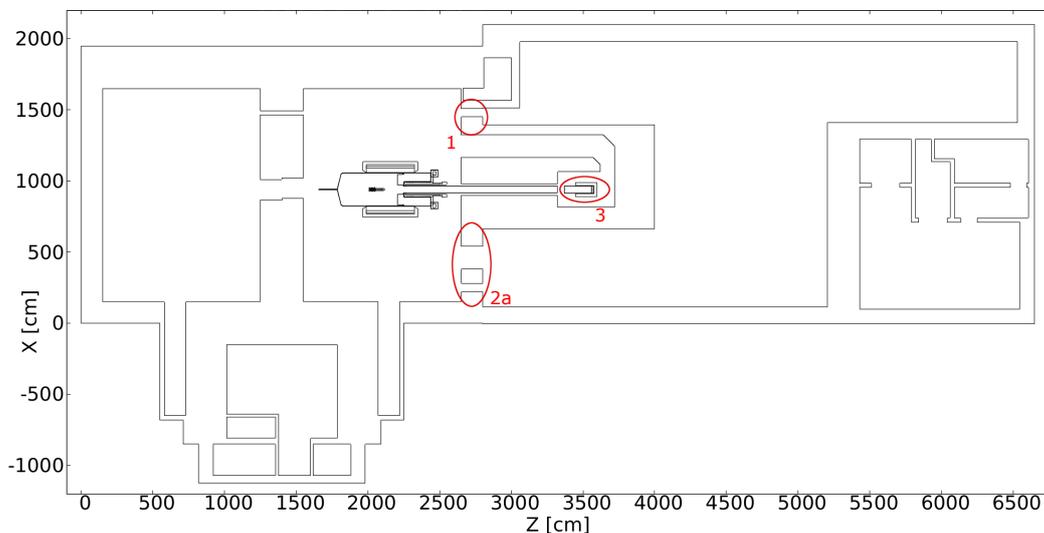


Abbildung 4.8.: Änderungen in der Geometrie für Variante 1

In der oberen Verbindung (1) zwischen Experimentierhalle 1 und 2 befindet sich die Strahlführung. Da an dieser Stelle keine Person passieren muss, kann diese Öffnung verkleinert werden. Es ist noch nicht bekannt, auf welcher Höhe sich die Strahlführung befindet. Deswegen wird nur die Breite der Öffnung auf 60 cm verkleinert. In der unteren Verbindung (2a) zwischen Experimentierhalle 1 und 2 befindet sich erneut die Strahlführung und ein Durchgang. Die Strahlführung erhält wieder 60 cm Platz. Der Durchgang wird auf die Breite der Treppe beschränkt, sodass sich die Beton-Wand auf beiden Seiten verlängert. Die dritte Änderung (3) wurde zuvor bereits diskutiert.

Im Wesentlichen wird also die Breite der Durchbrüche für die Strahlführung und die Breite des Durchgangs verkleinert. Die Verlängerungen der Beton-Wände werden durch mobile Betonsteine realisiert. Die zusätzliche Abschirmung um den Strahlfänger wird durch die Problematik des Speicherverlusts gerechtfertigt.

Die nächsten Grafiken stellen die gesamte Dosisleistung und die Dosisleistung der Neutronen dar:

4. Direktstrahlung

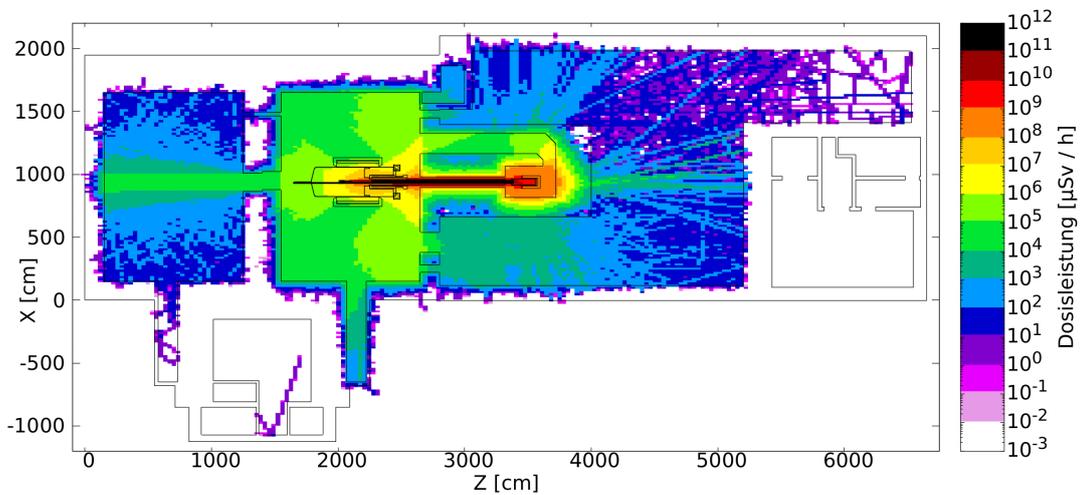


Abbildung 4.9.: Äquivalenzdosisleistung mit der verbesserten Geometrie (Variante 1)

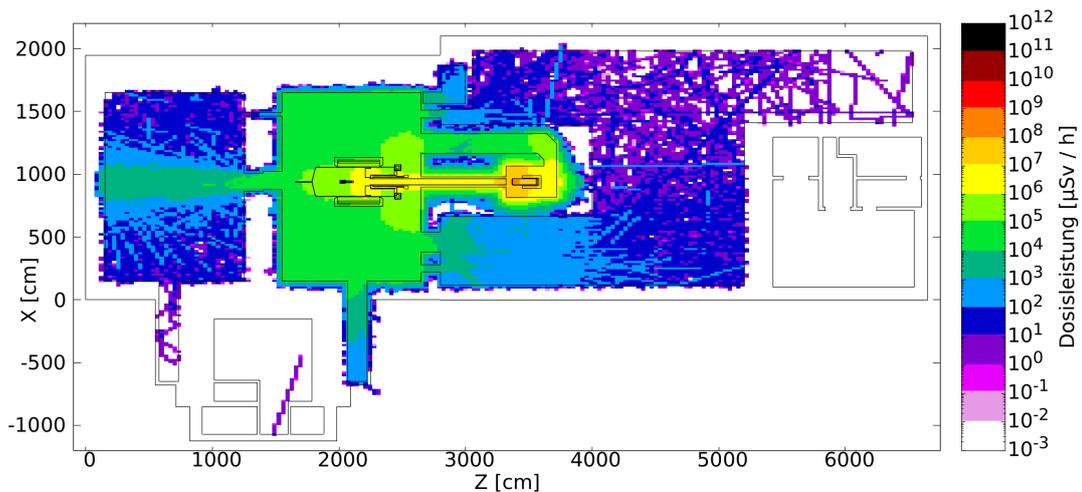


Abbildung 4.10.: Äquivalenzdosisleistung der Neutronen mit der verbesserten Geometrie (Variante 1)

An dieser Stelle ist festzustellen, dass die zusätzliche Abschirmung im Beamdamp noch nicht ausreichend ist. Es gelangt weiterhin Strahlung durch die Wände, sodass dort eine Dosisleistung in der Größenordnung von 1 bis $10 \frac{\text{mSv}}{\text{h}}$ vorzufinden ist. Der Grund hierfür ist, dass die Abschirmung nach oben und unten nicht geschlossen ist. Durch die Verkleinerung der Durchbrüche kann die Dosisleistung leicht gesenkt werden. Aufgrund der großen Menge an Strahlung, die aus dem Beamdamp kommt, kann eine Verbesserung allerdings nicht deutlich beobachtet werden. Die Dosisleistung der Neutronen hat sich um etwas weniger als eine Größenordnung verbessert.

4. Direktstrahlung

Die Dosisleistung an den kritischen Positionen wird erneut in einer Tabelle festgehalten. Die Werte der Dosisleistung werden aus den folgenden Grafiken entnommen: A.12, A.13, A.14 und A.15.

Tabelle 4.2.: Dosisleistung an den Kryomodulen und der Elektronenquelle – Variante 1

| Dosisleistung | Gesamt- [$\mu\text{Sv/h}$] | Neutronen [$\mu\text{Sv/h}$] |
|------------------|------------------------------|--------------------------------|
| Kryomodul 1 | $10^2 - 10^4$ | $10^0 - 10^3$ |
| Kryomodul 2 | $10^2 - 10^4$ | $10^1 - 10^3$ |
| Elektronenquelle | $10^0 - 10^4$ | $10^{-1} - 10^2$ |

4.3.2. Simulation Variante 2

Die Geometrie der Variante 2 wird gegenüber Variante 1 noch wie folgt erweitert:

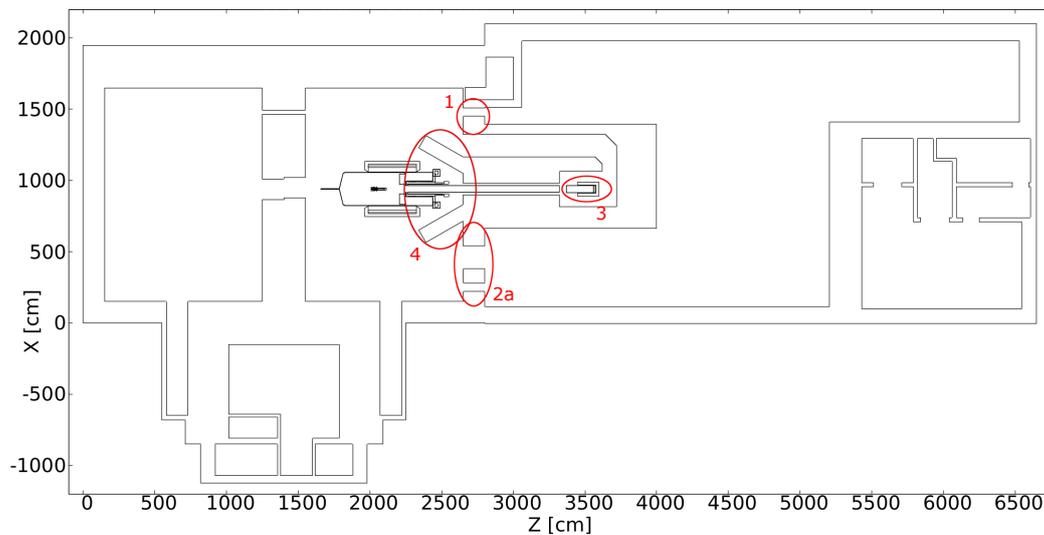


Abbildung 4.11.: Änderungen in der Geometrie für Variante 2

Bei der Änderung (4) handelt es sich um einen V-förmigen Wandeinzug in der Experimentierhalle 2. Die Wand ist 1 m dick, 3,6 m lang und 3,5 m hoch. Diese Änderung ist nicht optimal, da der hintere Teil des P2-Experiments nur noch schwer zugänglich ist und das Arbeiten an dem Experiment erschwert. Außerdem stellt dies einen Eingriff in das Bauwerk dar, der aus logistischen Gründen vermieden werden soll. Dennoch ist diese Wand denkbar.

Es folgen die Grafiken zu der Dosisleistung:

4. Direktstrahlung

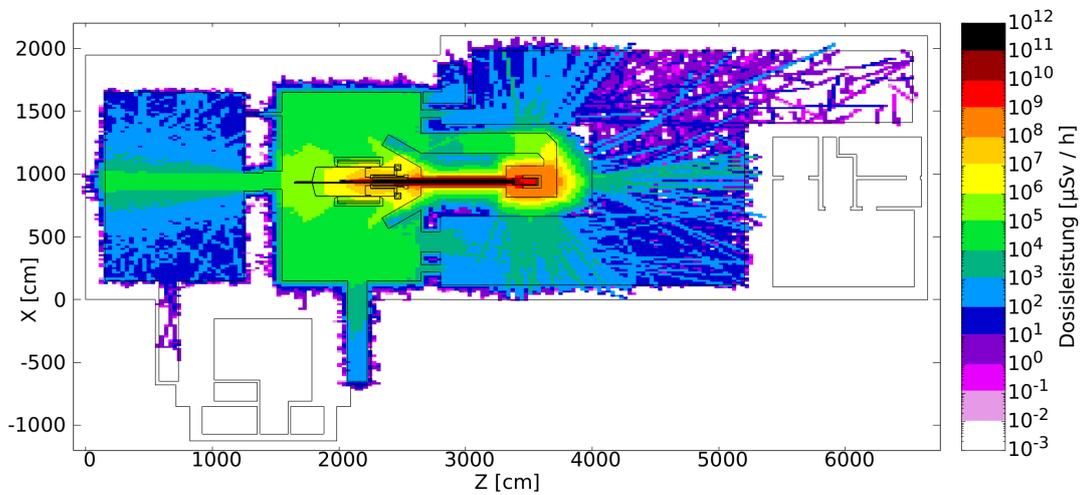


Abbildung 4.12.: Äquivalenzdosisleistung (Variante 2)

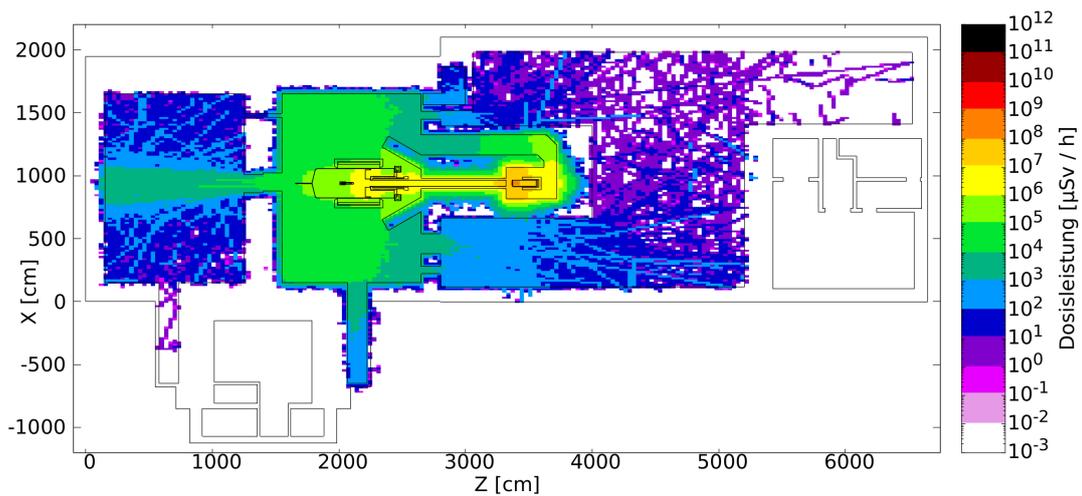


Abbildung 4.13.: Äquivalenzdosisleistung der Neutronen (Variante 2)

Diese Variante bewirkt ungefähr dieselbe Verbesserung wie Variante 1. Da dem Beamdump ein Boden und ein Deckel fehlt, ist eine genaue Auswertung dieser Verbesserung nicht möglich.

Die Dosisleistung an den kritischen Positionen wird erneut in einer Tabelle festgehalten. Die Werte der Dosisleistung werden aus den folgenden Grafiken entnommen: A.18, A.19, A.20 und A.21:

4. Direktstrahlung

Tabelle 4.3.: Dosisleistung an den Kryomodulen und der Elektronenquelle – Variante 2

| Dosisleistung | Gesamt- [$\mu\text{Sv/h}$] | Neutronen [$\mu\text{Sv/h}$] |
|------------------|------------------------------|--------------------------------|
| Kryomodul 1 | $10^1 - 10^4$ | $10^{-3} - 10^2$ |
| Kryomodul 2 | $10^2 - 10^4$ | $10^1 - 10^3$ |
| Elektronenquelle | $10^0 - 10^3$ | $10^{-3} - 10^2$ |

4.3.3. Simulation Variante 3

In Variante 3 werden die Änderungen (1) und (3) übernommen. Jedoch wird die Änderung (2a) durch eine andere (2b) ersetzt.

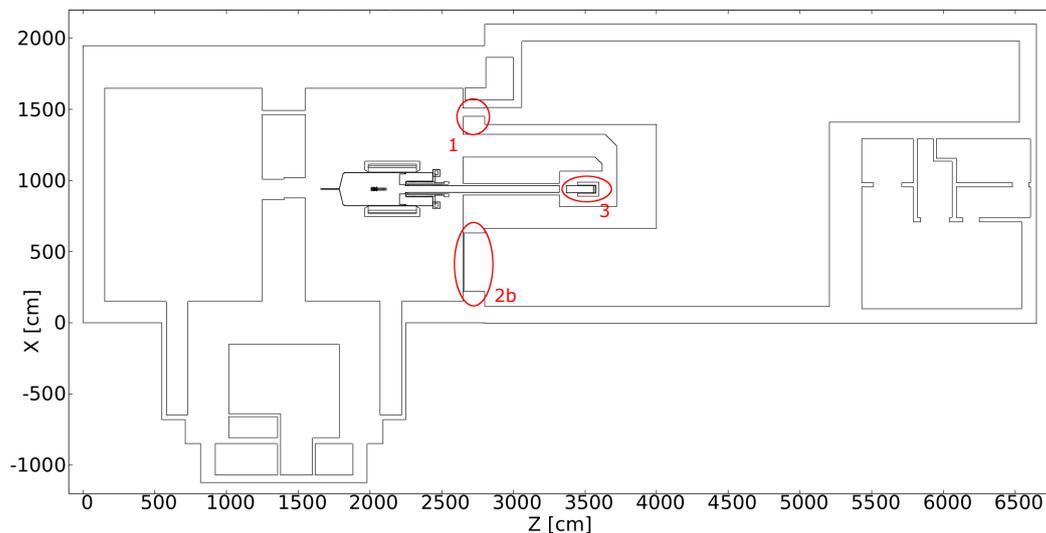


Abbildung 4.14.: Änderungen in der Geometrie für Variante 3

Bei der neuen Änderung (2b) handelt es sich um eine 5 cm dicke Polyethylen-Platte, die mit 3% Bor versetzt ist. Diese soll niederenergetische Neutronen besonders gut absorbieren. Für die Simulation wird angenommen, dass diese Platte den kompletten Durchbruch blockiert. In der Realität wird sich dort eine Tür befinden, an der aus Gründen des Brandschutzes keine Veränderung vorgenommen werden darf. Es ist allerdings möglich, eine weitere Tür vor die Brandschutztür zu setzen, an der die Platten befestigt werden können.

Es folgen die Grafiken zu der Dosisleistung und der Neutronen-Dosisleistung:

4. Direktstrahlung

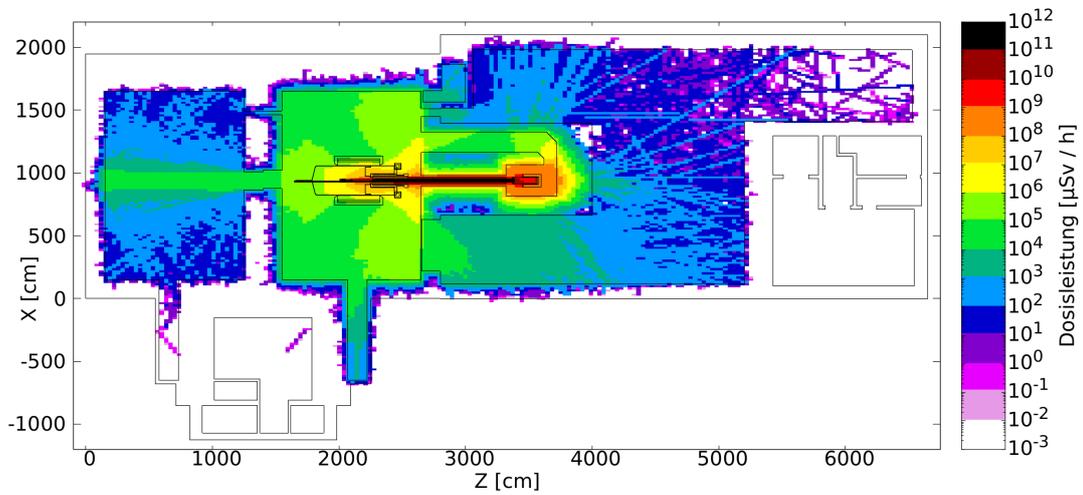


Abbildung 4.15.: Äquivalenzdosisleistung mit der verbesserten Geometrie (Variante 3)

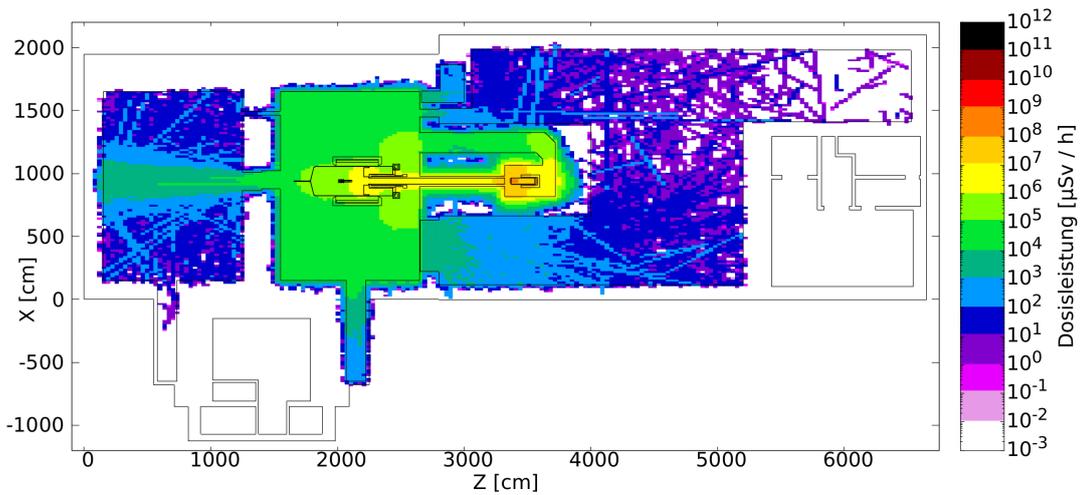


Abbildung 4.16.: Äquivalenzdosisleistung der Neutronen mit der verbesserten Geometrie (Variante 3)

Da der untere Durchbruch nicht verengt und nur eine Polyethylen-Platte eingesetzt wird, ist insgesamt wieder eine größere Dosisleistung in der Experimentierhalle 1 vorhanden. Die Wirkung dieser Platte kann in der zweiten Grafik beobachtet werden, da die Neutronen durch sie abgeschirmt werden.

Die Dosisleistung an den kritischen Positionen wird erneut in einer Tabelle festgehalten. Die Werte der Dosisleistung werden aus den folgenden Grafiken entnommen: A.24, A.25, A.26 und A.27.

4. Direktstrahlung

Tabelle 4.4.: Dosisleistung an den Kryomodulen und der Elektronenquelle – Variante 3

| Dosisleistung | Gesamt- [$\mu\text{Sv/h}$] | Neutronen [$\mu\text{Sv/h}$] |
|------------------|------------------------------|--------------------------------|
| Kryomodul 1 | $10^1 - 10^4$ | $10^{-3} - 10^3$ |
| Kryomodul 2 | $10^2 - 10^5$ | $10^1 - 10^3$ |
| Elektronenquelle | $10^0 - 10^3$ | $10^0 - 10^2$ |

4.3.4. Vergleich der drei Varianten

In diesem Abschnitt werden die drei Varianten miteinander verglichen. Alle drei Varianten weisen in gewisser Hinsicht Verbesserungen auf. Es folgen nun Tabellen, die die Ergebnisse für die einzelnen Positionen zusammenfassen:

Tabelle 4.5.: Dosisleistung an dem Kryomodul 1

| Dosisleistung | Gesamt- [$\mu\text{Sv/h}$] | Neutronen [$\mu\text{Sv/h}$] |
|---------------|------------------------------|--------------------------------|
| 1. Simulation | $10^2 - 10^4$ | $10^1 - 10^3$ |
| Variante 1 | $10^2 - 10^4$ | $10^0 - 10^3$ |
| Variante 2 | $10^1 - 10^4$ | $10^{-3} - 10^2$ |
| Variante 3 | $10^1 - 10^4$ | $10^{-3} - 10^3$ |

Tabelle 4.6.: Dosisleistung an dem Kryomodul 2

| Dosisleistung | Gesamt- [$\mu\text{Sv/h}$] | Neutronen [$\mu\text{Sv/h}$] |
|---------------|------------------------------|--------------------------------|
| 1. Simulation | $10^3 - 10^4$ | $10^2 - 10^4$ |
| Variante 1 | $10^2 - 10^4$ | $10^1 - 10^3$ |
| Variante 2 | $10^2 - 10^4$ | $10^1 - 10^3$ |
| Variante 3 | $10^2 - 10^5$ | $10^1 - 10^3$ |

Tabelle 4.7.: Dosisleistung an der Elektronenquelle

| Dosisleistung | Gesamt- [$\mu\text{Sv/h}$] | Neutronen [$\mu\text{Sv/h}$] |
|---------------|------------------------------|--------------------------------|
| 1. Simulation | $10^1 - 10^4$ | $10^0 - 10^2$ |
| Variante 1 | $10^0 - 10^4$ | $10^{-1} - 10^2$ |
| Variante 2 | $10^0 - 10^3$ | $10^{-3} - 10^2$ |
| Variante 3 | $10^0 - 10^3$ | $10^0 - 10^2$ |

An den Tabellen ist zu erkennen, dass sich die maximalen Gesamtdosisleistung an den Stellen der Kryomodule nicht viel verändert hat. Bei der

4. Direktstrahlung

Elektronenquelle ist eine Verbesserung von bis zu einer Größenordnung festzustellen. Die von den Neutronen verursachte Dosisleistung ist an der Position des 2. Kryomoduls ebenfalls um eine Größenordnung kleiner geworden. An der Stelle des 1. Kryomoduls hat sich die Neutronen-Dosisleistung leicht verbessert, da dort zum Teil deutlich kleinere Leistungen gefunden werden. Dasselbe Bild ergibt sich für die Neutronen-Dosisleistung an der Position der Elektronenquelle.

Aufgrund der Strahlung, die durch die Wände des Beamdumps dringt, kommt es bei allen drei Varianten zu keiner direkt sichtbaren Verbesserung der Dosisleistung. Aus diesem Grund ist eine weitere Simulation mit verbesserter Abschirmung um den Strahlfänger durchzuführen.

4.3.5. Simulation Variante 4

In dieser Variante soll die Abschirmung um den Beamdump so geändert werden, dass deutlich weniger Strahlung durch die Wände in die Experimentierhalle 1 gelangt. Zusätzlich handelt es sich bei dieser Variante um einen Kompromiss zwischen den Varianten 1 und 3.

Die nächsten Graphiken zeigen den Aufbau in der Halle und die neue Abschirmung um den Strahlfänger:

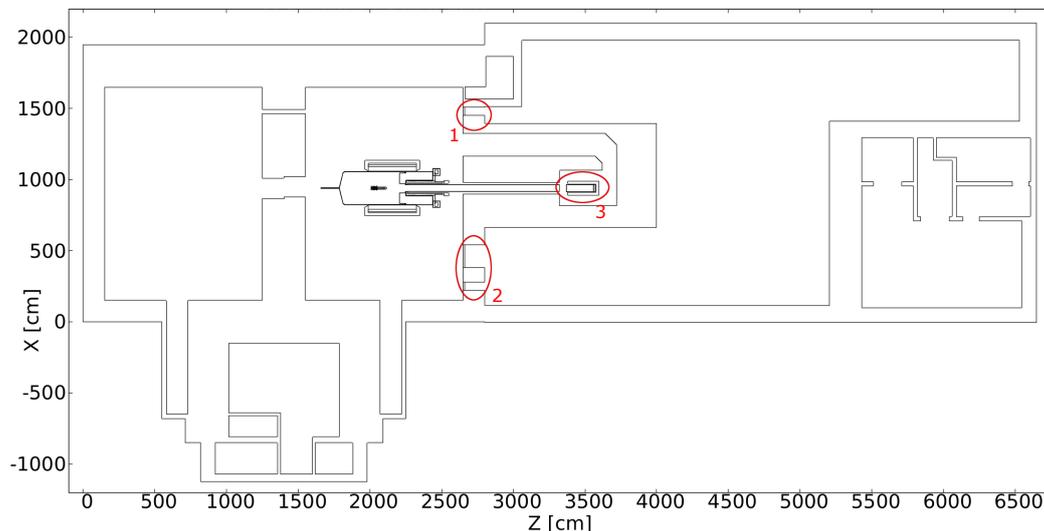


Abbildung 4.17.: Änderungen in der Geometrie für Variante 4

Die Änderungen (1) und (2) entsprechen grundsätzlich der in Variante 1. Es wird jeweils eine 10 cm dicke Polyethylen-Platte, die mit 3% Bor versetzt ist, dazugefügt. Die Dicke der Platte wird also im Vergleich zu Variante 3 verdoppelt.

4. Direktstrahlung

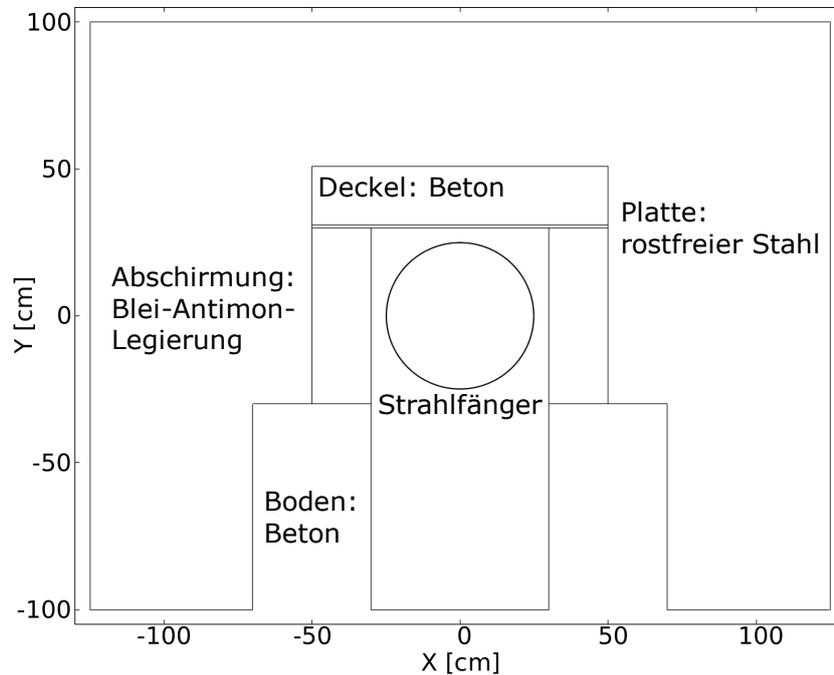


Abbildung 4.18.: Strahlfänger mit der verbesserten Abschirmung in U-Form

Im Vergleich zur vorherigen Konstruktion der Abschirmung um den Strahlfänger wird die Höhe der Blei-Antimon-Schicht von 50 cm auf 60 cm vergrößert und die Länge von 150 cm auf 217 cm verlängert. Dies entspricht einem Volumen von $0,59 \text{ m}^3$ und somit einer Masse von 6,6 t. Unter der Legierung wird eine doppelt so dicke U-Form aus Beton gebaut. Mit dieser ist der Strahlfänger nach unten hin abgeschlossen. Außerdem erhält die Abschirmung einen Deckel. Dafür wird eine 1 cm dicke Platte aus rostfreiem Stahl auf die Legierung gelegt und darauf wiederum eine 20 cm hohe Betonschicht.

Es folgen die Grafiken zu der Dosisleistung:

4. Direktstrahlung

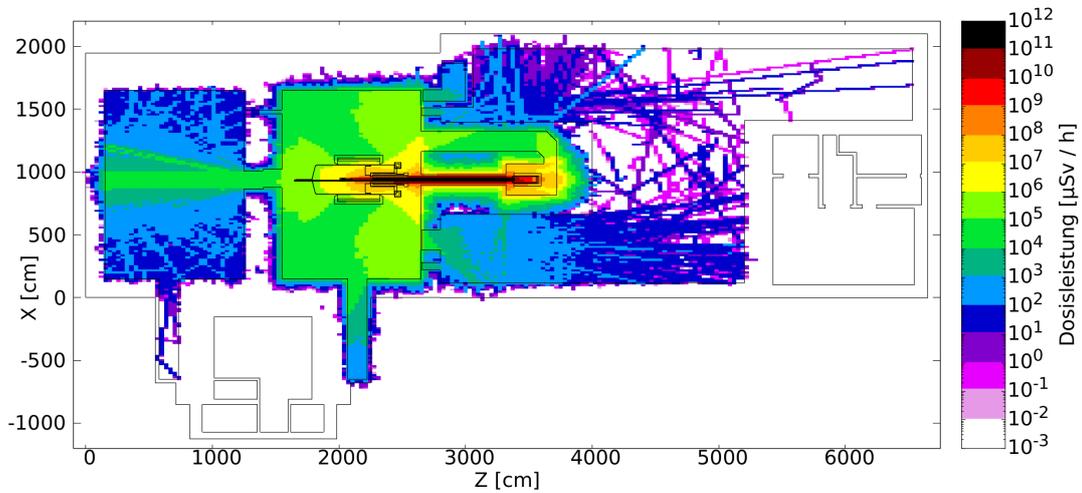


Abbildung 4.19.: Äquivalenzdosisleistung mit der verbesserten Geometrie (Variante 4)

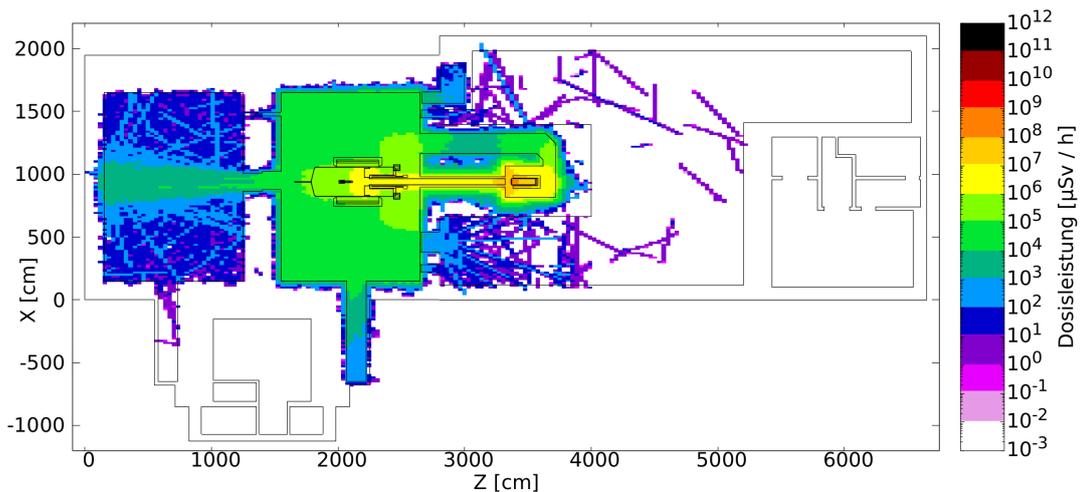


Abbildung 4.20.: Äquivalenzdosisleistung der Neutronen mit der verbesserten Geometrie (Variante 4)

Hier ist zu erkennen, dass die Dosisleistung in der Experimentierhalle 1 im Vergleich zur ersten Simulation um eine Größenordnung abnimmt. Mit Hilfe der Polyethylen-Platten und der Verengung des Durchbruchs gelingt es, die Neutronen fast gänzlich daran zu hindern, in Halle 1 zu gelangen. Es existiert dennoch ein kleiner Bereich, in dem Strahlung aus dem Beamdum herausdringen kann. Es ist allerdings nicht möglich, die Abschirmung weiter nach vorne zu verlängern, da ausreichend Platz vorhanden sein muss, um eventuell zu dem Strahlfänger zu gelangen. An dieser Stelle bedarf es noch einer Verbesserung, damit die Photonen besser abgefangen werden.

4. Direktstrahlung

Die Dosisleistung an den kritischen Positionen wird erneut in einer Tabelle festgehalten. Die Werte der Dosisleistung werden aus den folgenden Grafiken entnommen: A.30, A.31, A.32 und A.33.

Tabelle 4.8.: Dosisleistung an den Kryomodulen und der Elektronenquelle – Variante 4

| Dosisleistung | Gesamt- [$\mu\text{Sv/h}$] | Neutronen [$\mu\text{Sv/h}$] |
|------------------|------------------------------|--------------------------------|
| Kryomodul 1 | $10^0 - 10^4$ | $10^{-3} - 10^3$ |
| Kryomodul 2 | $10^1 - 10^3$ | $10^{-3} - 10^3$ |
| Elektronenquelle | $10^{-3} - 10^1$ | $< 10^{-3}$ |

Die vorliegende Tabelle belegt den Eindruck der Grafiken. Besonders die Neutronen-Dosisleistung geht stark zurück, auch wenn vereinzelt noch eine größere Dosisleistung auftaucht. Durch die neue Konstruktion der Abschirmung im Beamdump fallen auch die Werte der Gesamt-Dosisleistung ab. An den Positionen der Kryomodule wird das Ziel, unter einen Wert von $1 \frac{\text{mSv}}{\text{h}}$ zu gelangen, fast erreicht. Allein am Kryomodul 1 wird dieser Wert leicht überschritten. Bei der Elektronenquelle ist fast keine Strahlung mehr vorhanden.

4.4. Fazit

Aus der ersten Simulation wird ersichtlich, dass keine Strahlung in die Verladehallen Ost und Nord eindringt. Das Treppenhaus, das durch die Experimentierhalle 2 betreten werden kann, weist am oberen Ende eine Dosisleistung von 10 bis $100 \frac{\mu\text{Sv}}{\text{h}}$ auf. Da die Simulation für das Treppenhaus nur einen einfachen Schacht ohne Treppen vorsieht, kann davon ausgegangen werden, dass es sich hierbei um eine konservative Abschätzung der zu erwartenden Obergrenze handelt. Die Räumlichkeiten über der Experimentierhalle 1 werden keiner nachweisbaren Strahlung ausgesetzt. Die höchste Dosisleistung von $1 \frac{\text{mSv}}{\text{h}}$ wird im Rohr hinter dem Experiment und durch den Beamdump bis hin zum Strahlfänger registriert.

Vor den Änderungen in der Geometrie herrscht, abgesehen von dem Kegel, der die Verteilung der Dosisleistung hinter dem P2-Experiment erzeugt, in der Experimentierhalle 2 höchstens eine Dosisleistung von $1 \frac{\text{Sv}}{\text{h}}$. Die Dosisleistung, die den Neutronen zuzuschreiben ist, beträgt in der Nähe des P2-Experiments $1 \frac{\text{Sv}}{\text{h}}$ bis $100 \frac{\text{mSv}}{\text{h}}$.

4. Direktstrahlung

In den Experimentierhallen 1 und 3 beträgt die maximale Dosisleistung $100 \frac{\text{mSv}}{\text{h}}$. Die höchste Neutronen-Dosisleistung in den Experimentierhallen 1 und 3 ist mit $100 \frac{\text{mSv}}{\text{h}}$ identisch mit der Dosisleistung in Experimentierhalle 2.

Die Dosisleistung an den Kryomodulen beträgt zwischen 1 und $10 \frac{\text{mSv}}{\text{h}}$ und die Neutronen-Dosisleistung zwischen $100 \frac{\mu\text{Sv}}{\text{h}}$ und $10 \frac{\text{mSv}}{\text{h}}$.

An der Elektronenquelle liegt sie zwischen $10 \frac{\mu\text{Sv}}{\text{h}}$ und $10 \frac{\text{mSv}}{\text{h}}$. Hier beträgt die Neutronen-Dosisleistung zwischen $100 \frac{\mu\text{Sv}}{\text{h}}$ und $10 \frac{\text{mSv}}{\text{h}}$.

Nach der Hinzugabe der zusätzlichen Abschirmungen in den Hallen und dem Beamdump bleibt die maximale Dosisleistung in den Experimentierhallen 2 und 3 unverändert.

Die höchste Dosisleistung in Experimentierhalle 1 ist am Durchgang zu Experimentierhalle 2 vorhanden und beträgt 10 bis $100 \frac{\text{mSv}}{\text{h}}$. Im restlichen Teil der Halle 1 ist die Dosisleistung auf $10 \frac{\text{mSv}}{\text{h}}$ gesunken. Dies entspricht einer Verbesserung von einer Größenordnung. Die Neutronen-Dosisleistung beträgt $1 \frac{\text{mSv}}{\text{h}}$. Allerdings fällt sie schnell unterhalb die simulierte Grenze von $1 \frac{\text{nSv}}{\text{h}}$. Die Ursache hierfür ist, dass die Statistik der Simulation nicht groß genug ist. Erst wenn eine größere Anzahl von Ereignissen simuliert werden, können auch in Experimentierhalle 1 bessere Statistiken zu der Neutronen-Dosisleistung erwartet werden.

Der Wert der Dosisleistung bei den Kryomodulen beträgt $1 \frac{\mu\text{Sv}}{\text{h}}$ bis $1 \frac{\text{mSv}}{\text{h}}$. Dies entspricht einer Verbesserung von mindestens einer Größenordnung. Die minimale Dosisleistung der Neutronen hat sich um etwa eine Größenordnung auf $10 \frac{\mu\text{Sv}}{\text{h}}$ verbessert.

Die Dosisleistung an der Position der Elektronenquelle ist mit $1 \frac{\mu\text{Sv}}{\text{h}}$ um vier Größenordnungen gesunken. Die Neutronen-Dosisleistung beträgt unter $1 \frac{\text{nSv}}{\text{h}}$. Dieser Wert hat sich um sieben Größenordnungen verbessert.

Da an den Positionen der Kryomodule eine Dosisleistung von über $1 \frac{\text{mSv}}{\text{h}}$ möglich ist, muss davon ausgegangen werden, dass die sensibelsten Bauteile aufgrund der Strahlung nicht mehr funktionstüchtig sind. Dies gilt nicht für die Elektronenquelle, da an ihrer Position eine Dosisleistung von $1 \frac{\mu\text{Sv}}{\text{h}}$ zu finden ist. Diese liegt deutlich unterhalb der formulierten Grenze von $1 \frac{\text{mSv}}{\text{h}}$, bei der mit Strahlenschäden in Speichereinheiten zu rechnen ist.

5. Remanente Radioaktivität

5.1. Zielsetzung

In diesem Kapitel wird eine Basis erarbeitet, auf der der Beschleuniger MESA hinsichtlich der Direktstrahlung in Betrieb genommen werden kann. Es bleibt aber noch zu überprüfen, ob die Aktivierung verschiedener Isotope in den Materialien um das P2-Experiment die Vorgaben des Strahlenschutzes überschreitet. Für den Betrieb des Beschleunigers ist vor allem wichtig, dass langlebige Isotope nur in sehr geringen Mengen produziert werden. Nach einem Überblick zu allen erzeugten Isotopen folgt die Betrachtung der langlebigen Isotope. Wenn feststeht, dass der Betrieb durch diese Isotope nicht gefährdet wird, werden die kurzlebigeren Isotope betrachtet. Hierbei ist insbesondere festzustellen, ab wann das Betreten der Experimentierhallen nach Abschalten des Beschleunigers strahlenschutztechnisch wieder erlaubt ist. Des Weiteren muss die Aktivität der Luft separat betrachtet werden, da die Hallen über eine Lüftung mit der Außenwelt verbunden sind. Die nach außen transportierte Luft darf bestimmte Aktivitätskonzentrationen nicht überschreiten. Abgesehen von der Menge der Isotope soll auch die Verteilung der Aktivität in den Experimentierhallen und die durch sie resultierende Äquivalenzdosisleistung ermittelt werden.

5.2. Erzeugte Isotope

5.2.1. Übersicht der erzeugten Isotope

Zunächst wird eine Übersicht in Form der nächsten Grafik von allen erzeugten Isotopen gegeben. Sie gibt nicht die Anzahl der erzeugten Kerne der einzelnen Isotope an, sondern stellt ihre Aktivität zum Zeitpunkt 0 nach dem Abschalten des Beschleunigers dar.

5. Remanente Radioaktivität

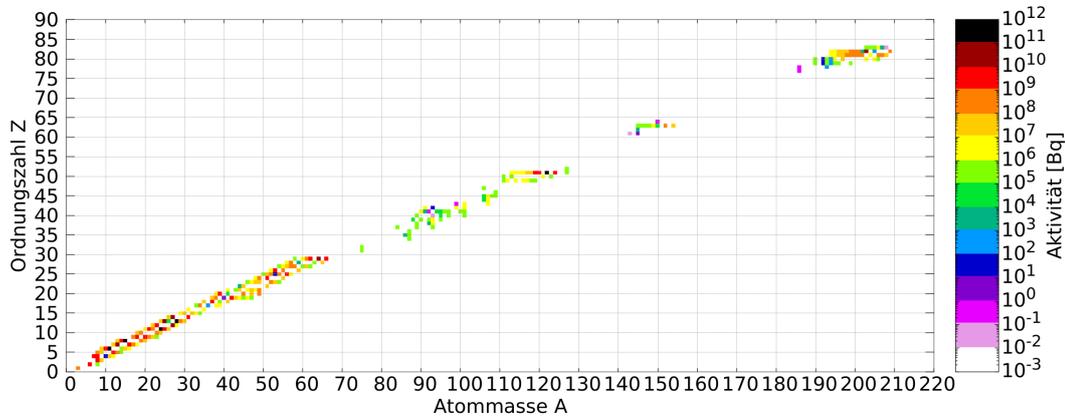


Abbildung 5.1.: Aktivität aller erzeugten Isotope zum Zeitpunkt 0 nach Abschalten des Beschleunigers – es werden zwei Wochen Strahlbetrieb simuliert

Durch den Betrieb des Beschleunigers werden viele Isotope erzeugt. Sie müssen anhand verschiedener Aspekte nach ihrer Wichtigkeit sortiert werden. Dabei sind die Halbwertszeit und die Art des Zerfalls die hierfür maßgeblichen Kriterien.

5.2.2. Langlebige Isotope

Das Auswahlkriterium für die in diesem Abschnitt betrachteten Isotope ist, dass diese nach einer Woche ohne Strahlbetrieb immer noch eine Aktivität von mindestens 100 MBq aufweisen müssen. Auf diese Weise werden alle Isotope, die kurzlebig oder mit kleineren Aktivitäten auftreten, nicht berücksichtigt. Folglich werden nur die langlebigen und mit großer Aktivität auftretenden Isotope betrachtet.

FLUKA generiert hierfür eine Tabelle, in der die genauen Aktivitäten der einzelnen Isotope enthalten sind. Aufgrund der langen Halbwertszeiten vieler dieser Isotope können ihre Zerfallskonstanten und damit ihre Produktionsraten berechnet werden. Die Formeln für diese Berechnungen befinden sich in den Grundlagen (Kap.2.5). Die folgende Tabelle beinhaltet die Aktivität der verschiedenen Isotope zum Zeitpunkt der Abklingzeit $t_a = 0$, die Halbwertszeiten, die Zerfallskonstante und die Produktionsrate der Isotope nach zwei Wochen Strahlzeit (t_b). Zu beachten ist, dass bei mehreren Isotopen die Halbwertszeiten gegenüber den zwei Wochen Strahlzeit so klein sind, dass die erhaltene Aktivität

5. Remanente Radioaktivität

der Sättigungsaktivität dieser Isotope entspricht. Dementsprechend kann nicht mehr von einer Produktionsrate gesprochen werden. Es handelt sich hierbei um die maximale Anzahl der erzeugten radioaktiven Kerne für das einzelne Isotop.

Tabelle 5.1.: Tabelle zur Berechnung der Produktionsraten aller langlebigen und mit großer Aktivität auftretender Isotope

| Isotope | $A(t_a = 0)$ [MBq] | $T_{1/2}$ | $T_{1/2}$ [s] | λ [1/s] | Produktionsrate ($t_b = 14d = 336h$) |
|---------|-----------------------|-----------|---------------|----------------------|---|
| H-3 | 170 | 12,3a | 387892800 | $1,79 \cdot 10^{-9}$ | $9,51 \cdot 10^{16}$ |
| Be-7 | 3600 | 53,3d | 4605120 | $1,51 \cdot 10^{-7}$ | $2,39 \cdot 10^{16}$ |
| Na-22 | 680 | 2,6a | 59529600 | $1,16 \cdot 10^{-8}$ | $5,84 \cdot 10^{16}$ |
| Na-24 | 100000 ¹ | 15,0h | 54000 | $1,28 \cdot 10^{-5}$ | $7,79 \cdot 10^{15}$ |
| Ar-37 | 1200 | 35,0d | 3024000 | $2,29 \cdot 10^{-7}$ | $5,24 \cdot 10^{15}$ |
| Ca-45 | 230 | 163,0d | 14083200 | $4,92 \cdot 10^{-8}$ | $4,67 \cdot 10^{15}$ |
| Cr-51 | 7200 | 27,7d | 2393280 | $2,90 \cdot 10^{-7}$ | $2,49 \cdot 10^{16}$ |
| Mn-54 | 100 | 312,2d | 26974080 | $2,57 \cdot 10^{-8}$ | $3,89 \cdot 10^{15}$ |
| Fe-55 | 860 | 2,7a | 61819200 | $1,12 \cdot 10^{-8}$ | $7,67 \cdot 10^{16}$ |
| Co-57 | 240 | 271,3d | 23440320 | $2,96 \cdot 10^{-8}$ | $8,12 \cdot 10^{15}$ |
| Co-58 | 110 | 70,8d | 6117120 | $1,13 \cdot 10^{-7}$ | $9,71 \cdot 10^{14}$ |
| Sb-119 | 2600 ¹ | 38,5h | 138600 | $5,00 \cdot 10^{-6}$ | $5,20 \cdot 10^{14}$ |
| Sb-122 | 140000 ² | 2,7d | 233280 | $2,97 \cdot 10^{-6}$ | $4,71 \cdot 10^{16}$ |
| Sb-124 | 8000 | 60,3d | 5209920 | $1,33 \cdot 10^{-7}$ | $6,01 \cdot 10^{16}$ |
| Eu-152 | 670 | 13,3a | 304516800 | $2,28 \cdot 10^{-9}$ | $2,94 \cdot 10^{17}$ |
| Tl-201 | 810 ² | 73,1h | 263160 | $2,63 \cdot 10^{-6}$ | $3,08 \cdot 10^{14}$ |
| Pb-203 | 15000 ¹ | 51,9h | 186840 | $3,71 \cdot 10^{-6}$ | $4,04 \cdot 10^{15}$ |

¹ hier handelt es sich um die Sättigungsaktivität

² > 94 % der Sättigungsaktivität

Zwei Isotope fallen in der Tabelle insbesondere durch ihre Langlebigkeit, Produktionsrate und ihre Zerfallskanäle auf. Hierbei handelt es sich um die Isotope Natrium-22 und Europium-152. Sie besitzen beide lange Halbwertszeiten, sodass davon ausgegangen werden muss, dass mit ansteigender Strahlzeit die Anzahl ihrer radioaktiven Kerne weiter steigt. Demnach werden diese Isotope auf lange Sicht unerwünschte Effekte mit sich bringen, insbesondere Europium-152 mit einer Produktionsrate von $2,94 \cdot 10^{17}$ Kernen in zwei Wochen Strahlzeit. Aber auch Natrium-22 wird eine vergleichbar große Dosisleistung erzeugen.

5. Remanente Radioaktivität

Für einen besseren Vergleich der Zerfallsdauer verschiedener Isotope wird deren Aktivität in der nächsten Grafik über die Zeit doppel-logarithmisch aufgetragen.

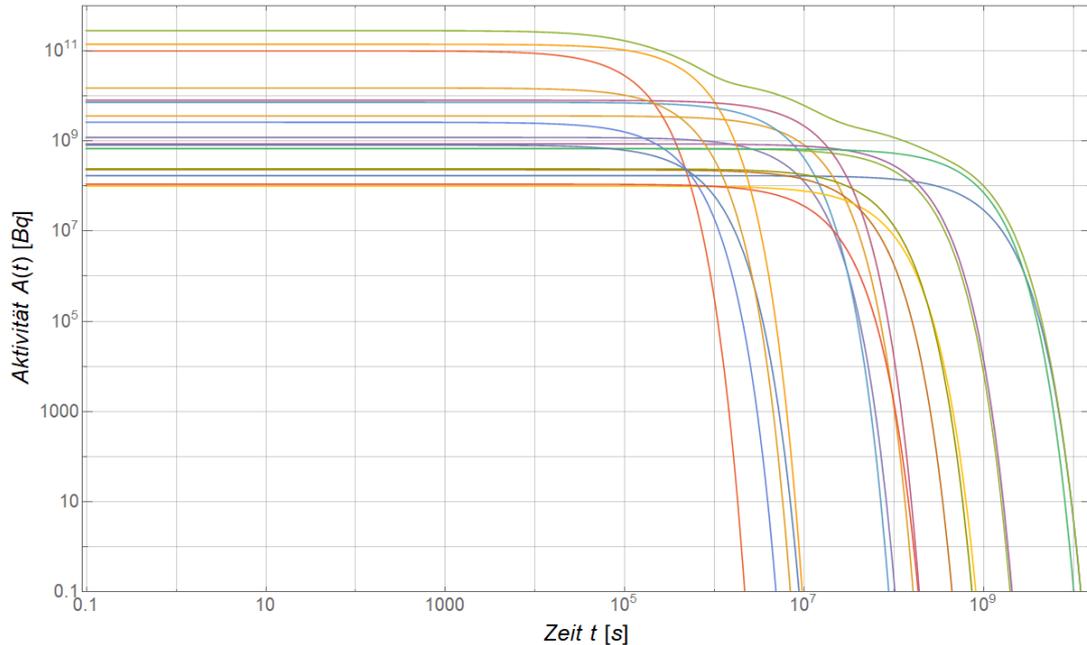


Abbildung 5.2.: Aktivität der in der Tabelle 5.1 aufgeführten Isotope über die Zeit aufgetragen

Die oberste Linie stellt die gesamte Aktivität der 17 Isotope dar. Es ist davon auszugehen, dass alle Isotope, die nicht in der Tabelle aufgeführt sind, keine große Veränderung der gesamten Aktivität nach sich ziehen, da ihre Aktivität im Vergleich zu den Aufgeführten zu klein ist. Ansonsten ist zu erkennen, dass die Isotope abhängig von ihrer Halbwertszeit unterschiedlich schnell zerfallen. Zur Erinnerung: $8,6 \cdot 10^4$ s entsprechen einem Tag, $6,0 \cdot 10^5$ s einer Woche und $3,2 \cdot 10^7$ s einem Jahr.

Im Folgenden werden ausgewählte Isotope betrachtet, die vor allem durch die Zusammensetzung der Stahl-Legierungen und in den Betonwände entstehen können. Hierbei handelt es sich um Scandium-46, Cobalt-60 und Bismut-207. Diese drei Isotope fallen besonders durch lange Halbwertszeiten und große Energien bei ihren Gamma-Zerfällen auf. Deswegen soll die Anreicherung dieser Isotope eingeschränkt werden. Es besteht die Möglichkeit, die Anreicherung einzelner Isotope zu verringern, indem das ursprüngliche Element aus den Zusammensetzungen der Materialien entfernt oder der Massenanteil verkleinert wird. Es

5. Remanente Radioaktivität

werden neben den drei genannten Isotopen weitere in diesen Materialien erzeugt, allerdings sind sie bereits in der ersten Tabelle aufgeführt. Für eine bessere Übersicht zu den Isotopen, die in den Stahl-Legierungen und den Wänden entstehen, folgt eine Tabelle:

Tabelle 5.2.: Tabelle zur Berechnung der Produktionsraten aller langlebigen und mit großer Aktivität auftretender Isotope

| Isotope | $A(t_a = 0)$ [MBq] | $T_{1/2}$ | $T_{1/2}$ [s] | λ [1/s] | Produktionsrate ($t_b = 14d = 336h$) |
|---------|-----------------------|-----------|---------------|-----------------------|---|
| Na-22 | 680 | 2,6a | 59529600 | $1,16 \cdot 10^{-8}$ | $5,84 \cdot 10^{16}$ |
| Na-24 | 100000 ¹ | 15,0h | 54000 | $1,28 \cdot 10^{-5}$ | $7,79 \cdot 10^{15}$ |
| Sc-46 | 2,8 | 83,3d | 7240320 | $9,57 \cdot 10^{-8}$ | $2,92 \cdot 10^{13}$ |
| Mn-54 | 100 | 312,2d | 26974080 | $2,57 \cdot 10^{-8}$ | $3,89 \cdot 10^{15}$ |
| Fe-55 | 860 | 2,7a | 61819200 | $1,12 \cdot 10^{-8}$ | $7,67 \cdot 10^{16}$ |
| Co-60 | 0,22 | 5,3a | 121348800 | $5,71 \cdot 10^{-9}$ | $3,85 \cdot 10^{13}$ |
| Eu-152 | 670 | 13,3a | 304516800 | $2,28 \cdot 10^{-9}$ | $2,94 \cdot 10^{17}$ |
| Bi-207 | $4,5 \cdot 10^{-8}$ | 33,4a | 764726400 | $9,06 \cdot 10^{-10}$ | $4,96 \cdot 10^7$ |

¹ hier handelt es sich um die Sättigungsaktivität

Vorliegend handelt es sich um Isotope, die in großen Mengen für den Strahlenschutz unerwünscht sind. Die Na-22 und Eu-152 Isotope sind maßgebend für die gesamte Aktivität aller erzeugten Isotope.

Natrium-24 stellt aufgrund seiner Halbwertszeit von 15 Stunden im Vergleich zu den anderen Isotopen ein geringeres Problem für den langfristigen Betrieb von MESA dar. Allerdings schränkt seine hohe Aktivität das Betreten der Experimentierhallen direkt nach dem Abschalten des Strahles ein. Natrium-24 ist auch deswegen problematisch, weil die bei seinem Zerfall erzeugten Photonen mit einer Energie von 2754 und 1369 keV schwer abzuschirmen sind. Die genauen Werte der Äquivalenzdosisleistung, die von der Aktivierung stammt, werden zu einem späteren Zeitpunkt diskutiert.

Scandium-46 hat nach Natrium-24 die geringste Halbwertszeit mit 83,3 Tagen. Es strahlt bei seinem Gamma-Zerfall Energien von 1121 und 889 keV ab. Allerdings wird es in kleinen Mengen produziert, weshalb andere Isotope, wie zum Beispiel Natrium-22 und Europium-152, von größerer Bedeutung sind.

Mangan-54 wird im Gegensatz zu Scandium-46 in größeren Mengen nach zwei Wochen Strahlzeit produziert. Allerdings liegt die Menge eine beziehungs-

5. *Remanente Radioaktivität*

weise zwei Größenordnungen unter den Produktionsraten von Natrium-22 und Europium-152. Deswegen ist der Beitrag von Mangan-54 zur Gesamt-Aktivität denkbar klein. Es kann über ein 835 keV starkes Gamma zerfallen. In dieser Hinsicht spielt es auch für die Betrachtung der Äquivalenzdosisleistung keine größere Rolle.

Eisen-55 wird in einer größeren Rate als Natrium-22 produziert und hat eine leicht längere Halbwertszeit. Allerdings zerfällt es ausschließlich über den Prozess des Elektronen-Einfangs. Die große Produktionsrate ist zwar zu beachten, aber sie liefert keinen signifikanten Beitrag zur Dosisleistung.

Cobalt-60 hat genauso wie Scandium mehrere Gamma-Zerfälle mit größeren Energieabgaben und wird in ebenso kleinen Raten produziert. Im Vergleich zu Scandium ist jedoch die wesentlich längere Halbwertszeit von 5,3 Jahren zu beachten.

Das letzte Isotop in der Tabelle ist Bismut-207. Es besitzt die längste Halbwertszeit von allen betrachteten Isotopen. Bismut-207 wird jedoch nur in sehr kleinen Mengen produziert.

Nach dieser Betrachtung der Isotope ist ersichtlich, dass Natrium-22 und Europium-152 in so großen Raten produziert werden, dass die anderen Isotope im Vergleich zu ihnen keinen großen Anteil zur gesamten Aktivität leisten, besonders in Hinsicht längerer Strahlzeiten.

Es folgt die Betrachtung der Aktivität gegenüber der Zeit für die eben besprochenen Isotope:

5. Remanente Radioaktivität

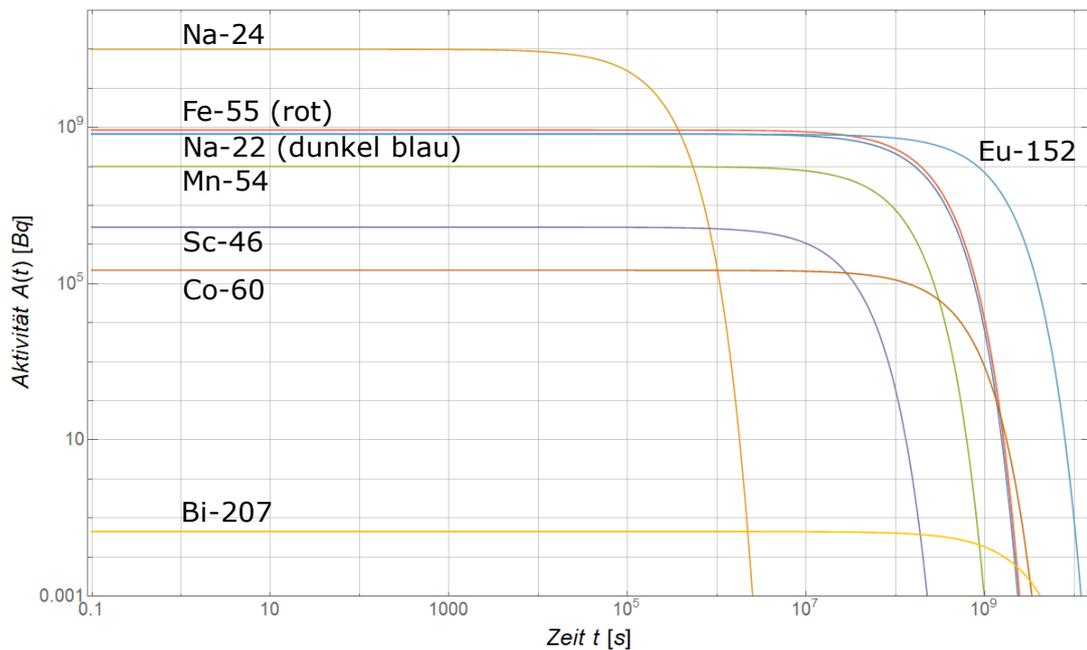


Abbildung 5.3.: Aktivität der in der Tabelle 5.2 aufgeführten Isotope über die Zeit aufgetragen

Die Grafik zeigt, dass langfristig Natrium-22 und Europium-152 die Gesamt-Aktivität maßgebend bestimmen. Auf kurze Sicht ist die Aktivität des Natrium-24 wesentlich größer.

5.2.3. Aktivierung der Luft

Die Aktivierung der Luft in den Experimentierhallen und im Beamdump stellt ein weiteres wichtiges Thema dar. Durch eine Lüftungsanlage besteht ein Luftaustausch mit der Außenwelt. Es gelten bestimmte Richtwerte für die Aktivitätskonzentration der Abluft. Im Fall der Lüftung der MESA-Hallen gilt $80 \frac{\text{kBq}}{\text{m}^3}$ für den Jahresmittelwert im Abluftvolumenstrom. Um zu überprüfen, ob dieser Grenzwert nicht überschritten wird, werden in diesem Abschnitt die erzeugten Isotope in der Luft für die einzelnen Räume separat betrachtet. Besonders interessant sind hierbei die Isotope C-11, N-13, O-15 und Ar-41.

Anbei folgen Grafiken, die die Aktivität der erzeugten Isotope in der Luft darstellen:

5. Remanente Radioaktivität

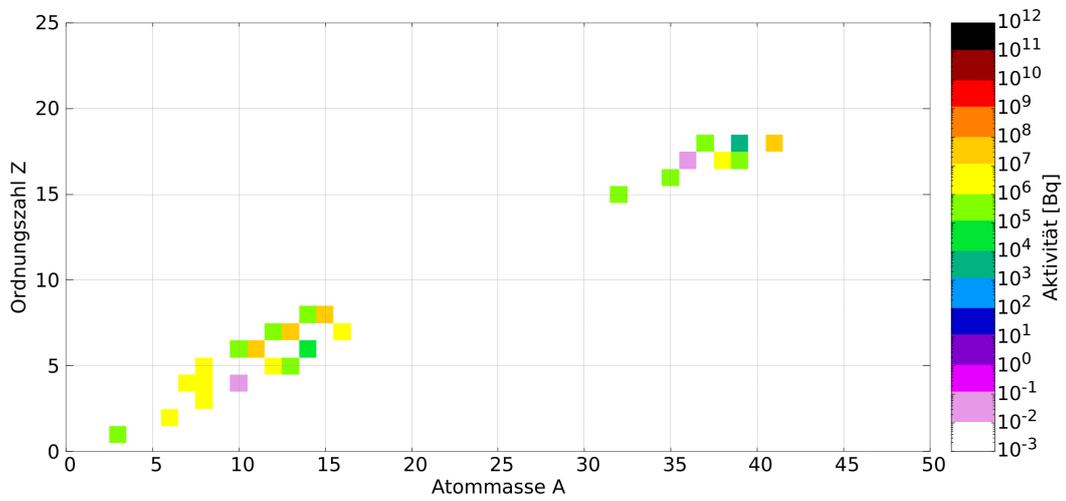


Abbildung 5.4.: Aktivität der erzeugten Isotope in der Luft im Beamdampf

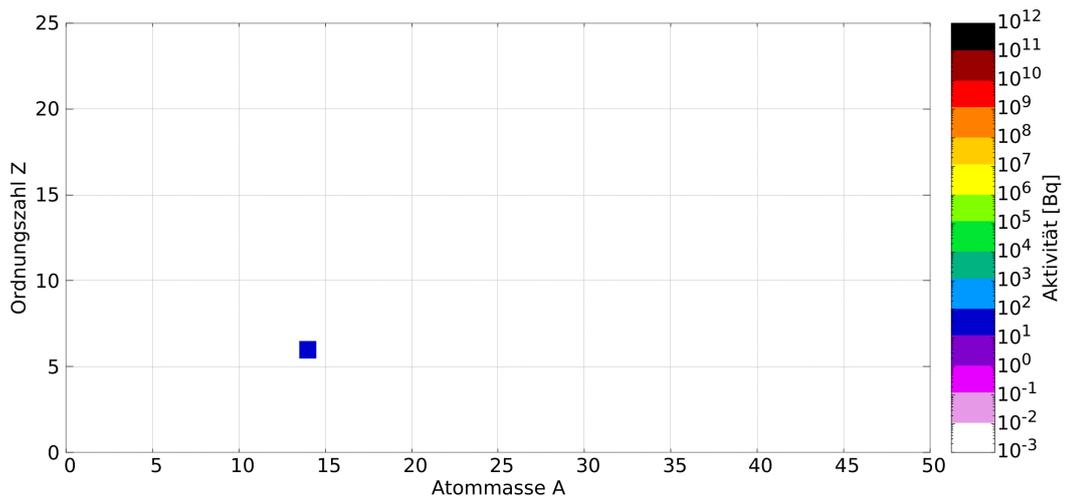


Abbildung 5.5.: Aktivität der erzeugten Isotope in der Luft im Experimentierhalle 1

5. Remanente Radioaktivität

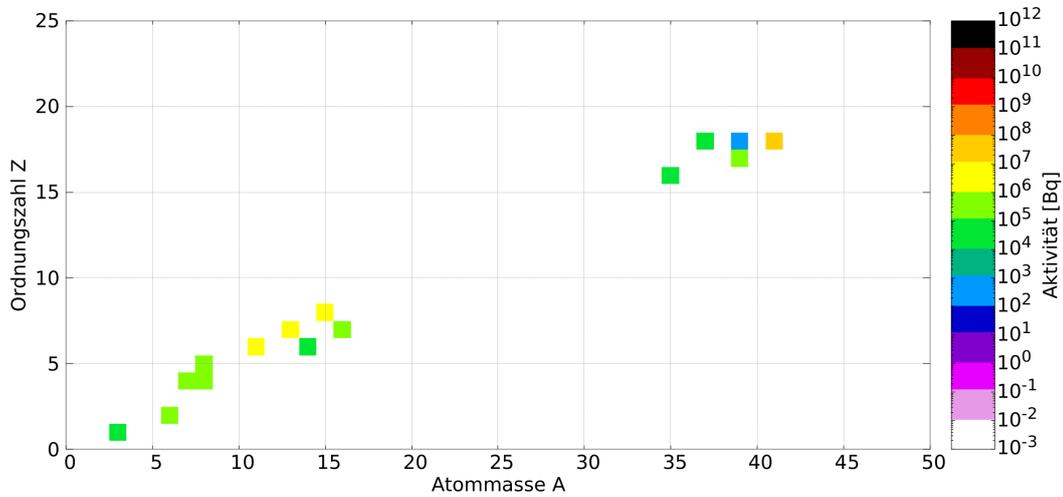


Abbildung 5.6.: Aktivität der erzeugten Isotope in der Luft im Experimentierhalle 2

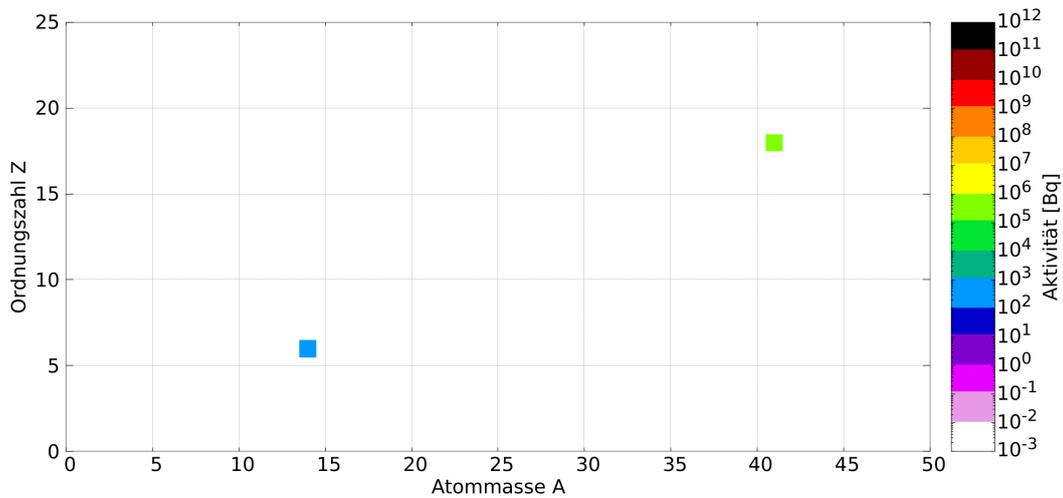


Abbildung 5.7.: Aktivität der erzeugten Isotope in der Luft im Experimentierhalle 3

In den Übersichten zu den erzeugten Isotopen in der Luft der verschiedenen Hallen und dem Beamdump ist erkennbar, dass in Experimentierhalle 1 und 3 nur geringe Mengen an Isotopen produziert werden. Die größte Aktivitäten ist im Beamdump und in der Experimentierhalle 2 vorzufinden.

Viele der in der Luft erzeugten Isotope haben so kurze Halbwertszeiten, dass sie schon nach wenigen Sekunden nicht mehr vorzufinden sind (z.B. He-6, B-8, N-12). Die größte Aktivität geht von den Isotopen C-11, N-13, O-15 und Ar-41 aus. In der folgenden Tabelle werden ihre Aktivitäten in den verschiedenen

5. Remanente Radioaktivität

Räumen dargestellt:

Tabelle 5.3.: Aktivitäten der vier Isotope in den unterschiedlichen Räumen

| Isotope | $T_{1/2}$ | Aktivität in [Bq] | | | |
|---------|-----------|-------------------|------------------|------------------|------------------|
| | | Beamdump | ExH. 1 | ExH. 2 | ExH. 3 |
| C-11 | 20,4m | $5,2 \cdot 10^7$ | $1,4 \cdot 10^1$ | $4,2 \cdot 10^6$ | - |
| N-13 | 10,0m | $5,4 \cdot 10^7$ | - | $5,3 \cdot 10^6$ | - |
| O-15 | 2,0m | $8,5 \cdot 10^7$ | - | $8,9 \cdot 10^6$ | - |
| Ar-41 | 1,8h | $3,9 \cdot 10^7$ | - | $1,0 \cdot 10^7$ | $1,9 \cdot 10^5$ |

Die Experimentierhallen 2 und 3 und der Beamdump besitzen zusammen ein Volumen von 2893 m^3 . Es ist anzunehmen, dass dieses Volumen einmal pro Stunde durch die Lüftung ausgewechselt wird. Tatsächlich soll die Lüftung ein Luftvolumen von $3600 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$ austauschen können. Durch die Annahme, dass einmal in der Stunde das gesamte Volumen gewechselt wird, wird ein maximaler Wert für die Aktivierungskonzentration in der Abluft bestimmt. Bei Addition der in den drei Räumen herrschenden Aktivitäten, beträgt die Gesamt-Aktivität in der Luft 259 MBq . Die Aktivitätskonzentration in der Luft ergibt sich wie folgt:

$$\frac{259 \text{ MBq}}{2893 \text{ m}^3} = 89,5 \frac{\text{kBq}}{\text{m}^3}$$

Für den Fall, dass die Lüftung tatsächlich $3600 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$ erreicht, wäre die Aktivitätskonzentration:

$$89,5 \frac{\text{kBq}}{\text{m}^3} \cdot \frac{2893}{3600} = 71,9 \frac{\text{kBq}}{\text{m}^3}$$

Abhängig vom Abluftvolumen der Lüftung beträgt die Aktivitätskonzentration in der Abluft $71,9$ bis $89,5 \frac{\text{kBq}}{\text{h}}$. Dies übertrifft zumindest teilweise den Jahresmittelwert für die erlaubte Aktivitätskonzentration von $80 \frac{\text{kBq}}{\text{h}}$. Eine Möglichkeit die Aktivitätskonzentration in der Abluft zu verringern, wäre den Luftaustausch im Beamdump zu verhindern. Auf diese Art und Weise würde die Luft im Beamdump stehen. Die Aktivitätskonzentration wäre sehr stark gesenkt, da die Gesamt-Aktivität sehr viel kleiner wäre und gleichzeitig das Gesamt-Volumen der Hallen nicht stark abnehmen würde, da der Beamdump im Vergleich zu den zwei Experimentierhallen sehr klein ist.

Es ist nicht damit zu rechnen, dass sich die Aktivität der aufgezählten Isotope bei längeren Strahlzeiten vergrößert, da sie sich alle nach zwei Wochen Strahlzeit in der Sättigung befinden. Es ist davon auszugehen, dass die Aktivierungskon-

5. Remanente Radioaktivität

zentration in der Luft geringer als berechnet ausfällt, da sich Kohlenstoff-11 und Argon-41 nach einer Stunde noch nicht in der Sättigung befinden. Weil das gesamte Luftvolumen einmal in der Stunde ausgetauscht wird, werden die zwei Isotope noch nicht die Aktivität erreicht haben, mit denen in dieser Arbeit gerechnet wird.

5.3. Aktivitätsverteilung

In diesem Abschnitt wird die Verteilung der Aktivität in den Experimentierhallen und dem Beamdump betrachtet. Es folgen mehrere Grafiken, die die Aktivitätsverteilung zu verschiedenen Abklingzeiten darstellen. Sie zeigen die Aktivitäten gemittelt über einen Meter über und unter der Strahlhöhe.

Die erste Grafik bildet die Aktivitätsverteilung eine Stunde nach Abschalten des Beschleunigers ab:

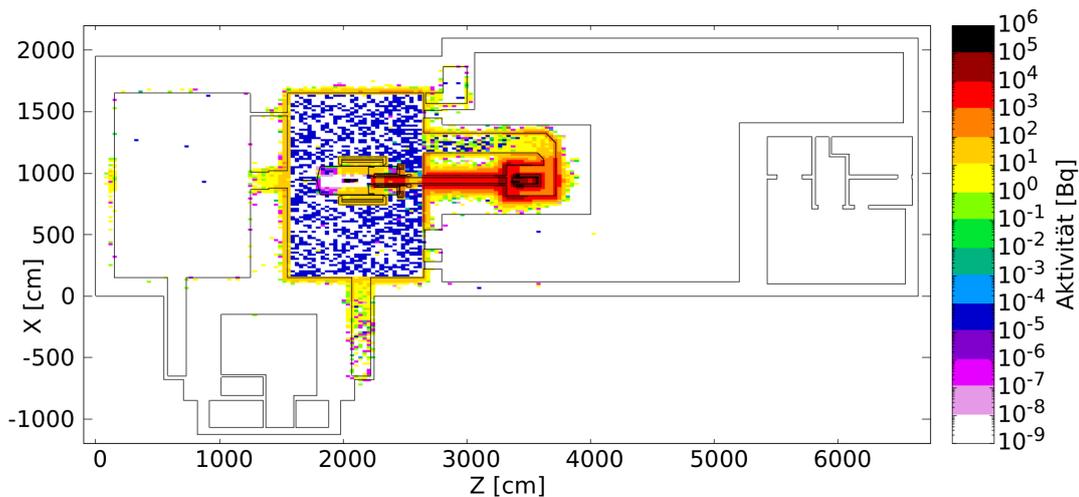


Abbildung 5.8.: Aktivitätsverteilung zum Zeitpunkt $t_a = 1h$

Anhand der Abbildung ist erkennbar, dass die größten Aktivitäten im Beamdump und in dem hinteren Teil des P2-Experiments zu finden sind. Außerdem wird sichtbar, dass die Wände in der Experimentierhalle 2 zumindest oberflächlich aktiviert werden. Die Aktivität in der Luft sollte durch den Luftaustausch nach spätestens einer Stunde nicht mehr vorhanden sein.

Die nächste Grafik stellt die Aktivitätsverteilung nach 4 Wochen Abklingzeit dar:

5. Remanente Radioaktivität

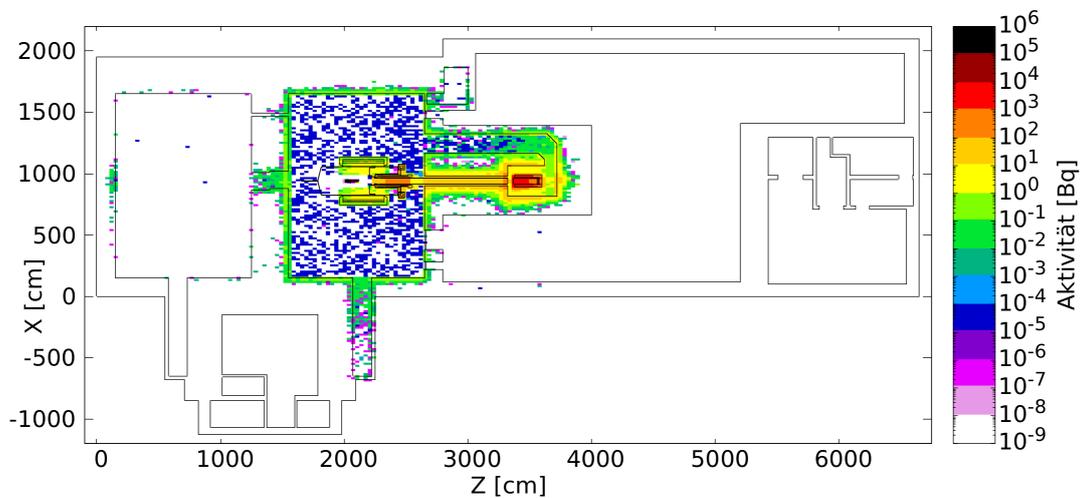


Abbildung 5.9.: Aktivitätsverteilung zum Zeitpunkt $t_a = 1d$

Nach vier Wochen Abklingzeit sind die Aktivitäten stark zurückgegangen. Der Grund hierfür ist, dass nach dieser Zeitspanne viele kurzlebige Isotope nicht mehr existieren. Gleichzeitig ist festzustellen, dass sich die Aktivitätsverteilung nach einer Woche Abklingzeit (siehe Anhang A.45) nicht allzu stark von der vierwöchigen Abklingzeit unterscheidet. Folglich wird die ermittelte Aktivität über lange Zeit nicht stark abnehmen, da sie von langlebigen Isotopen ausgeht. Diese Aktivität steigt mit zunehmender Strahlzeit.

5.4. Erzeugte Dosisleistung

In diesem Abschnitt wird die Äquivalenzdosisleistung dargestellt, die von dem Zerfall der radioaktiven Nuklide erzeugt wird. Es folgen mehrere Grafiken, die die Dosisleistung zu unterschiedlichen Abklingzeiten zeigen. Insbesondere ist zu beachten, dass die Hallen erst ab einer Dosisleistung von unter $1 \frac{\mu\text{Sv}}{\text{h}}$ betreten werden dürfen.

Die erste Grafik stellt die Dosisleistung direkt nach Abschalten des Beschleunigers dar:

5. Remanente Radioaktivität

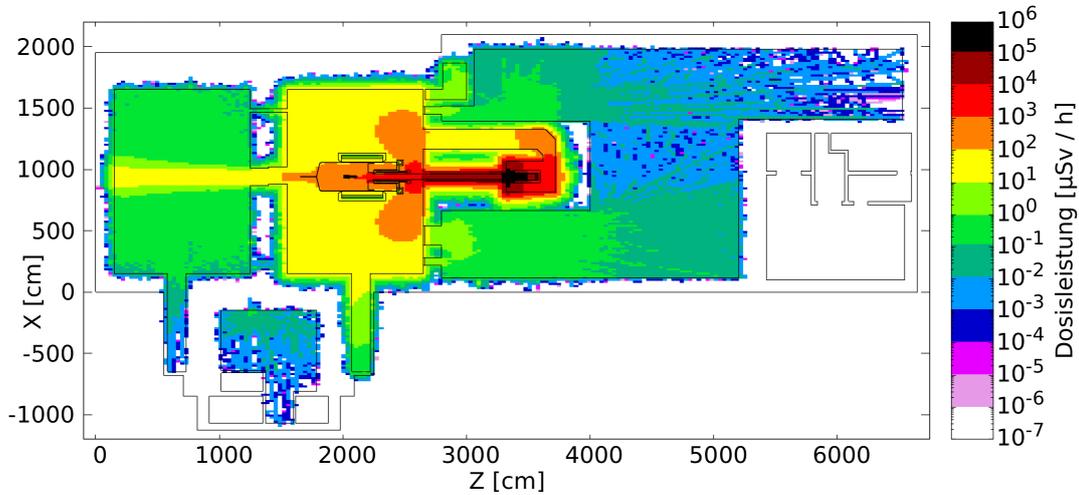


Abbildung 5.10.: Äquivalenzdosisleistung zum Zeitpunkt $t_a = 0h$

Eine große Dosisleistung geht von dem Beamdump aus. Um das P2-Experiment herum ist die Dosisleistung mit 100 bis 1000 $\frac{\mu\text{Sv}}{\text{h}}$ um eine Größenordnung größer als im restlichen Raum. Es kann keine Person direkt nach Abschalten des Strahls in die Experimentierhallen, da die Dosisleistung dort zu groß ist. Auffällig in dieser Grafik ist auch, dass radioaktive Nuklide in der Verladehalle Ost produziert werden. Die Dosisleistung in der Verladehalle Ost beträgt maximal 1 $\frac{\mu\text{Sv}}{\text{h}}$.

Die nächste Grafik zeigt die Dosisleistung nach einer Stunde Abklingzeit:

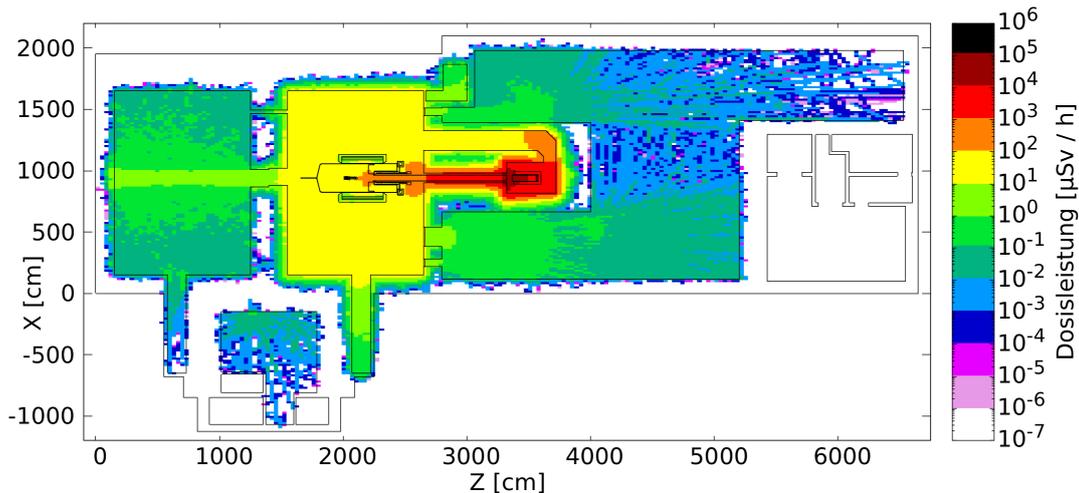


Abbildung 5.11.: Äquivalenzdosisleistung zum Zeitpunkt $t_a = 1h$

Nach einer Stunde Abklingzeit hat sich die Dosisleistung nur leicht verringert. Bei einem Level von 10 bis 100 $\frac{\mu\text{Sv}}{\text{h}}$ ist es immer noch nicht möglich, die

5. Remanente Radioaktivität

Experimentierhalle 2 zu betreten. Auch die Dosisleistung in der Verladehalle Ost ist unverändert vorhanden. Die Dosisleistung des Strahls, der durch die Öffnung zwischen Experimentierhalle 2 und 3 in Letztere gelangt, ist um eine Größenordnung auf maximal $10 \frac{\mu\text{Sv}}{\text{h}}$ gesunken.

Die folgende Grafik stellt die Experimentierhallen nach einem Tag Abklingzeit dar:

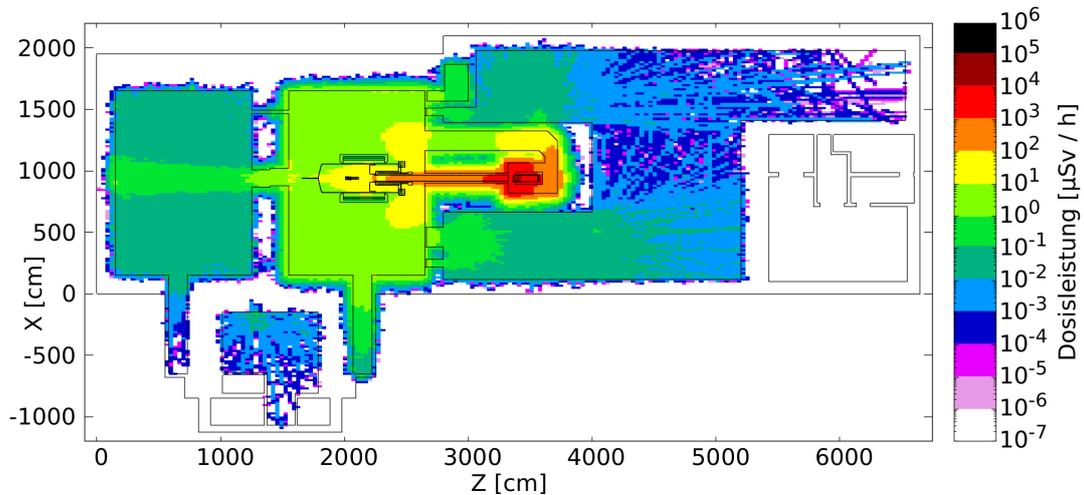


Abbildung 5.12.: Äquivalenzdosisleistung zum Zeitpunkt $t_a = 1d$

Nach einem Tag Abklingzeit ist die Dosisleistung insgesamt um etwa eine Größenordnung gesunken. In der Experimentierhalle 1 fällt sie unter $1 \frac{\mu\text{Sv}}{\text{h}}$. Die Halle kann somit wieder betreten werden.

Die nächsten zwei Grafiken zeigen die Situation nach einer und vier Wochen Abklingzeit:

5. Remanente Radioaktivität

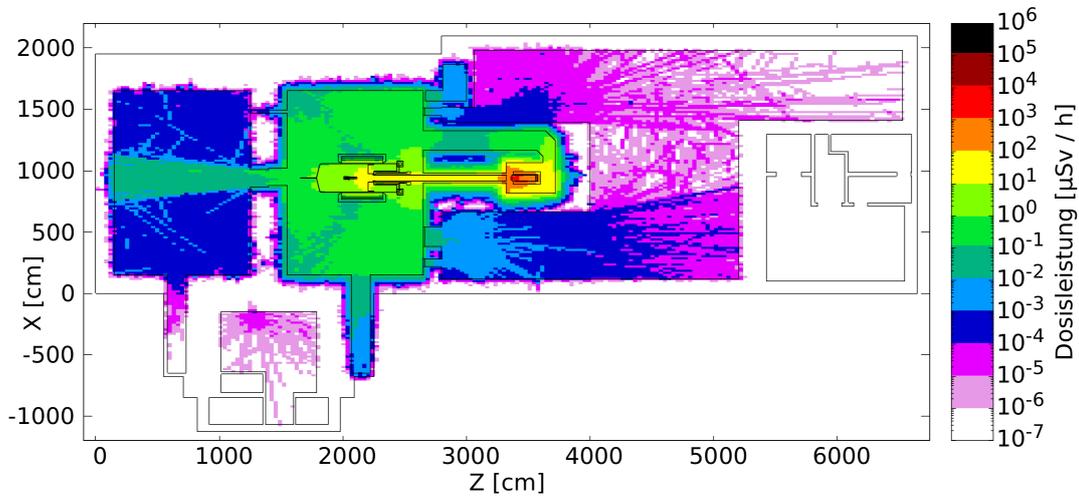


Abbildung 5.13.: Äquivalenzdosisleistung zum Zeitpunkt $t_a = 1w$

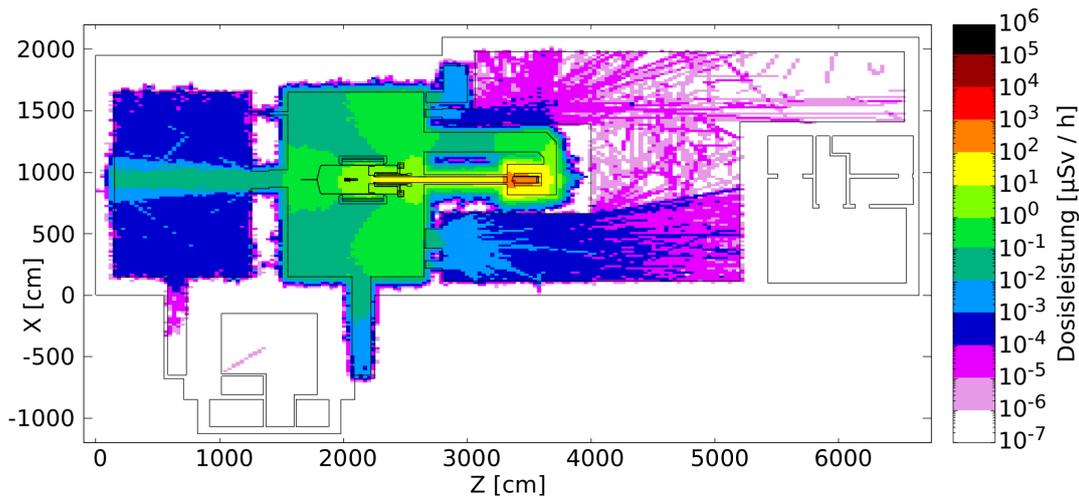


Abbildung 5.14.: Äquivalenzdosisleistung zum Zeitpunkt $t_a = 4w$

Nach einer Woche Abklingzeit ist die Dosisleistung in der Experimentierhalle 2 auf unter $1 \frac{\mu\text{Sv}}{\text{h}}$ gesunken. Eine Ausnahme bildet der Bereich direkt vor dem Beamdump. Hier herrscht noch eine Dosisleistung von über $1 \frac{\mu\text{Sv}}{\text{h}}$. Die Experimentierhalle 3 ist nach einer Woche Abklingzeit wieder betretbar.

Bei der Betrachtung der Aktivitätsverteilung wurde bereits festgestellt, dass zwischen einer und vier Wochen Abklingzeit keine großen Änderungen in der Aktivität auffallen. Dasselbe ist auch im Fall der Dosisleistung zu erkennen.

5.5. **Fazit**

Mit Hilfe der Simulationen wurde das Ausmaß der remanenten Radioaktivität, die durch das P2-Experiment erzeugt wird, ermittelt. Die Isotope Natrium-22 und Europium-152 stellen den Strahlenschutz aufgrund ihrer Langlebigkeit und ihrer Produktionsraten in Höhe von $5,84 \cdot 10^{16} \frac{1}{2w}$ sowie $2,94 \cdot 10^{17} \frac{1}{2w}$ radioaktiven Kernen vor eine Herausforderung.

Die Aktivierungskonzentration in der Abluft überschreitet mit 71,9 bis $89,5 \frac{\text{kBq}}{\text{h}}$ den erlaubten Jahresmittelwert von $80 \frac{\text{kBq}}{\text{h}}$. Eine Möglichkeit diese zu reduzieren, wäre den Beamdump während des Betriebs des Beschleunigers nicht bzw. nur teilweise zu lüften.

Die Simulation der Aktivitätsverteilung zeigt, dass die größte Aktivität in dem Beamdump über 1 MBq beträgt. Im Gamma-Schild erreicht sie einen Wert von 10 kBq.

Die Äquivalenzdosisleistung beträgt nach einer Bestrahlungsdauer von zwei Wochen und einer Abklingzeit von vier Wochen in der Nähe des Experiments noch über $1 \frac{\mu\text{Sv}}{\text{h}}$. Arbeiten am Experiment können in diesem Zeitraum daher nur unter besonderen Auflagen und einer Überwachung der Ortsdosisleistung durchgeführt werden. Die Experimentierhallen 1 und 3 können hingegen nach einer Woche wieder ohne besondere Vorkehrungen betreten werden, da die vom Strahlenschutz vorgegebenen Grenzwerte für die Dosisleistung zu dieser Zeit unterschritten sind.

6. Weitere Simulationen

Dieses Kapitel stellt drei zusätzliche Simulationen vor. Neben dem Wasserstoff-Target soll das P2-Experiment mit drei weiteren Targets durchführbar sein. Bei diesen handelt es sich um ein Kohlenstoff-, ein Blei- und ein Deuterium-Target.

Für jedes Target wird eine Simulation durchgeführt. Diese verschafft einen ersten Eindruck der strahlenschutztechnischen Probleme.

6.1. Kohlenstoff-Target

Das Kohlenstoff-Target besteht aus fünf 44 mm dicken Platten, die in Abständen von 36 mm hintereinander platziert sind. Insgesamt ist das Target damit 2,2 cm lang. Dies entspricht 11,6 % der Strahlungslänge von Kohlenstoff. Das Target befindet sich in der identischen Position wie das Wasserstoff-Target. Das Magnetfeld des Solenoiden wird hierbei nur mit 60 % der Feldstärke betrieben. Die Energie der Elektronen wird für diese Simulation auf 150 MeV gesenkt.

Die folgenden Grafiken zeigen die Dosisleistung über einen Meter um die Strahlhöhe gemittelt:

6. Weitere Simulationen

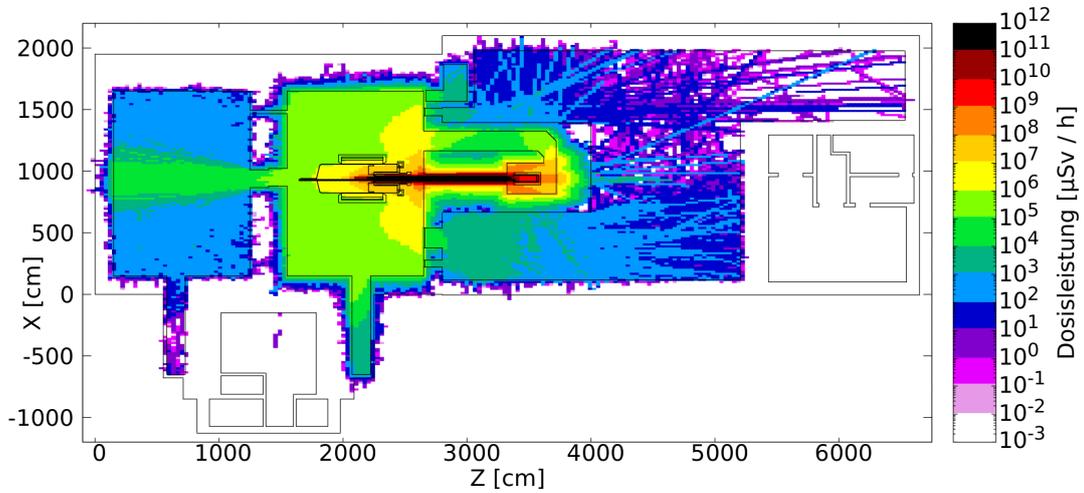


Abbildung 6.1.: Äquivalenzdosisleistung während des Strahlbetriebs. Die Dosisleistung wird über einen Meter um die Strahlhöhe gemittelt.

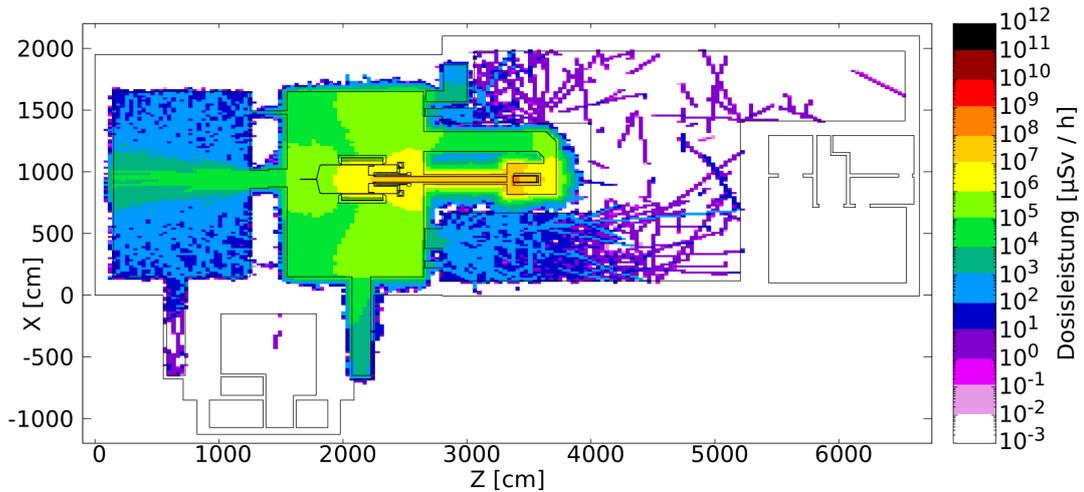


Abbildung 6.2.: Äquivalenzdosisleistung der Neutronen während des Strahlbetriebs. Die Dosisleistung wird über einen Meter um die Strahlhöhe gemittelt.

In der oberen Grafik ist ersichtlich, dass die Äquivalenzdosisleistung in der Experimentierhalle 2 im Vergleich zu der Simulation mit dem Wasserstoff-Target um etwa eine Größenordnung auf über $100 \frac{\text{mSv}}{\text{h}}$ gestiegen ist. Des Weiteren hat sie sich in Experimentierhalle 1 ebenfalls um etwa eine Größenordnung erhöht und beträgt bis zu $10 \frac{\text{mSv}}{\text{h}}$.

In der unteren Grafik hat sich die hell-grüne Fläche im Vergleich zur Simulation mit dem Wasserstoff-Target ausgeweitet. Die Neutronen-Äquivalenzdosis erhöht sich ebenfalls um eine Größenordnung.

6.2. Blei-Target

Das Blei-Target ist eine 0,25 mm dicke Platte, die 70 cm vor dem Mittelpunkt des Solenoiden platziert ist. Die Dicke entspricht 4,4 % der Strahlungslänge von Blei.

Die folgenden Grafiken stellen die Dosisleistung über einen Meter um die Strahlhöhe gemittelt dar:

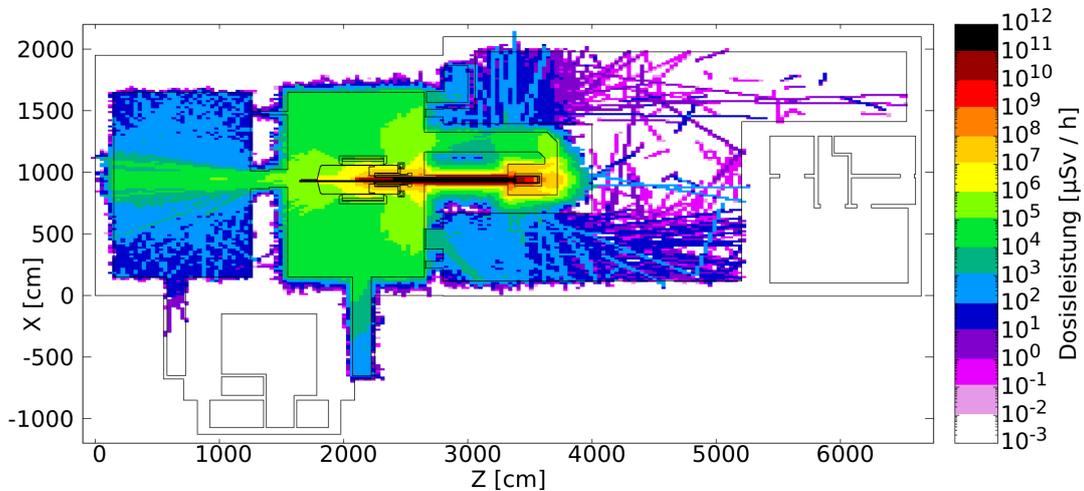


Abbildung 6.3.: Äquivalenzdosisleistung während des Strahlbetriebs. Die Dosisleistung wird über einen Meter um die Strahlhöhe gemittelt.

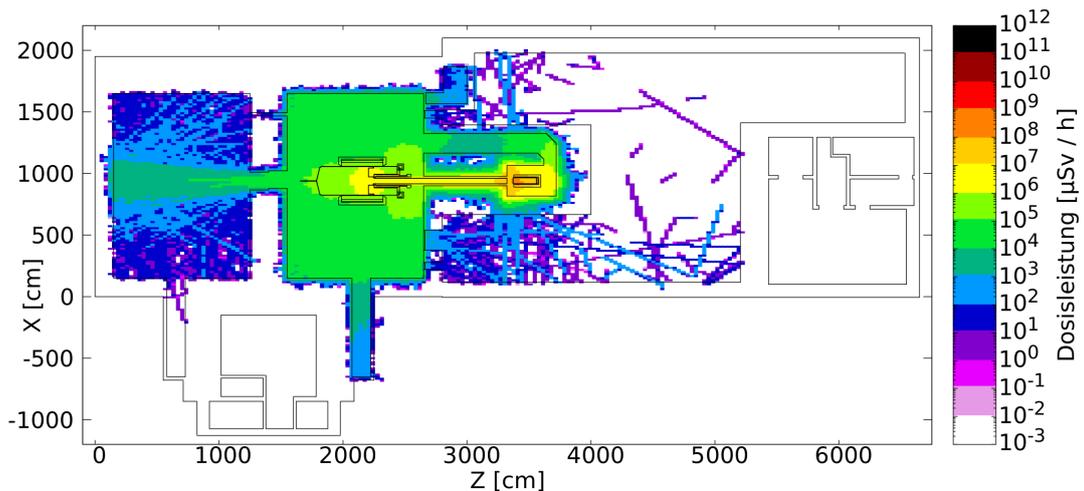


Abbildung 6.4.: Äquivalenzdosisleistung der Neutronen während des Strahlbetriebs. Die Dosisleistung wird über einen Meter um die Strahlhöhe gemittelt.

6. Weitere Simulationen

Bei Betrachtung der beiden Abbildungen sind im Vergleich zum Wasserstoff-Target keine nennenswerten Unterschiede erkennbar.

6.3. Deuterium-Target

Der Unterschied des Deuterium- zum Wasserstoff-Target besteht darin, dass Deuterium den Wasserstoff im Target ersetzt. Die 60 cm Targetlänge entspricht 8,3% der Strahlungslänge von Deuterium. Die Energie der Elektronen beträgt hierbei 105 MeV. Bei dieser Simulation bleibt das Magnetfeld abgeschaltet.

Die nachfolgenden Grafiken bilden die Dosisleistung über einen Meter um die Strahlhöhe gemittelt ab:

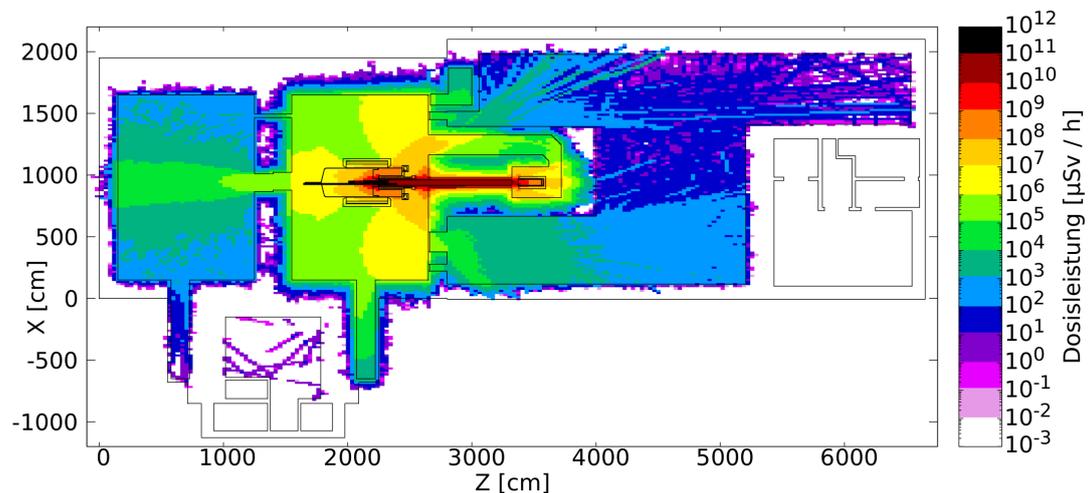


Abbildung 6.5.: Äquivalenzdosisleistung während des Strahlbetriebs. Die Dosisleistung wird über einen Meter um die Strahlhöhe gemittelt.

Diese Grafik verdeutlicht, dass sich die Äquivalenzdosisleistung in der Experimentierhalle 2 im Vergleich zu der Simulation mit dem Wasserstoff-Target um genau eine Größenordnung auf $10 \frac{\text{Sv}}{\text{h}}$ vergrößert hat. In Experimentierhalle 1 ist sie ebenfalls um eine Größenordnung auf maximal $1 \frac{\text{Sv}}{\text{h}}$ angestiegen.

6. Weitere Simulationen

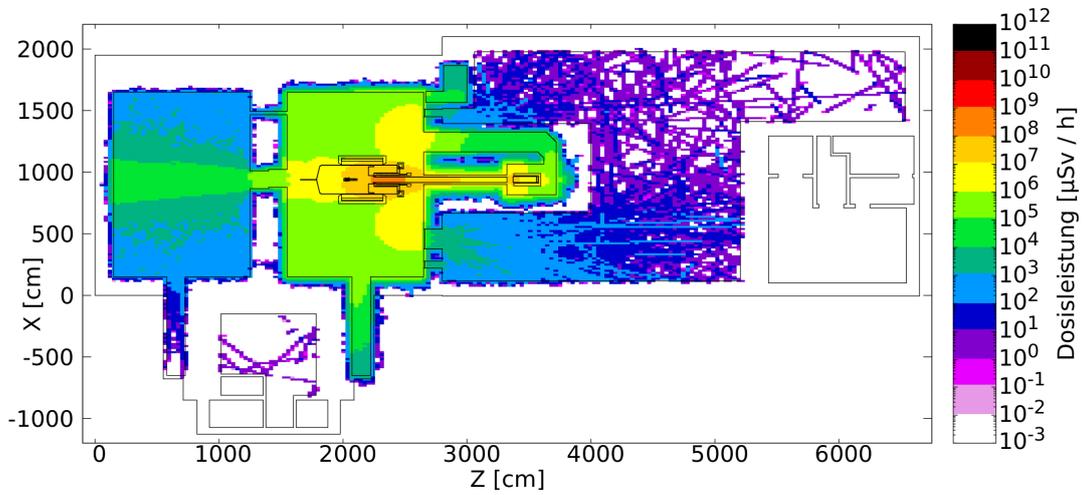


Abbildung 6.6.: Äquivalenzdosisleistung der Neutronen während des Strahlbetriebs. Die Dosisleistung wird über einen Meter um die Strahlhöhe gemittelt.

Die Neutronen-Dosisleistung in Experimentierhalle 2 ist im Vergleich zu der Simulation mit dem Wasserstoff-Target um mehr als eine Größenordnung auf maximal $10 \frac{\text{Sv}}{\text{h}}$ gestiegen. Außerdem ist ersichtlich, dass mehr Neutronen in die Experimentierhalle 1 gelangen.

7. Zusammenfassung der Ergebnisse

Die Anfertigung dieser Arbeit basiert auf der Motivation, das P2-Experiment hinsichtlich strahlenschutztechnischer Probleme zu untersuchen. Dafür wurden die Direktstrahlung sowie die remanente Radioaktivität, die das Experiment erzeugt, mit Hilfe mehrerer Simulationen bestimmt.

Die Simulationen der Direktstrahlung haben ergeben, dass keine messbare Strahlung in die Verladehallen Ost und Nord sowie in die Räumlichkeiten über der Experimentierhalle 1 gelangt.

Das Treppenhaus, das von Experimentierhalle 2 zu erreichen ist, hat sich strahlenschutztechnisch als unbedenklich erwiesen, da dort nach einer konservativen Abschätzung weniger als $100 \frac{\mu\text{Sv}}{\text{h}}$ zu erwarten ist.

Mit Hilfe der Konstruktion einer Abschirmung um den Strahlfänger sowie mobiler bzw. wieder abbaubarer Abschirmungen für den Durchgang zwischen Experimentierhalle 1 und 2 konnte die Dosisleistung in Halle 1 von $100 \frac{\text{mSv}}{\text{h}}$ auf $10 \frac{\text{mSv}}{\text{h}}$ gesenkt werden. Die Neutronen-Dosisleistung konnte von $100 \frac{\text{mSv}}{\text{h}}$ auf $1 \frac{\text{mSv}}{\text{h}}$ reduziert werden.

Aufgrund der Dosisleistungen an den Kryomodulen werden deren empfindliche Bauteile funktionsunfähig, da ab einem Grenzwert von $1 \frac{\text{mSv}}{\text{h}}$ Schäden an den Speichereinheiten auftreten.

Die Elektronenquelle ist mit einer Dosisleistung von $1 \frac{\mu\text{Sv}}{\text{h}}$ und einer Neutronen-Dosisleistung von unter $1 \frac{\text{nSv}}{\text{h}}$ einer kleineren Dosisleistung ausgesetzt. Dementsprechend nimmt die installierte Elektronik an der Elektronenquelle keinen Schaden.

Die Simulation der remanenten Radioaktivität zeigt, dass vor allem die Isotope Natrium-22 und Europium-152 auf lange Sicht in großen Mengen von $5,84 \cdot 10^{16} \frac{1}{2w}$ und $2,94 \cdot 10^{17} \frac{1}{2w}$ produziert werden.

7. Zusammenfassung der Ergebnisse

Die Aktivitätskonzentration der Abluft liegt abhängig von der Leistung der Lüftung bei 71,9 bis 89,5 $\frac{\text{kBq}}{\text{h}}$. Somit wird der Jahresmittelwert von 80 $\frac{\text{kBq}}{\text{h}}$ überschritten. Durch die Regulierung des Luftaustauschs in einzelnen Hallen besteht aber die Möglichkeit, unter diesen Grenzwert zu gelangen.

Die Aktivitätsverteilung hat ergeben, dass die größte Aktivität von 1 MBq im Beamdump vorhanden ist. Sie beträgt auch am Gamma-Schild des P2-Experiments 10 kBq.

Die Betrachtung der Äquivalenzdosisleistung, die durch den Zerfall der Radionuklide erzeugt wird, verdeutlicht, dass nach einer Bestrahlungsdauer von zwei Wochen und einer Abklingzeit von 4 Wochen in der Nähe des Experiments noch eine Dosisleistung von über 1 $\frac{\mu\text{Sv}}{\text{h}}$ vorhanden ist. Dies bewirkt, dass nur unter besonderen Auflagen und einer Überwachung der Ortsdosisleistung am P2-Experiment gearbeitet werden kann. Die remanente Dosisleistung in den Experimentierhallen 1 und 3 unterschreiten den Wert von 1 $\frac{\mu\text{Sv}}{\text{h}}$ nach einer Abklingzeit von einer Woche. Infolgedessen dürfen die Hallen nach dieser Zeit wieder ohne besondere Vorkehrungen betreten werden.

Insgesamt besteht aus strahlenschutztechnischer Sicht unter Einhaltung entsprechender Auflagen kein Hinderungsgrund für die Durchführung des P2-Experiments.

8. Ausblick

Bei Betrachtung der einzelnen Kapitel wird deutlich, dass einige für die strahlenschutztechnische Bewertung relevanten Aspekte in dieser Arbeit nicht behandelt wurden.

Beispielsweise wurde bei den Grundlagen das zweite Experiment MAGIX aufgezeigt, das denselben strahlenschutztechnischen Herausforderungen wie das P2-Experiment unterliegt. In Zuge dieser Arbeit wurde erkannt, dass Strahlung von dem P2-Experiment zu dem MAGIX-Experiment, welches sich in Experimentierhalle 3 befindet, gelangt. Demnach bleibt fraglich, welche Auswirkungen diese Strahlung für den Aufbau und den Betrieb von MAGIX hat.

Des Weiteren existiert noch keine Studie oder Arbeit zu dem Verdachtsmoment, dass Computer und Speicher durch Strahleneinwirkung funktionsunfähig werden. Dies stellt für die Planung, den Aufbau und die Inbetriebnahme von MESA jedoch ebenfalls einen relevanten Aspekt dar.

In dem letzten Kapitel dieser Arbeit wurden Simulationen zu dem P2-Experiment mit drei weiteren Targets durchgeführt. Diese haben gezeigt, dass eine größere Dosisleistung in den Hallen durch die Verwendung dieser Targets erzeugt wird. Hinsichtlich des Strahlenschutzes wird insofern eine weitere Betrachtung der Direktstrahlung und der remanenten Radioaktivität benötigt.

9. Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei all denjenigen bedanken, die mich durch ihren aufrichtigen Einsatz während der Anfertigung dieser Arbeit unterstützt haben.

Ganz besonders gilt dieser Dank meinen Betreuer Herr Professor Aulenbacher, der mir erst die Möglichkeit verschafft hat, an diesem spannenden Thema zu arbeiten zu können, und auf dessen Unterstützung und wertvolle Ratschläge immer Verlass war.

Daneben erhält Herr Professor Berger meinen Dank für die von ihm übernommene Rolle als zweiter Gutachter.

Des Weiteren bedanke ich mich bei Herr Doktor Diefenbach für die Betreuung und die vielen Hilfestellungen, ohne die ich diese Arbeit nicht hätte bewältigen können.

Ein weiterer Dank geht an Herr Heidrich für die Unterstützung in dem Umgang mit FLUKA und seinen sehr hilfreichen Ratschlägen.

Nicht zuletzt gilt ein großer Dank meinen Eltern, die mir das Studium der Physik durch ihre Unterstützung überhaupt erst ermöglichen und mir viel Freude gebracht hat.

Abschließend möchte ich mich noch bei Sophia bedanken. Obwohl es auch Momente gab, die von Frustration und Anstrengung geprägt wurden, stand sie mir immer zur Seite und fand stets die richtigen Worte, um mich zu motivieren und an meinen Zielen festzuhalten.

Literaturverzeichnis

- [1] MESA CDR2015
- [2] Offizieller Report zum P2-Experiment <https://arxiv.org/abs/1802.04759>
- [3] Die Hauptbestandteile des Beschleunigers, <http://www.mesa.uni-mainz.de/40.php>
- [4] International Commission on Radiological Protection (ICPR), “Die Empfehlungen der Internationalen Strahlenschutzkommission (ICRP) von 2007“, Herausgeber: Bundesamt für Strahlenschutz (BfS), doris.bfs.de/jspui/handle/urn:nbn:de:0221-2009082154
- [5] K. Aulenbacher, Vortrag zum Thema: “Strahlenschutz an Teilchenbeschleunigern“, Abbildung auf Folie 28: Elektromagnetischer Schauer
- [6] H. W. Patterson, R. H. Thomas, “Accelerator Health Physics“, Academic Press, Abbildungen: S. 21 (Wechselwirkung der Photonen mit Materie), S. 22 (Abschwächungskoeffizient Photonen), S. 115 (Neutronenproduktion)
- [7] Spektrum.de, Lexikon der Physik - Bremsstrahlung, <https://www.spektrum.de/lexikon/physik/bremsstrahlung/1974>
- [8] C. Mrozik, Strahlenschutz an Beschleunigern, www1.kph.uni-mainz.de/Vorlesungen/WS06/FP-Seminar/mrozik_strahlenschutz.pdf
- [9] Onmeda-Redaktion, Ionisierende Strahlung: Reichweite: Kernreaktionen, Kernphotoeffekt, https://www.onmeda.de/strahlenmedizin/ionisierende_strahlung_reichweite-kernreaktionen,-kernphotoeffekt-2413-5.html
- [10] R. E. Lapp, H. L. Andrews, “Nuclear Radiation Physics“, 2nd Edition, Prentice-Hall (1954)
- [11] B. L. Berman, F. C. Fultz, “Reviews of Modern Physics“, Bd. 47 (1975), S.713 (Übersichtsartikel zur GDR)

Literaturverzeichnis

- [12] TU Dresden, Praktikumsanleitung zum Versuch “Bildung und Zerfall radioaktiver Isotope“, Stand: 12.05.2011
- [13] Wikipedia: Zylinderspule,
<https://de.wikipedia.org/wiki/Zylinderspule>
- [14] Bedienungsanleitung von FLUKA,
<http://www.fluka.org/content/manuals/online/INDEX-fluka2011.html>
- [15] S. Heidrich, Masterarbeit, Johannes-Gutenberg-Universität Mainz, 2014
- [16] Vortrag von Niklaus Berger, Mai 2018, “Measuring the weak mixing angle with the P2-Experiment at MESA“,
<http://agberger.kph.uni-mainz.de/73.php>

A. Anhang

A.1. Magnetfeld

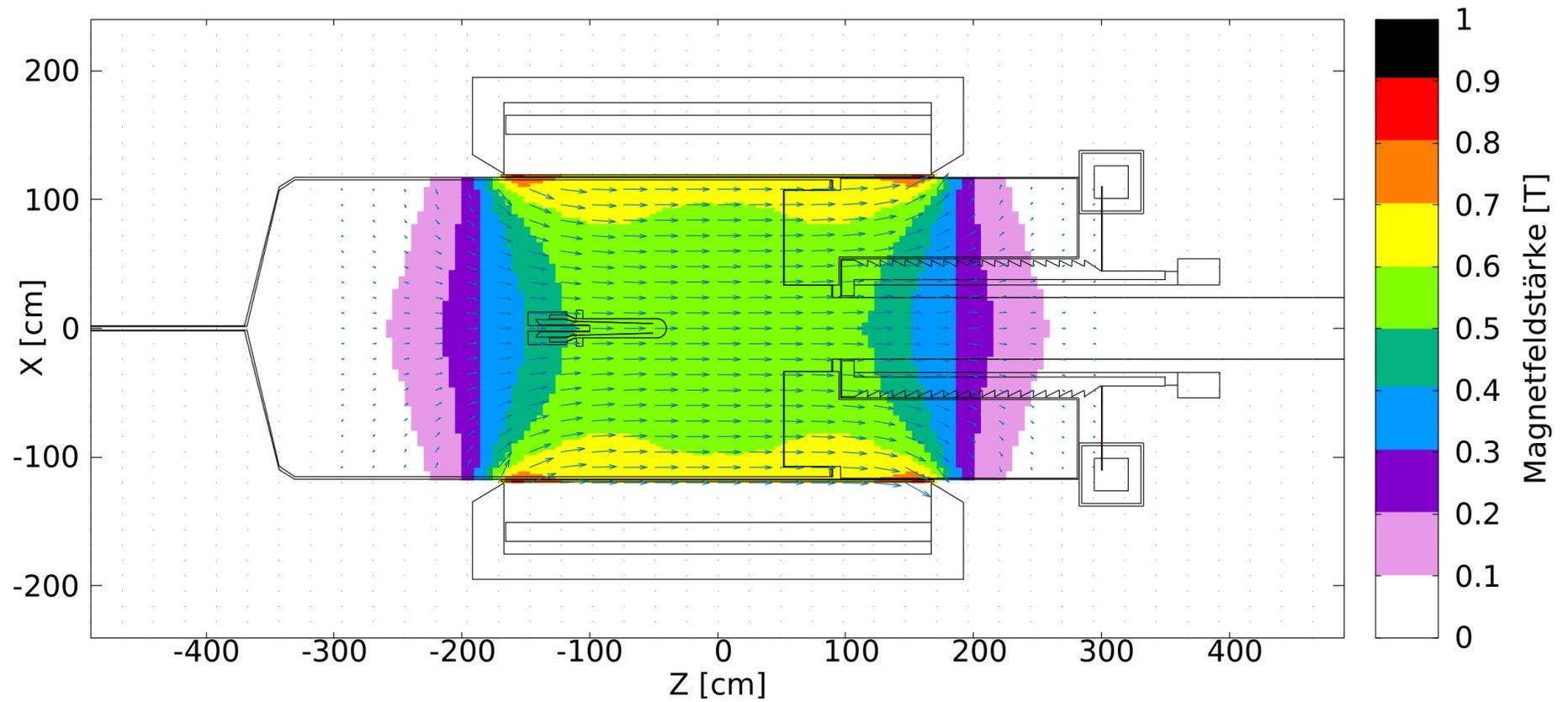


Abbildung A.1.: Das Magnetfeld des Solenoiden in FLUKA - Schnitt durch Strahlhöhe

A.2. Direktstrahlung

A.2.1. Ausgangssimulation

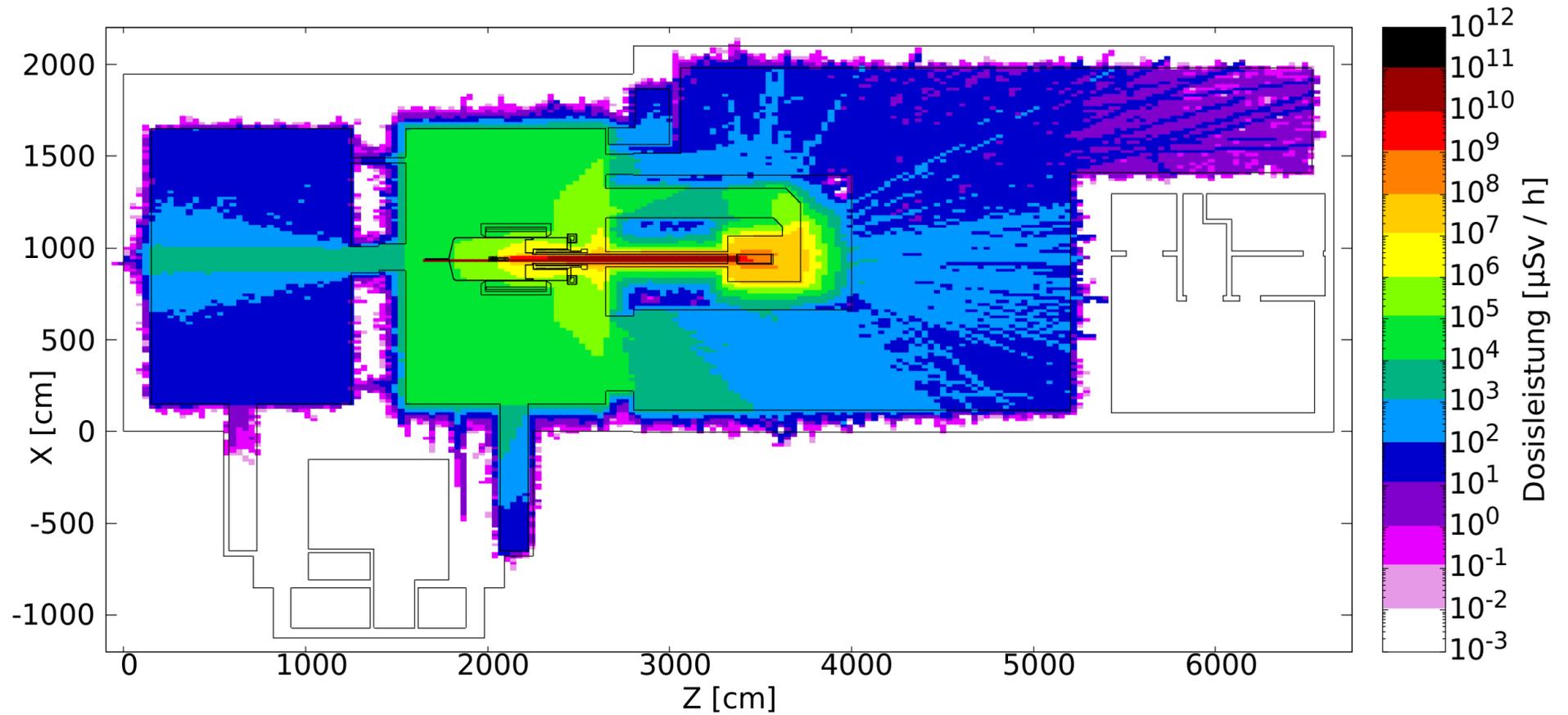


Abbildung A.2.: Äquivalenzdosisleistung während des Strahlbetriebs. Die Dosisleistung wird über die komplette Höhe der Simulation gemittelt. Die maximale Ortsdosisleistung liegt entsprechend höher.

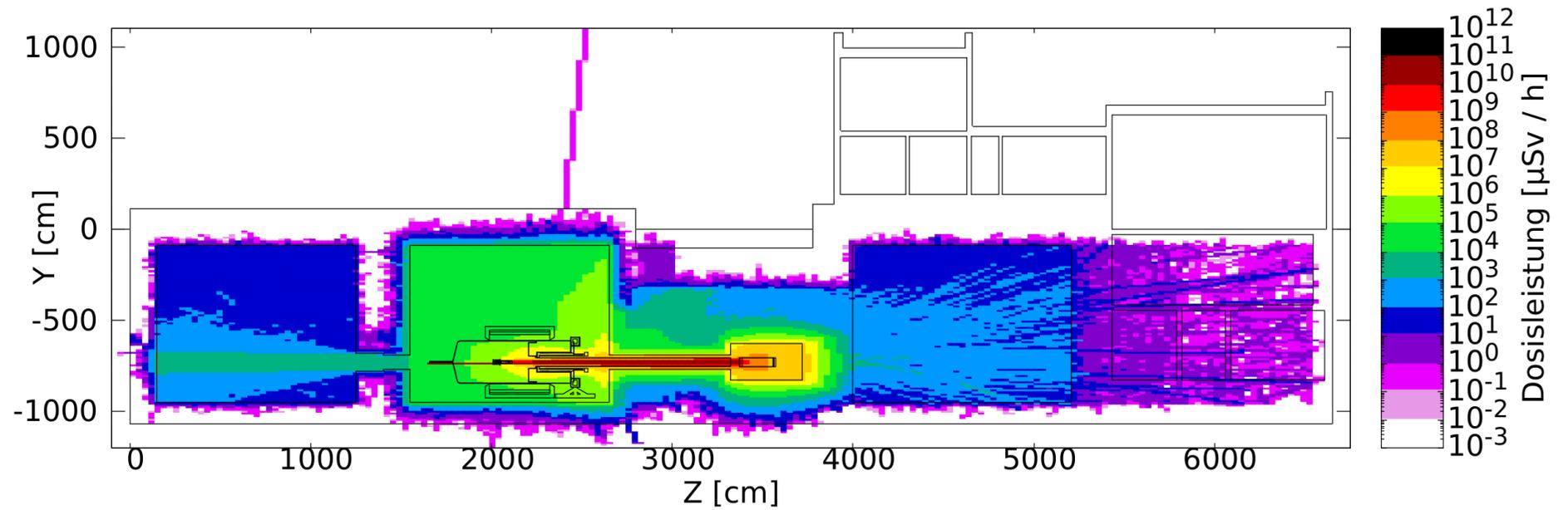


Abbildung A.3.: Äquivalenzdosisleistung während des Strahlbetriebs. Die Dosisleistung wird über die komplette Breite der Simulation gemittelt. Die maximale Ortsdosisleistung liegt entsprechend höher.

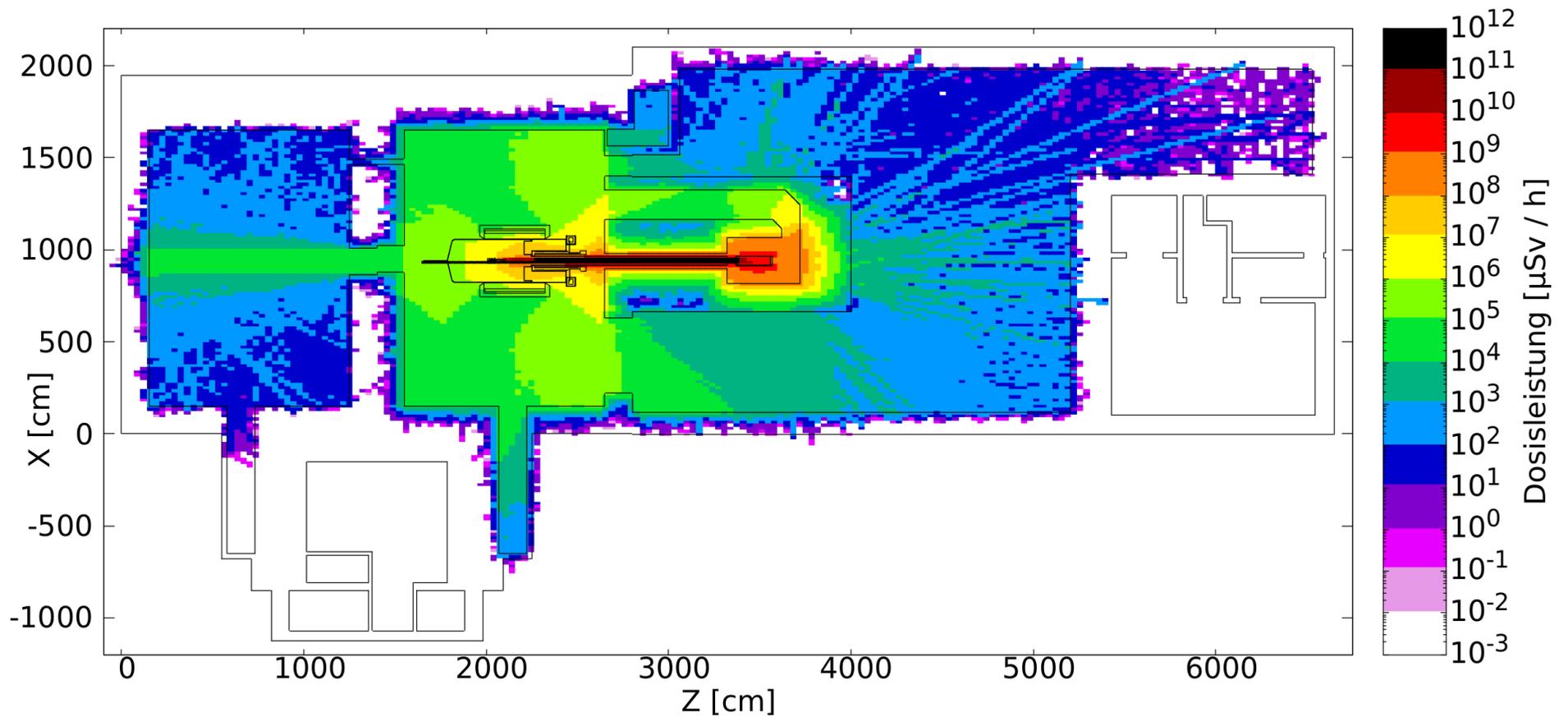


Abbildung A.4.: Äquivalenzdosisleistung während des Strahlbetriebs. Die Dosisleistung wird über einen Meter um die Strahlhöhe gemittelt.

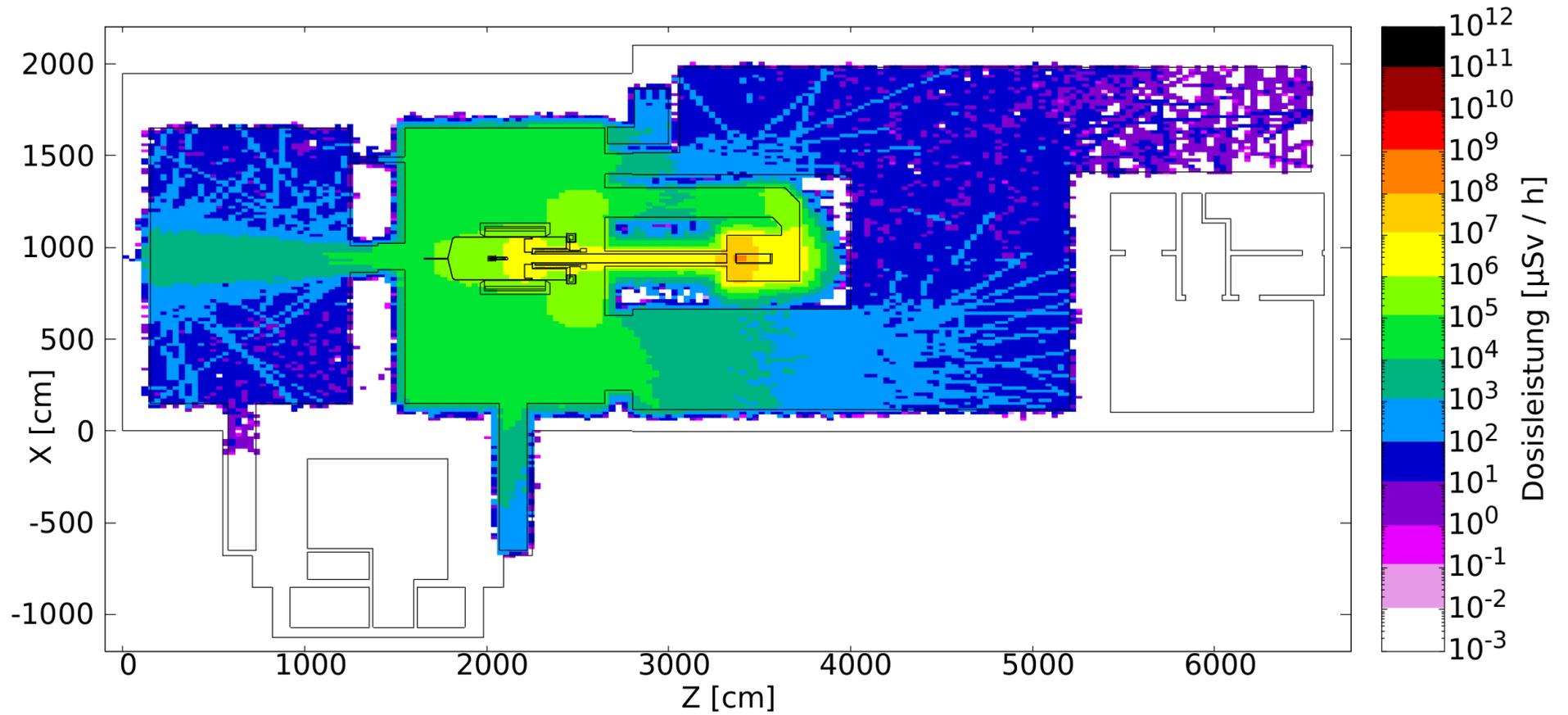


Abbildung A.5.: Äquivalenzdosisleistung der Neutronen während des Strahlbetriebs. Die Dosisleistung wird über einen Meter um die Strahlhöhe gemittelt.

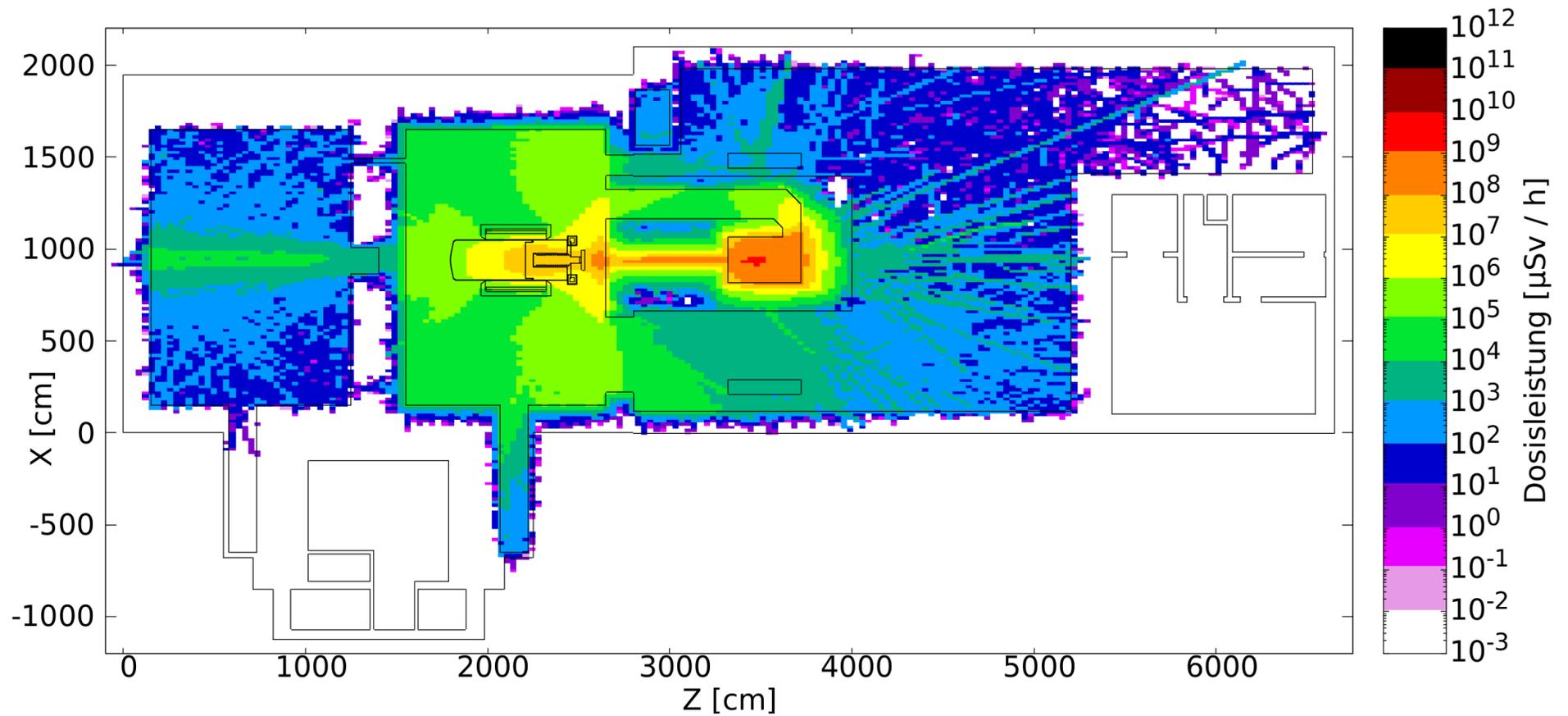


Abbildung A.6.: Äquivalenzdosisleistung während Strahlbetrieb. Die Dosisleistung wird über die Höhe des Kryomoduls gemittelt.

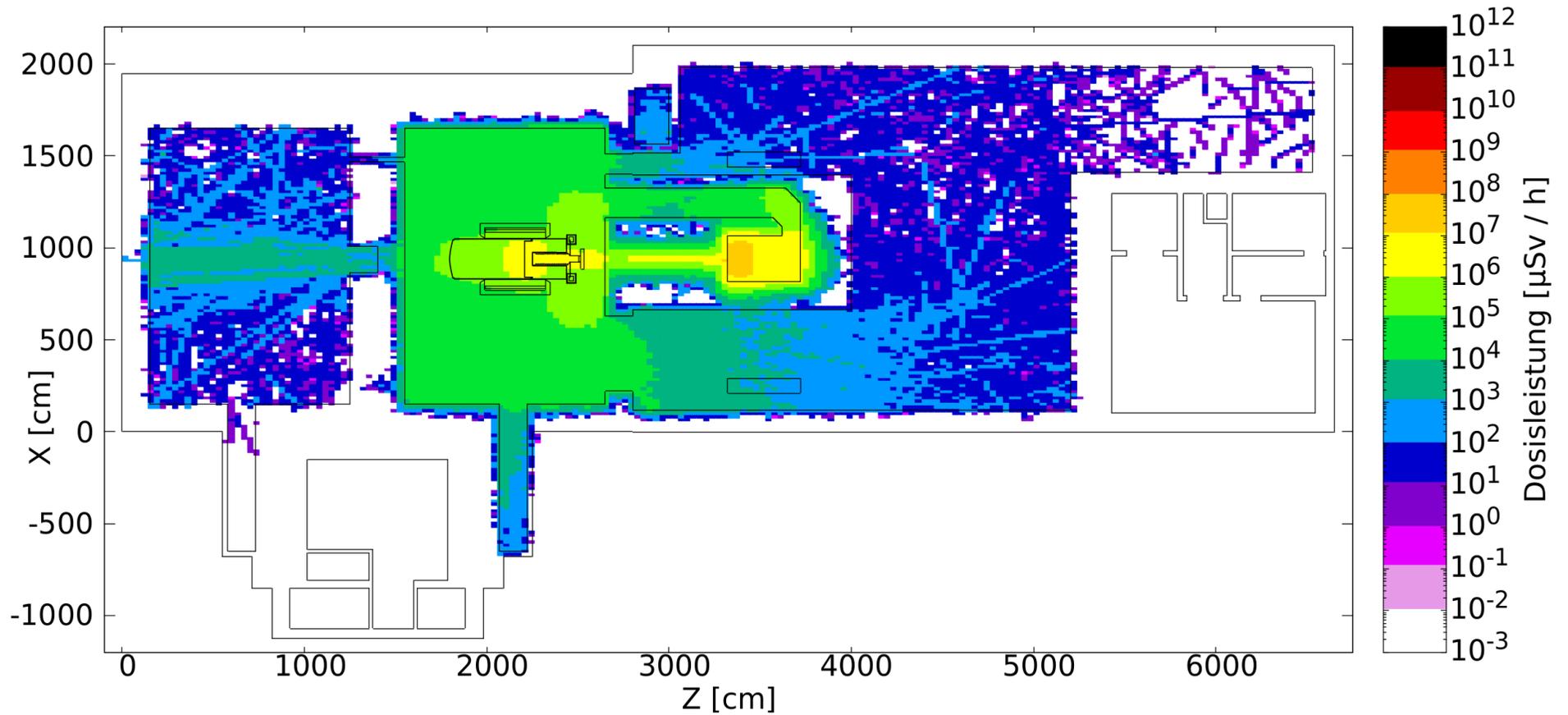


Abbildung A.7.: Äquivalenzdosisleistung der Neutronen während Strahlbetrieb. Die Dosisleistung wird über die Höhe des Kryomoduls gemittelt.

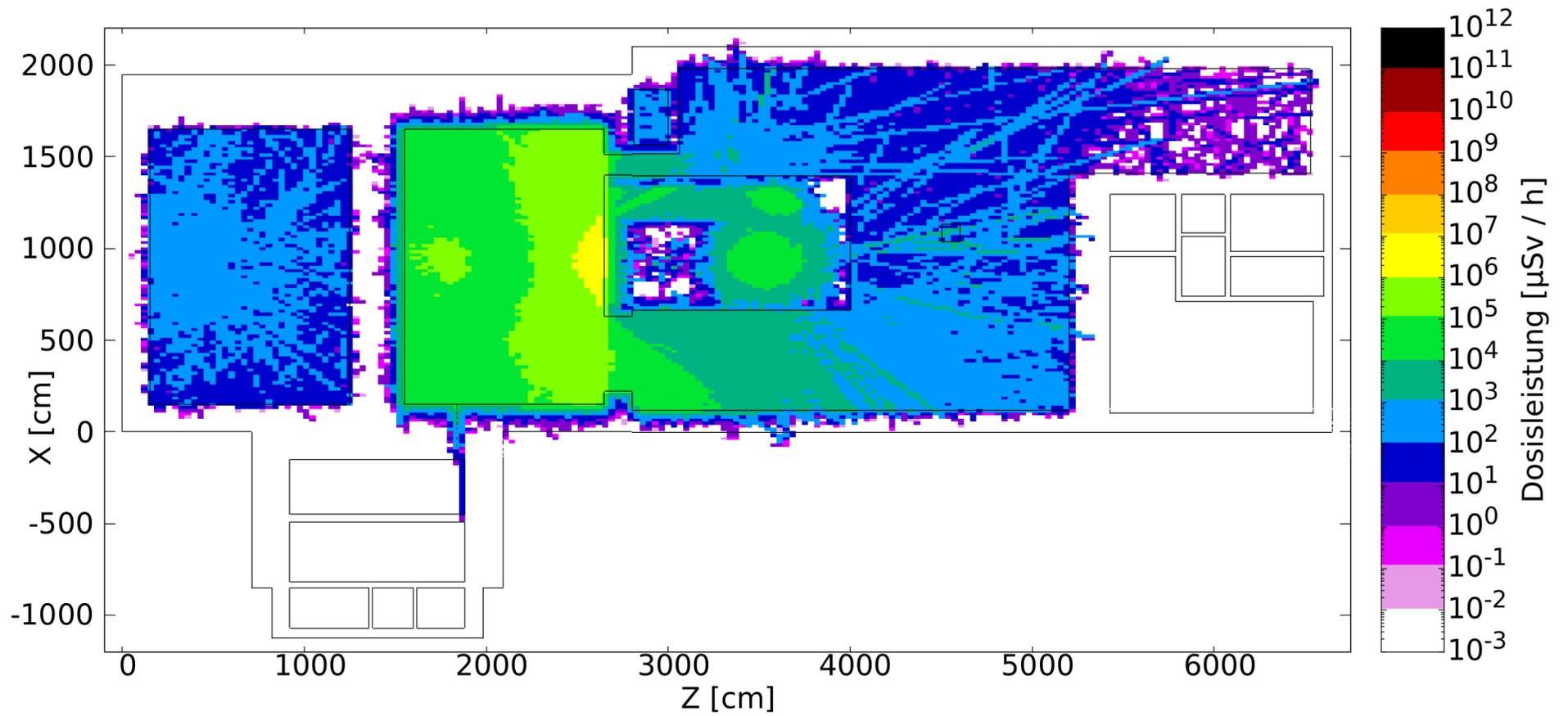


Abbildung A.8.: Äquivalenzdosisleistung während Strahlbetrieb. Die Dosisleistung wird über die Höhe der Elektronenquelle gemittelt.

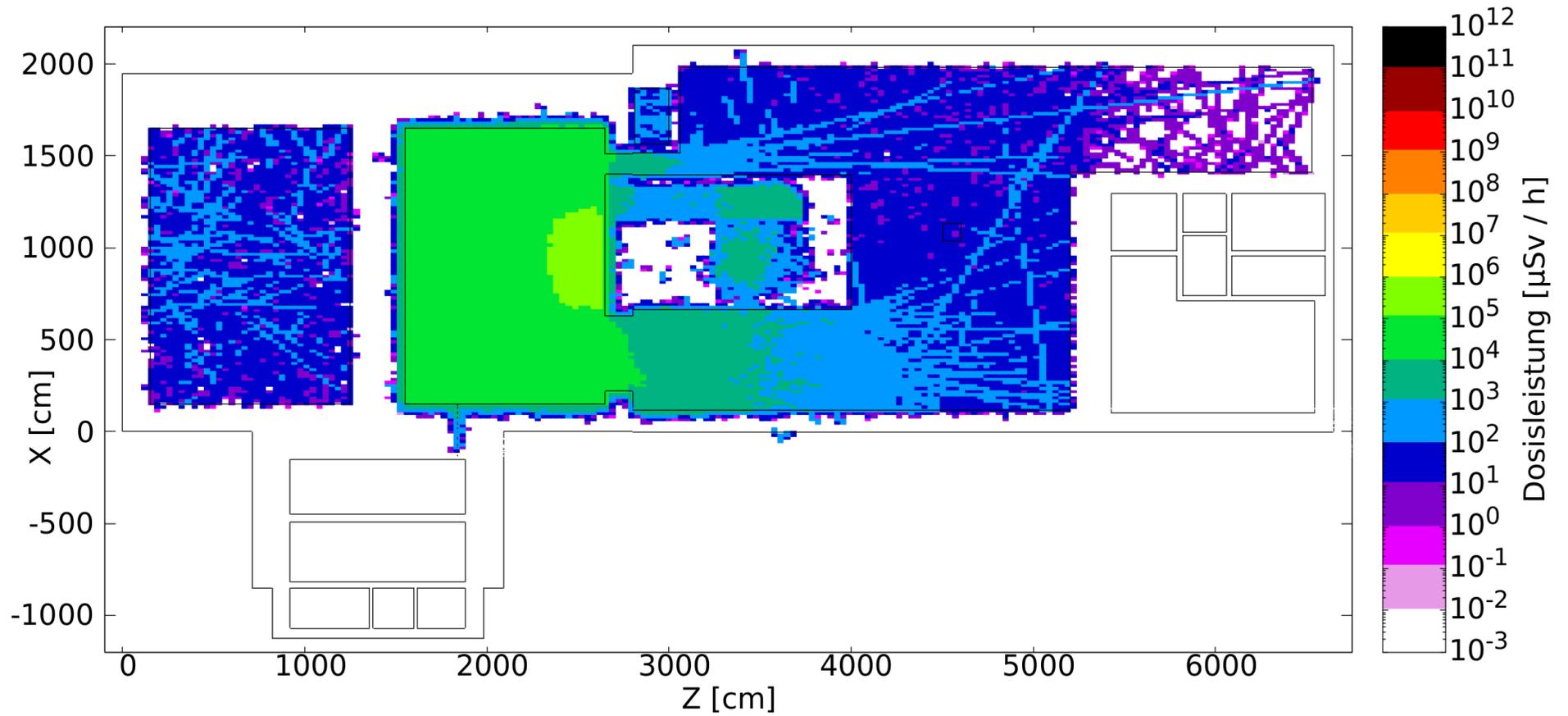


Abbildung A.9.: Äquivalenzdosisleistung der Neutronen während Strahlbetrieb. Die Dosisleistung wird über die Höhe der Elektronenquelle gemittelt.

A.2.2. Simulation Variante 1

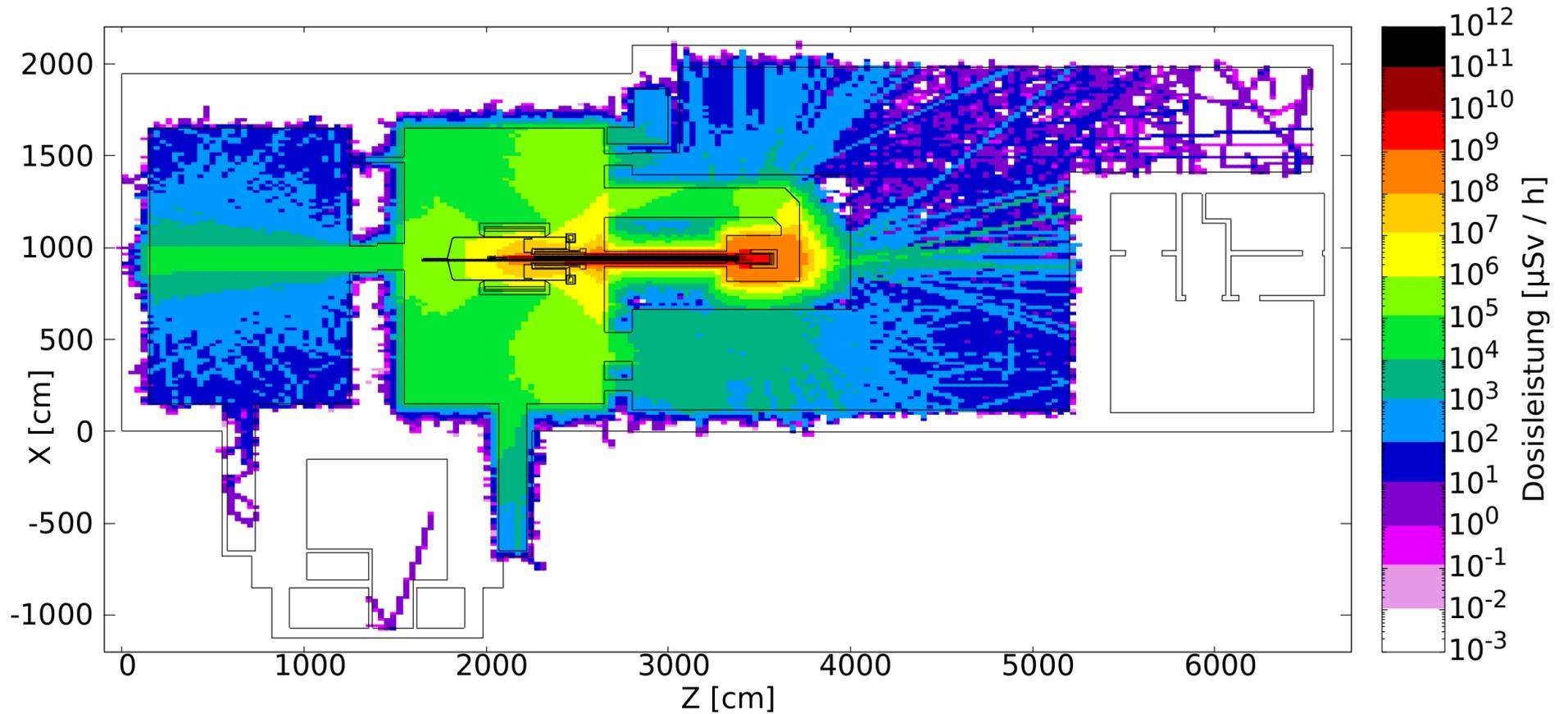


Abbildung A.10.: Äquivalenzdosisleistung der Neutronen während Strahlbetrieb. Bei der Geometrie handelt es sich um die erste Variante. Die Dosisleistung wird über die Höhe der Elektronenquelle gemittelt.

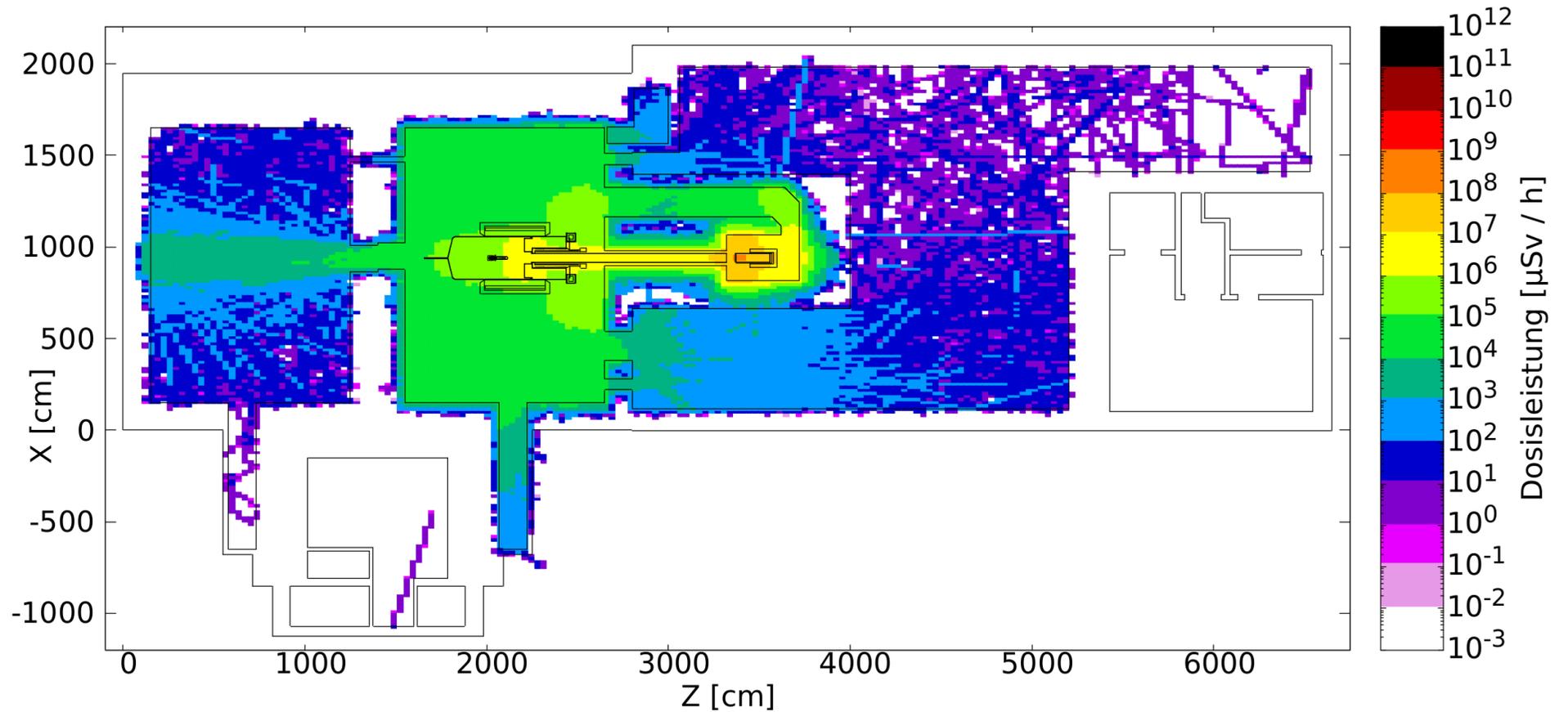


Abbildung A.11.: Äquivalenzdosisleistung der Neutronen während Strahlbetrieb. Bei der Geometrie handelt es sich um die erste Variante. Die Dosisleistung wird über die Höhe der Elektronenquelle gemittelt.

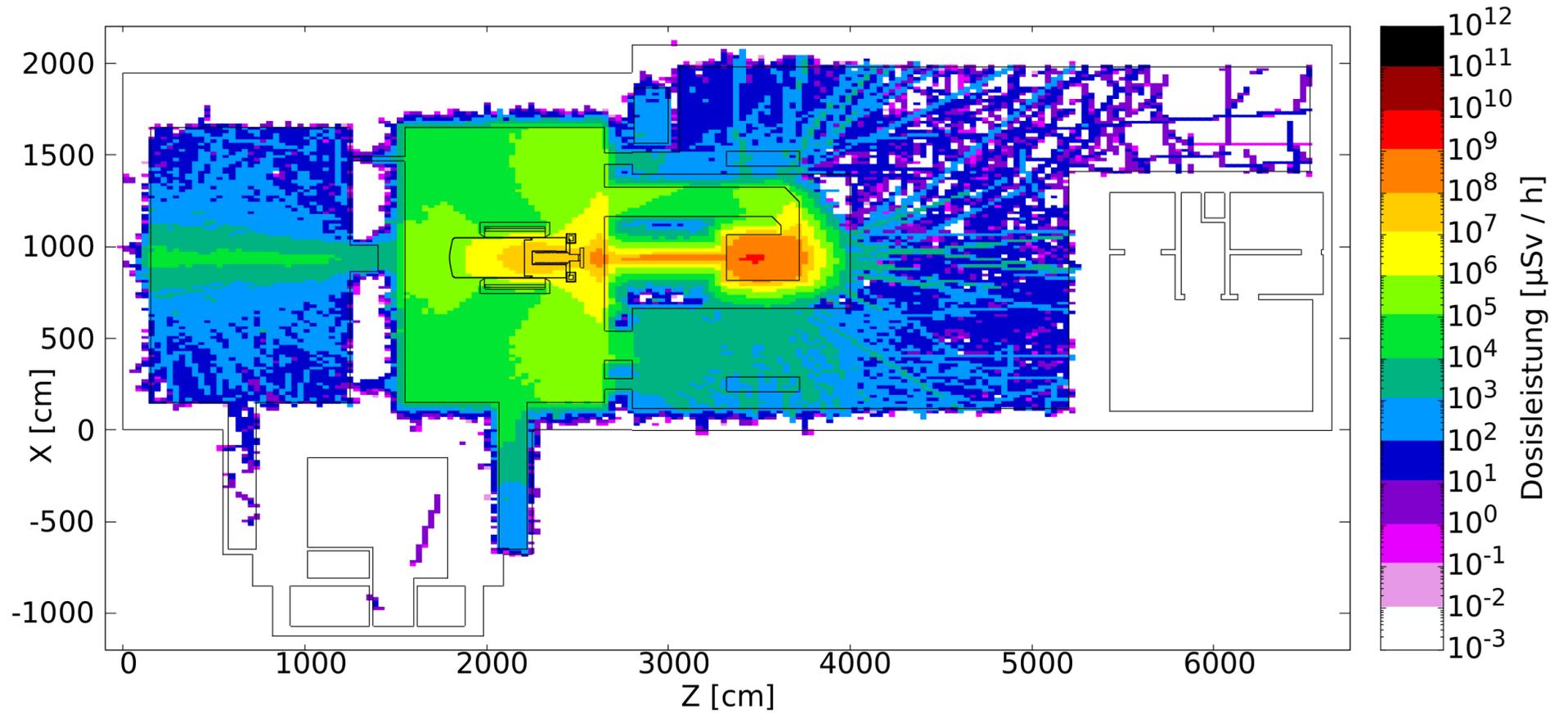


Abbildung A.12.: Äquivalenzdosisleistung während Strahlbetrieb. Die Dosisleistung wird über die Höhe der Kryomodul gemittelt.

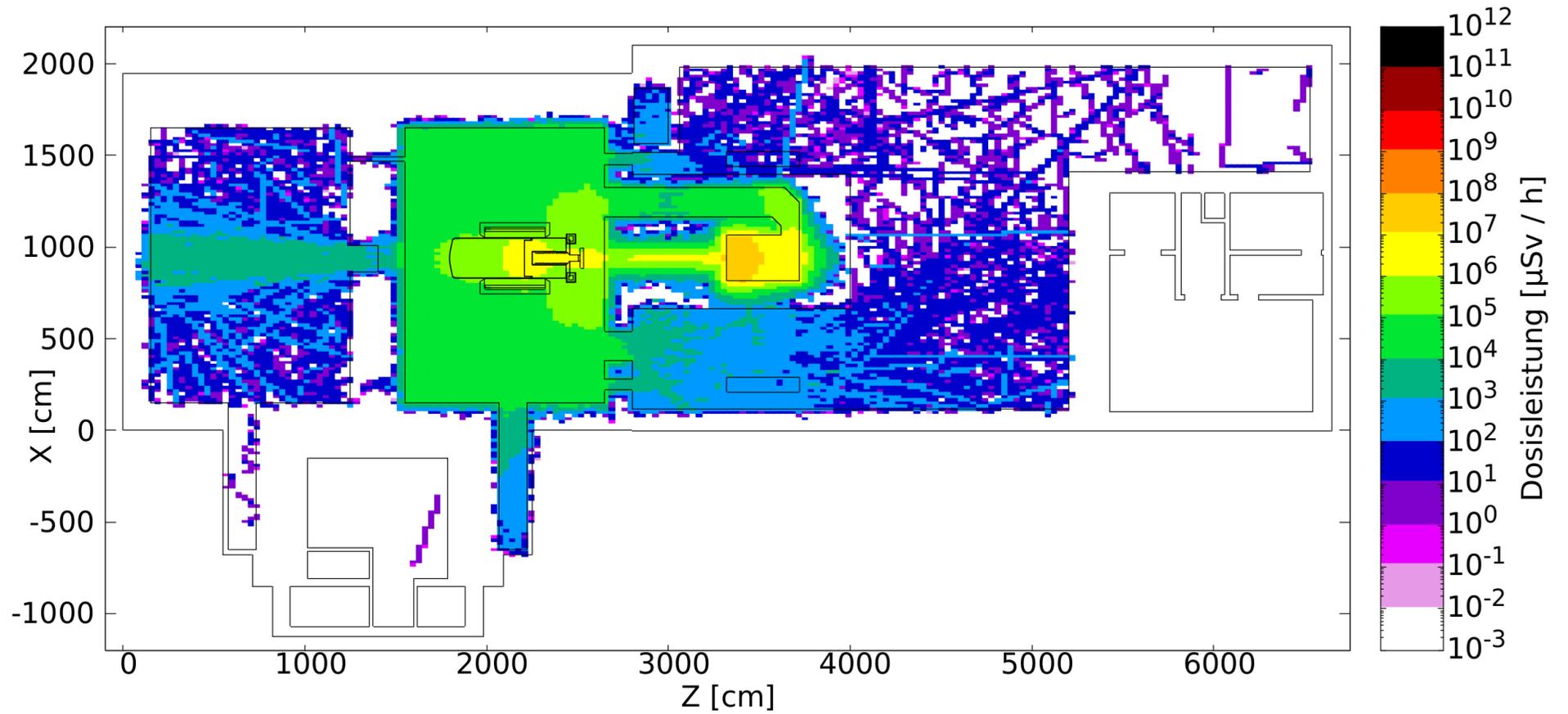


Abbildung A.13.: Äquivalenzdosisleistung der Neutronen während Strahlbetrieb. Die Dosisleistung wird über die Höhe der Kryomodul gemittelt.

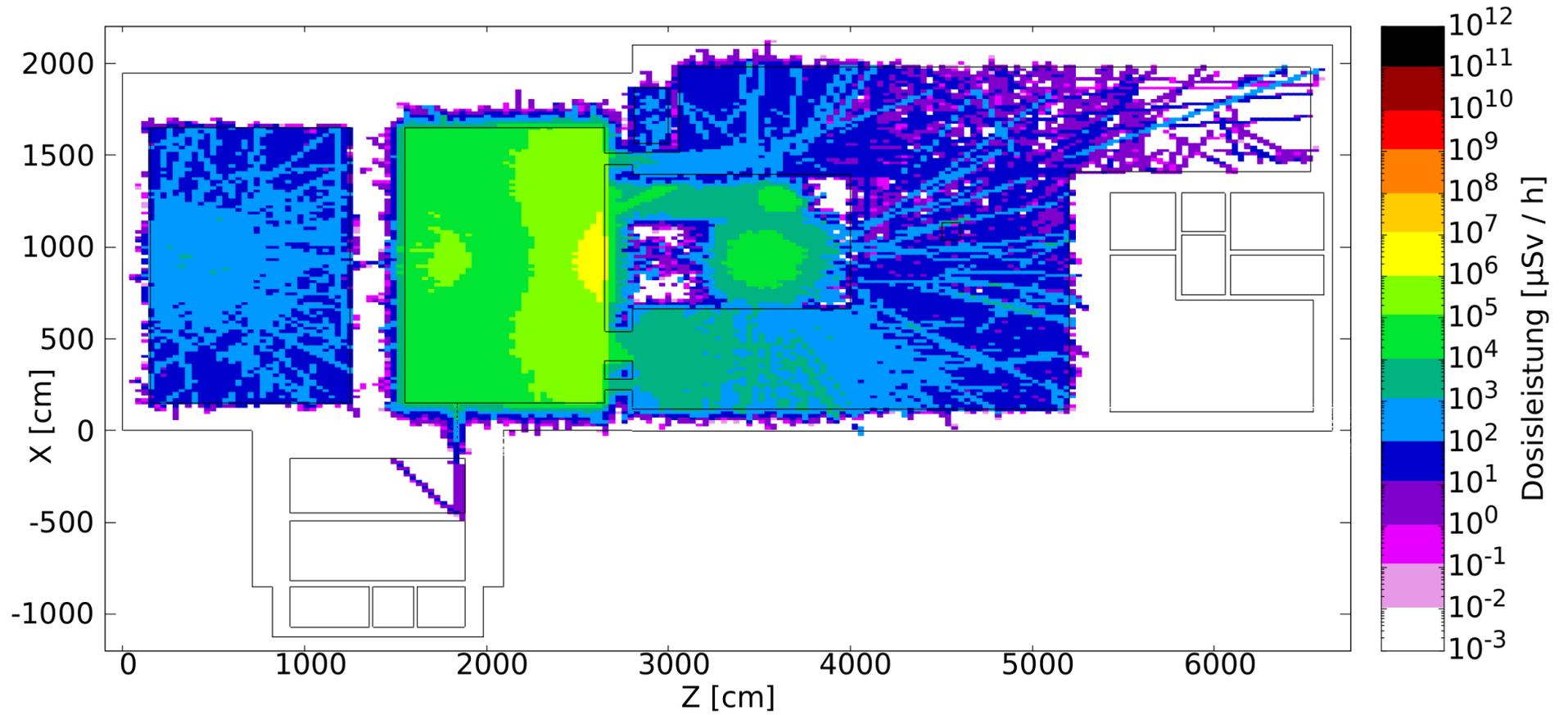


Abbildung A.14.: Äquivalenzdosisleistung während Strahlbetrieb. Die Dosisleistung wird über die Höhe der Elektronenquelle gemittelt.

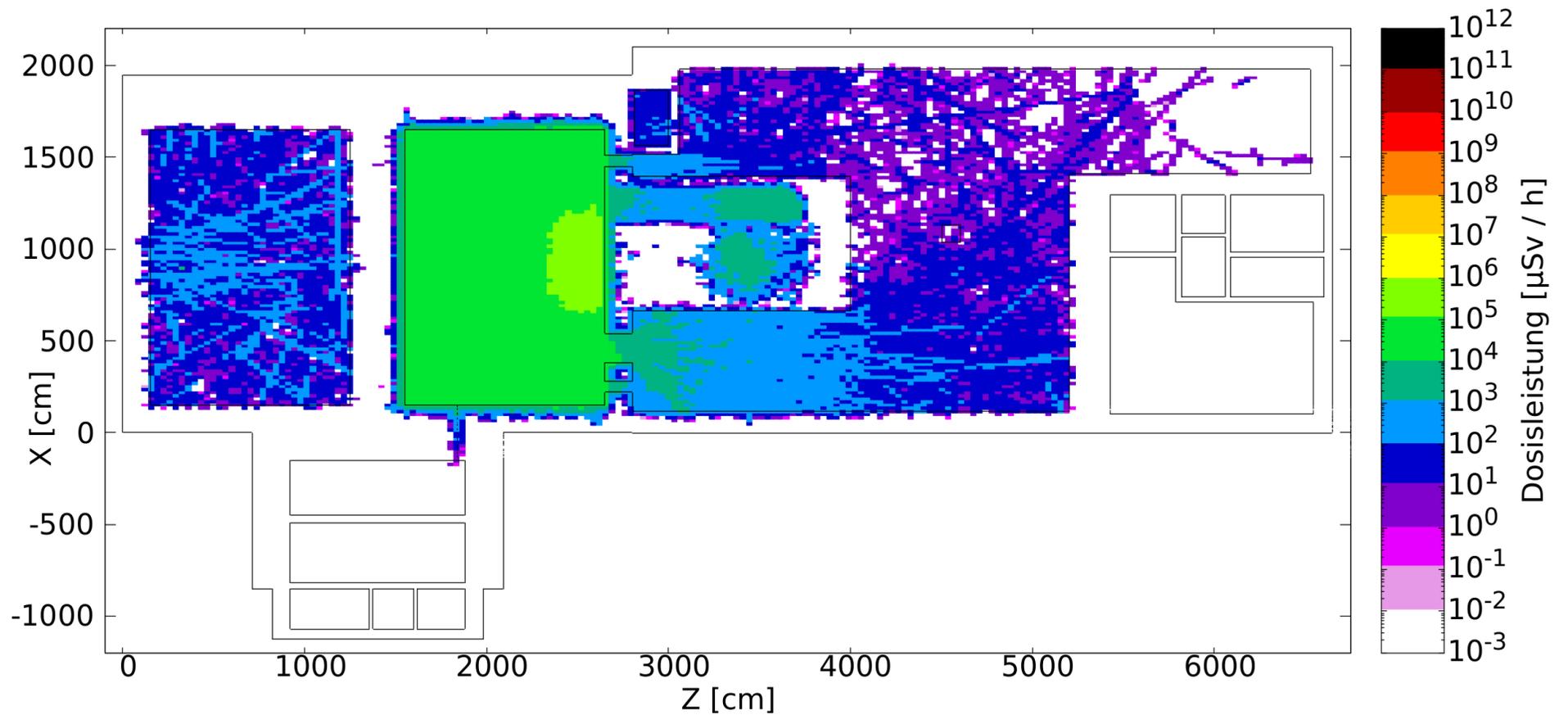


Abbildung A.15.: Äquivalenzdosisleistung der Neutronen während Strahlbetrieb. Die Dosisleistung wird über die Höhe der Elektronenquelle gemittelt.

A.2.3. Simulation Variante 2

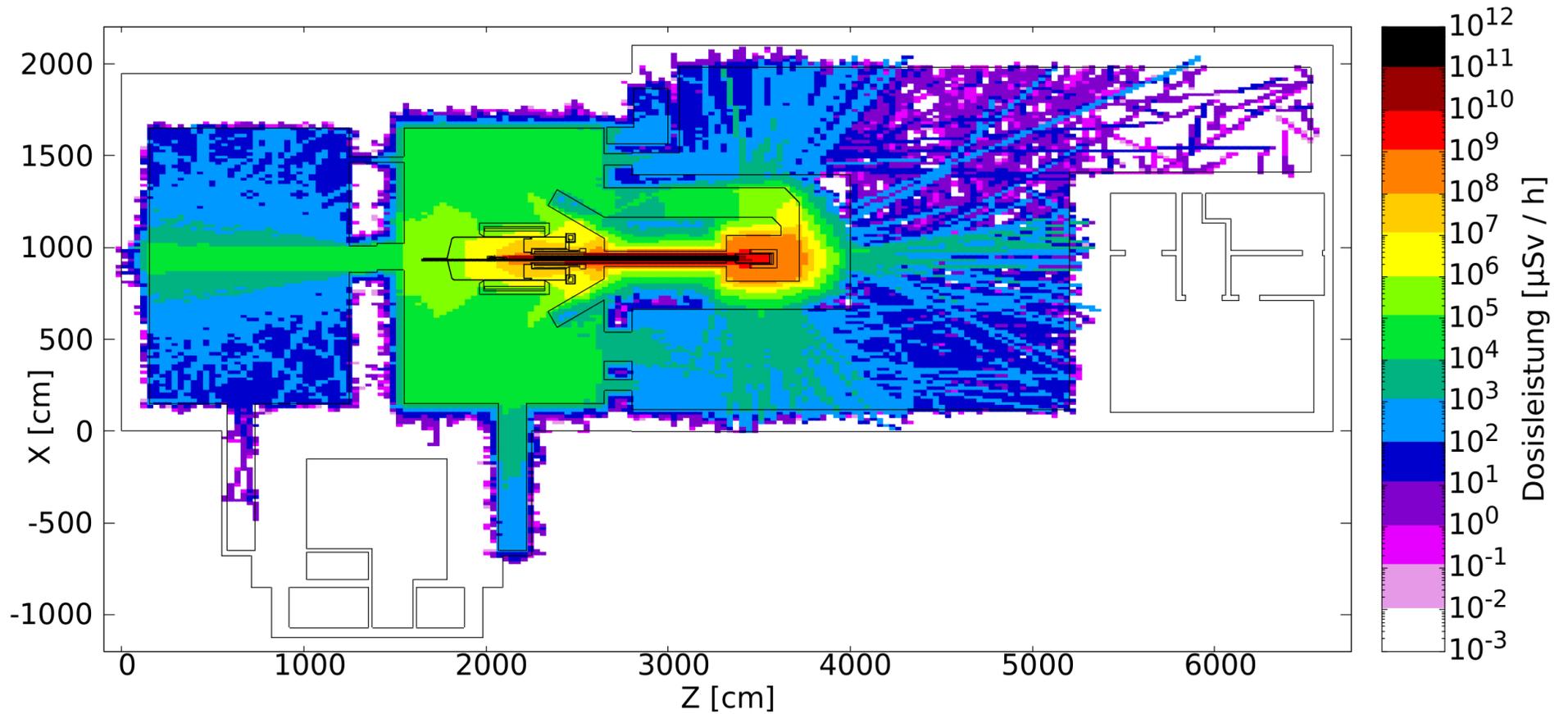


Abbildung A.16.: Äquivalenzdosisleistung der Neutronen während Strahlbetrieb. Bei der Geometrie handelt es sich um die zweite Variante. Die Dosisleistung wird über die Höhe der Elektronenquelle gemittelt.

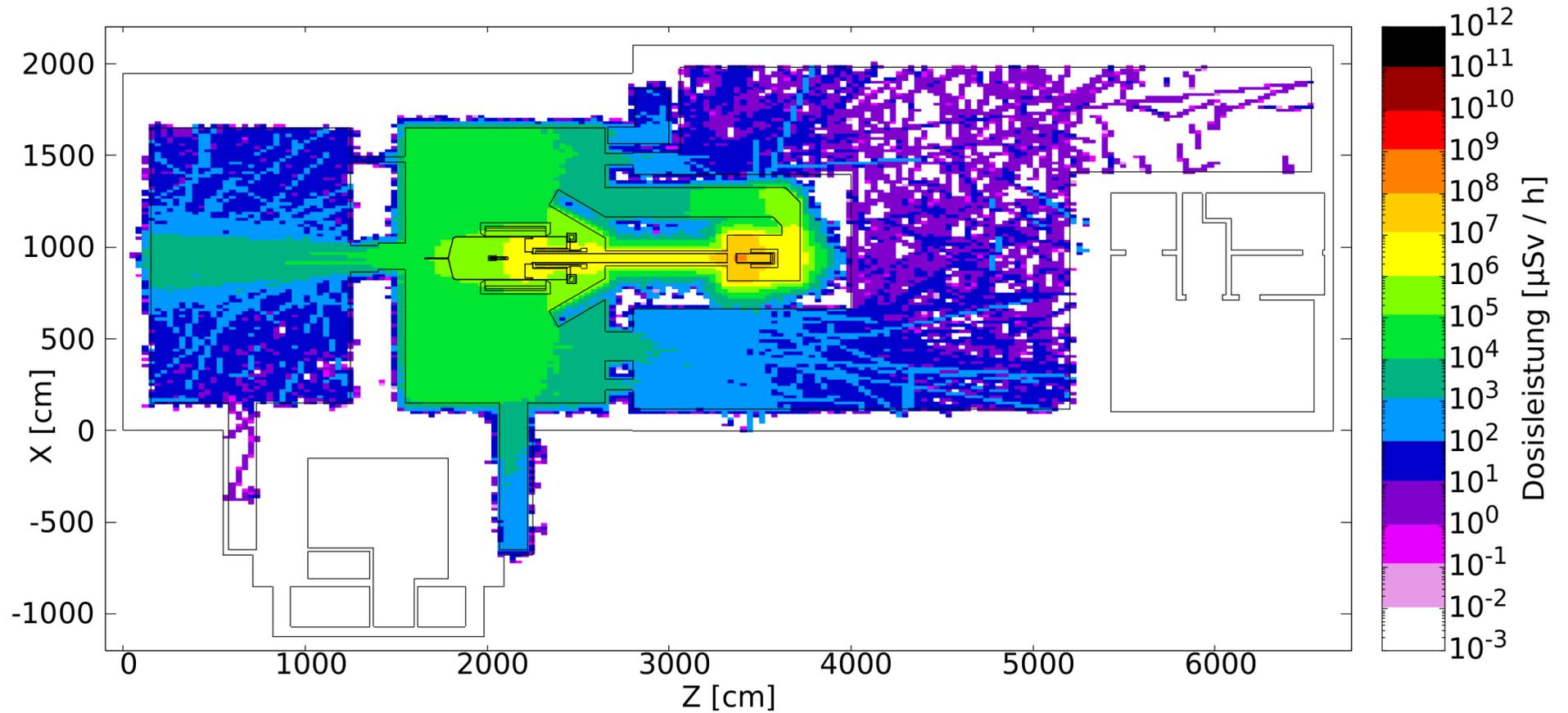


Abbildung A.17.: Äquivalenzdosisleistung der Neutronen während Strahlbetrieb. Bei der Geometrie handelt es sich um die zweite Variante. Die Dosisleistung wird über die Höhe der Elektronenquelle gemittelt.

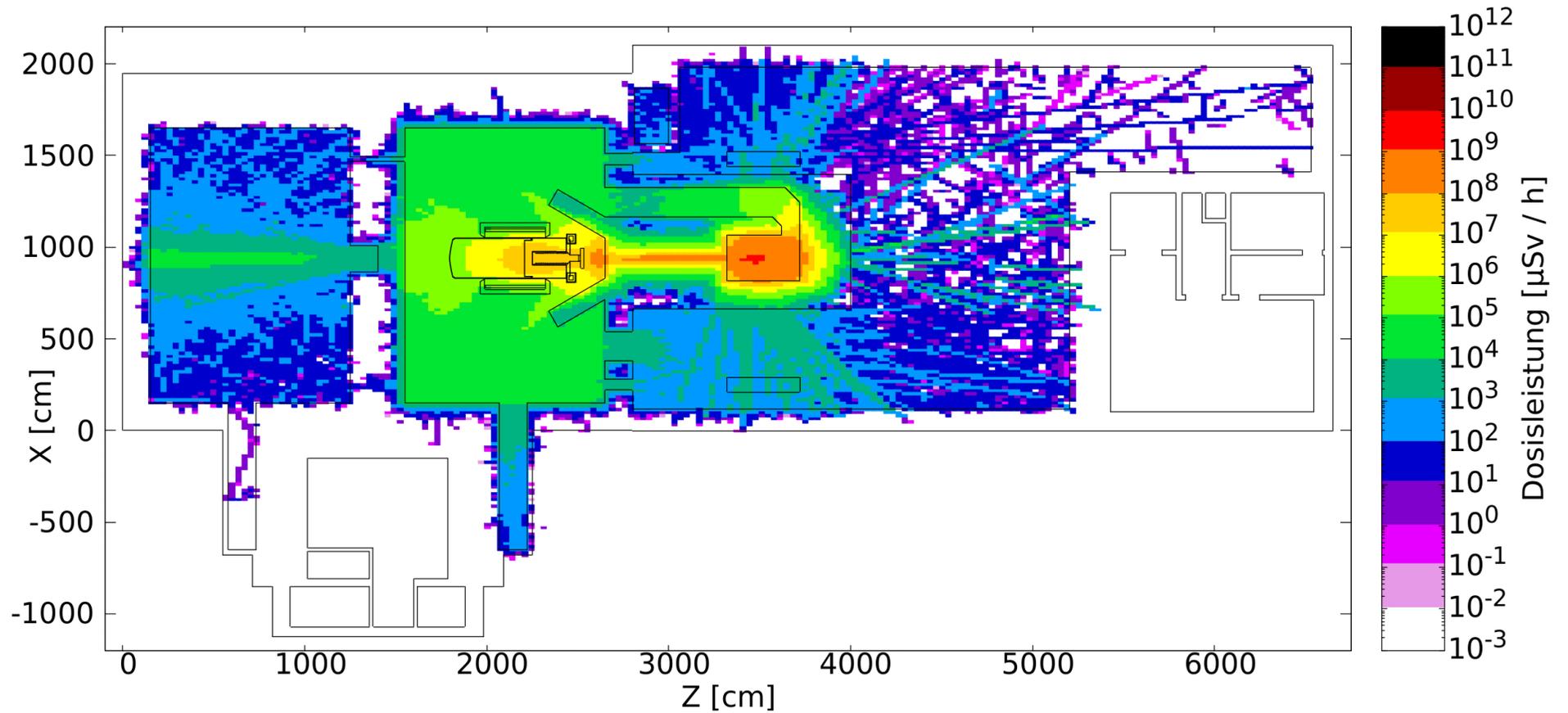


Abbildung A.18.: Äquivalenzdosisleistung während Strahlbetrieb. Die Dosisleistung wird über die Höhe der Kryomodul gemittelt.

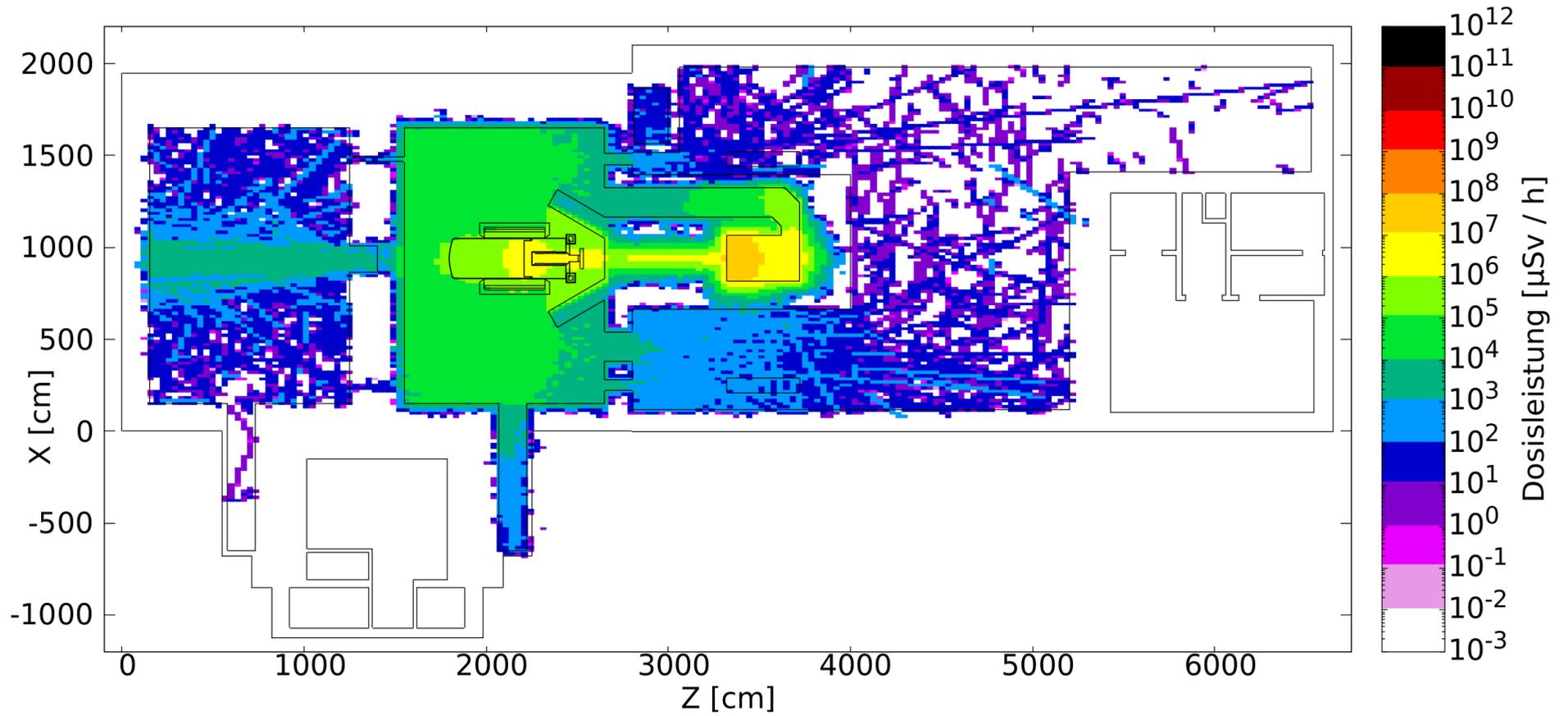


Abbildung A.19.: Äquivalenzdosisleistung der Neutronen während Strahlbetrieb. Die Dosisleistung wird über die Höhe der Kryomodul gemittelt.

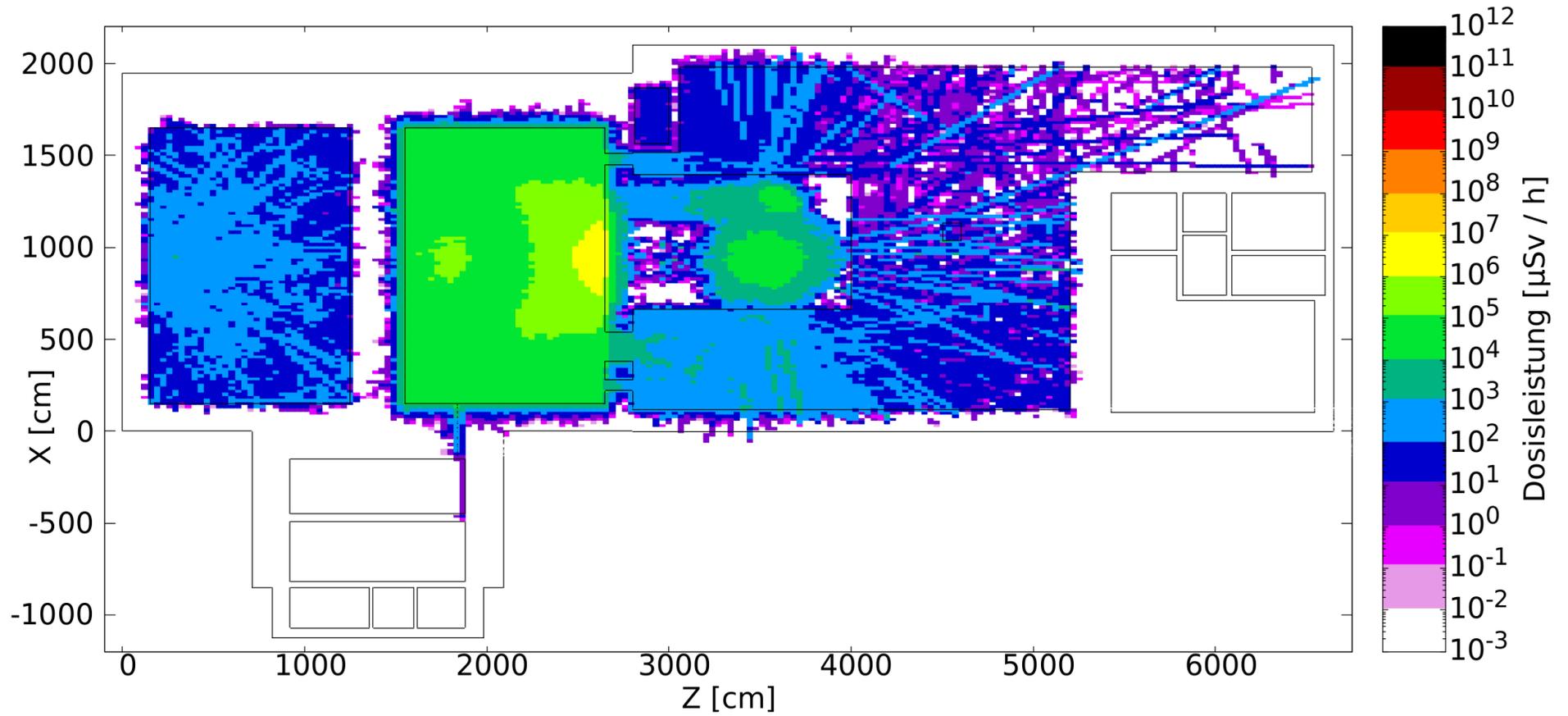


Abbildung A.20.: Äquivalenzdosisleistung während Strahlbetrieb. Die Dosisleistung wird über die Höhe der Elektronenquelle gemittelt.

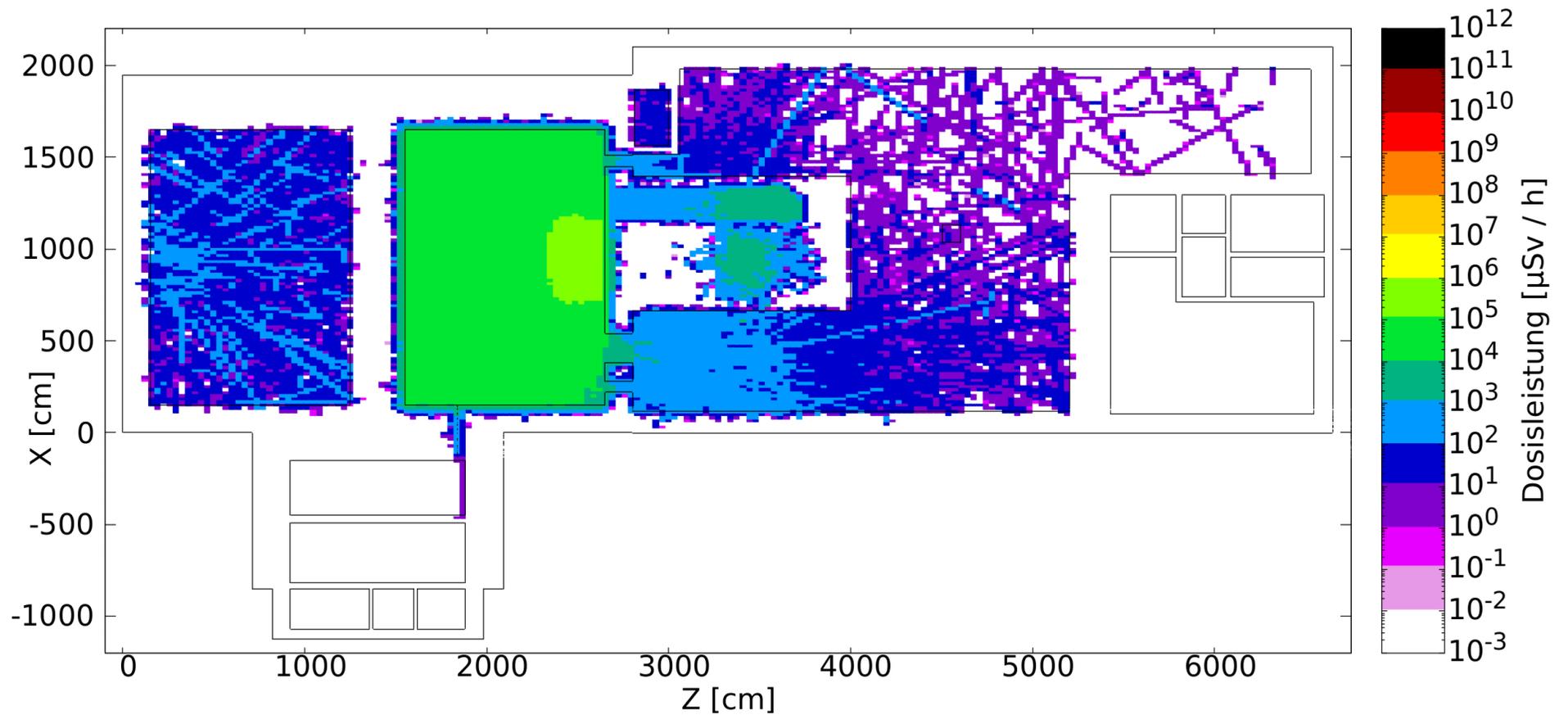


Abbildung A.21.: Äquivalenzdosisleistung der Neutronen während Strahlbetrieb. Die Dosisleistung wird über die Höhe der Elektronenquelle gemittelt.

A.2.4. Simulation Variante 3

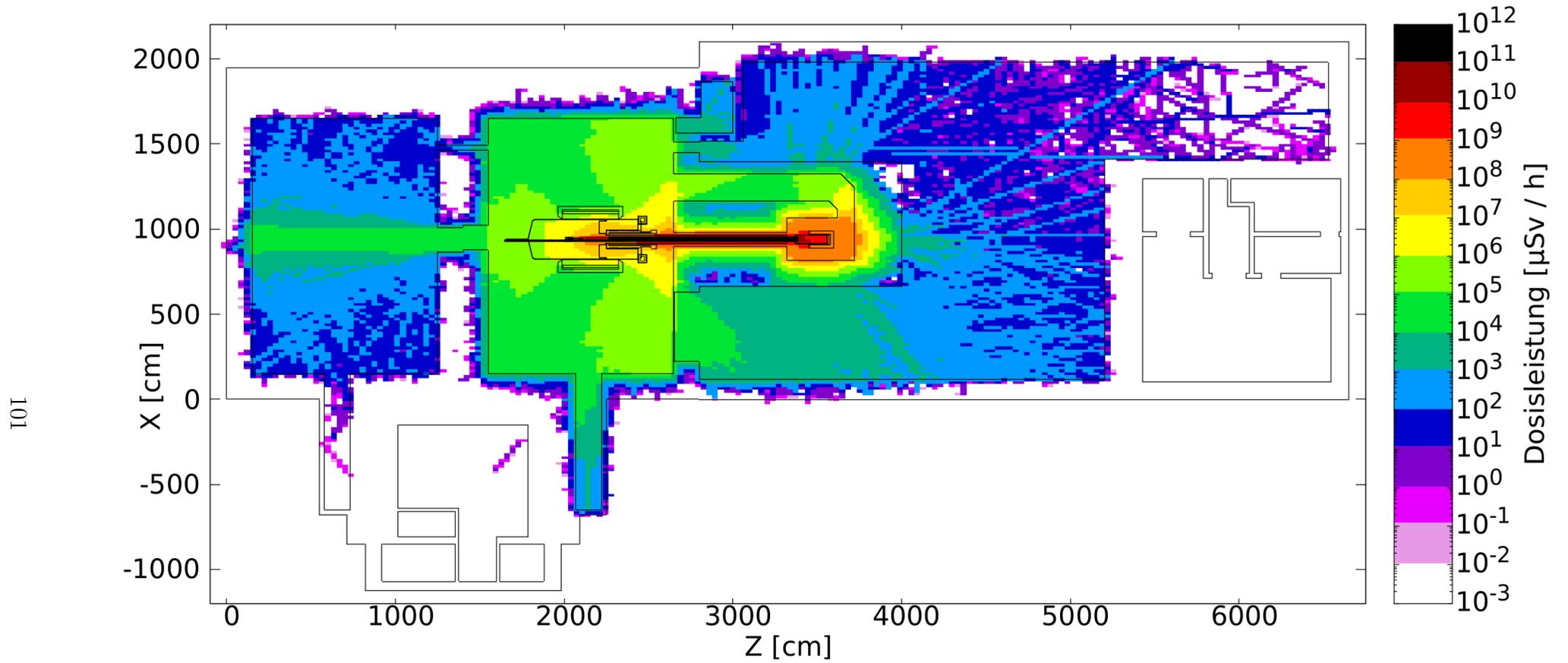


Abbildung A.22.: Äquivalenzdosisleistung der Neutronen während Strahlbetrieb. Bei der Geometrie handelt es sich um die dritte Variante. Die Dosisleistung wird über die Höhe der Elektronenquelle gemittelt.

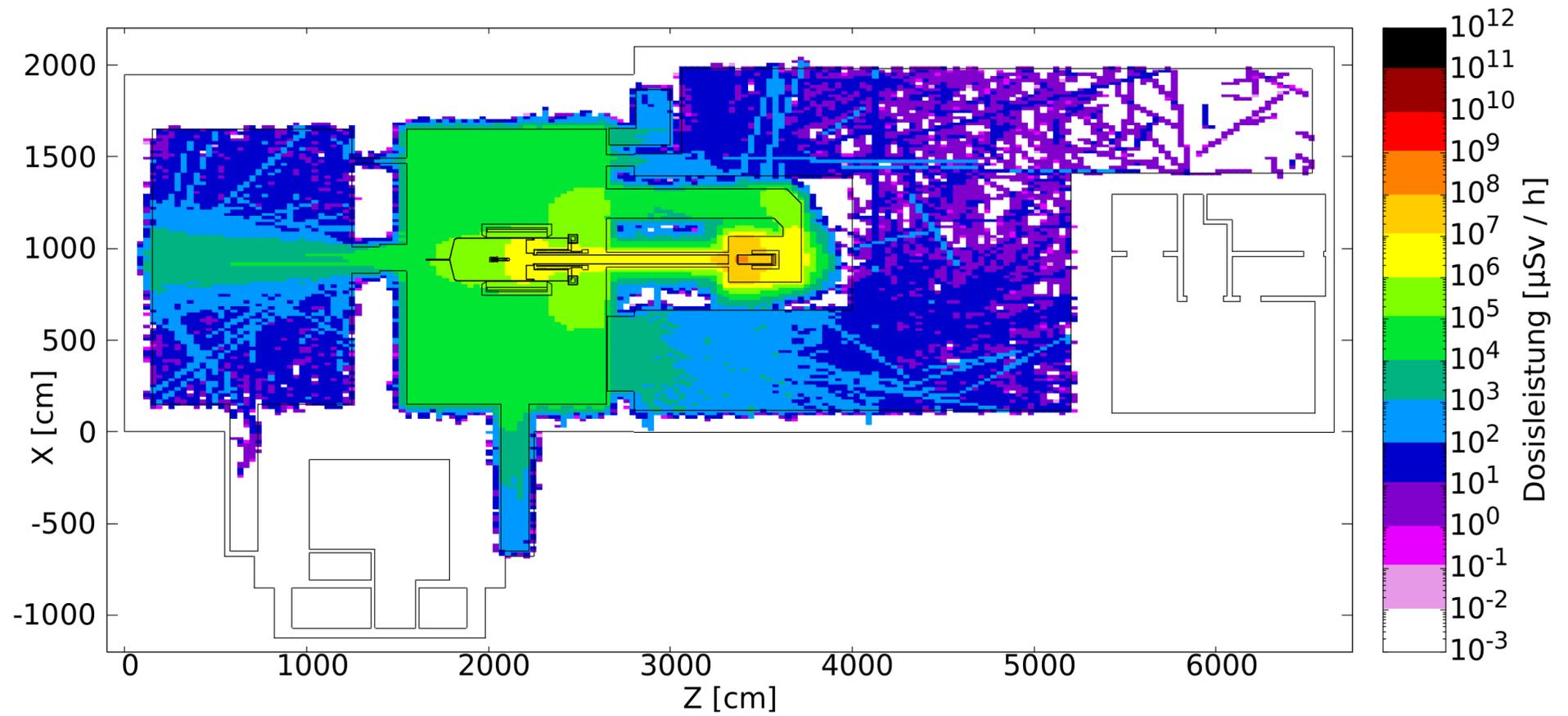


Abbildung A.23.: Äquivalenzdosisleistung der Neutronen während Strahlbetrieb. Bei der Geometrie handelt es sich um die dritte Variante. Die Dosisleistung wird über die Höhe der Elektronenquelle gemittelt.

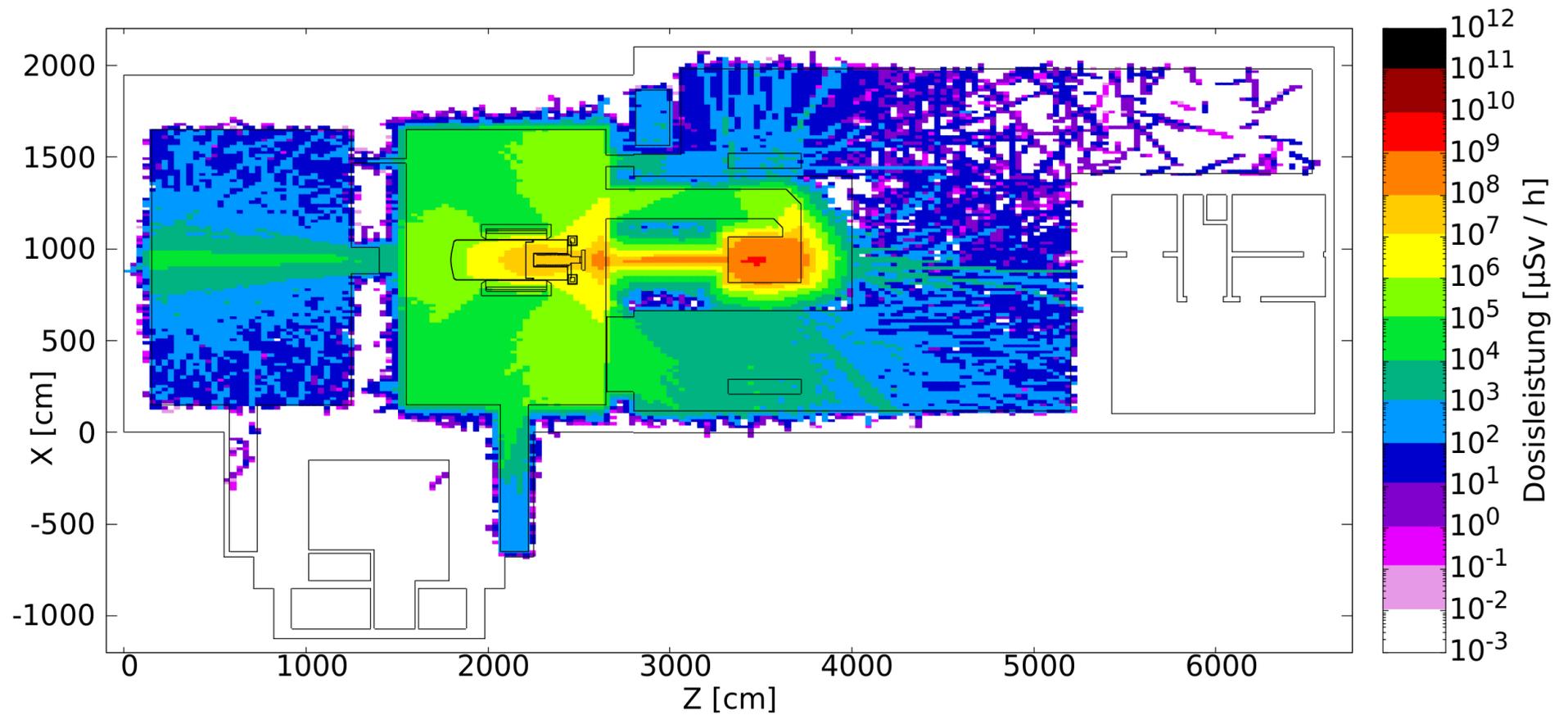


Abbildung A.24.: Äquivalenzdosisleistung während Strahlbetrieb. Die Dosisleistung wird über die Höhe der Kryomodul gemittelt.

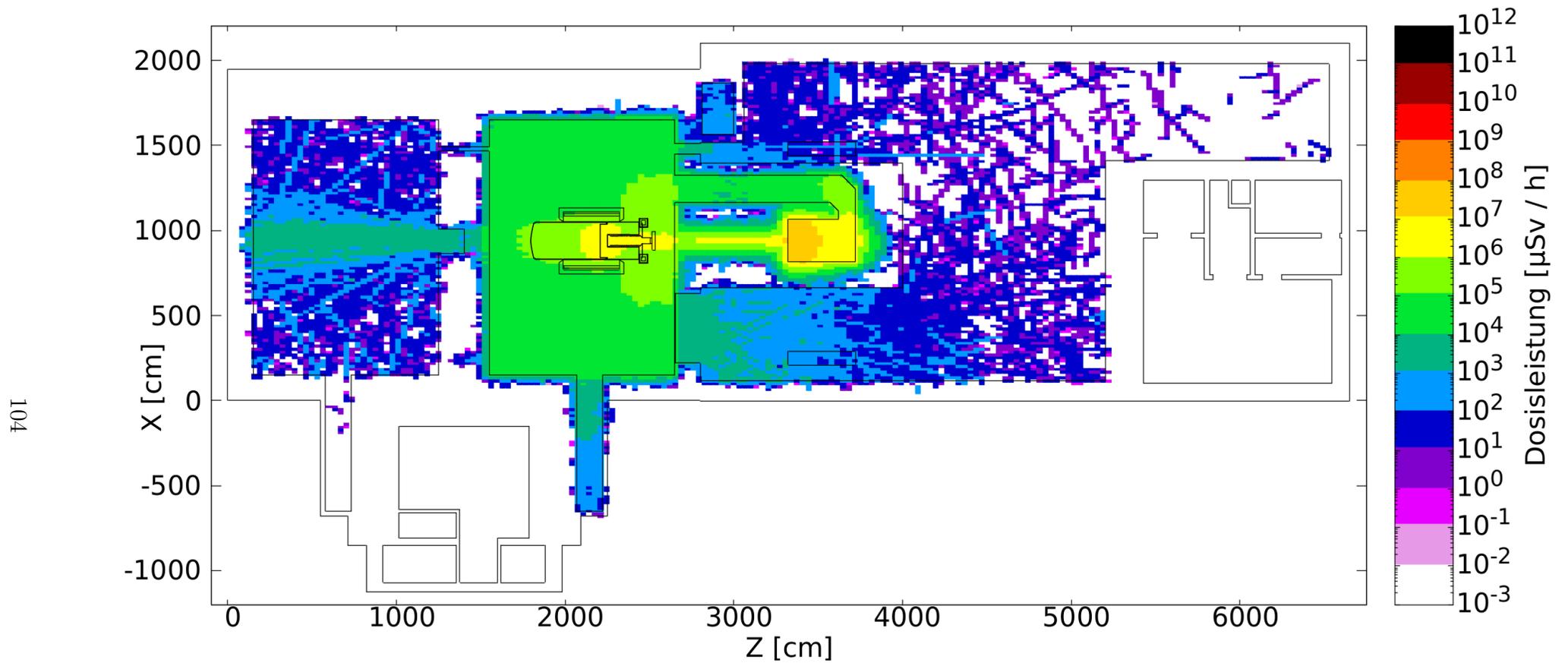


Abbildung A.25.: Äquivalenzdosisleistung der Neutronen während Strahlbetrieb. Die Dosisleistung wird über die Höhe der Kryomodul gemittelt.

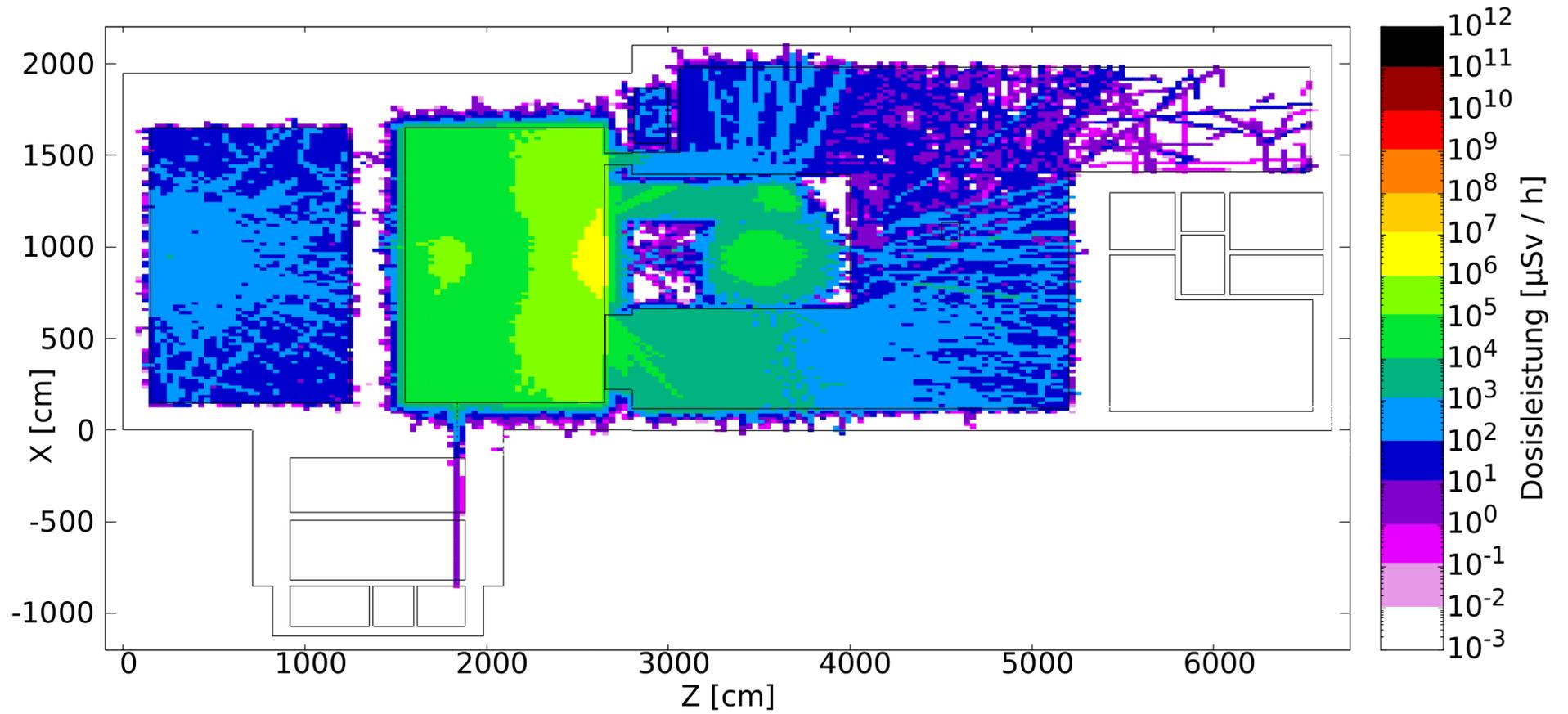


Abbildung A.26.: Äquivalenzdosisleistung während Strahlbetrieb. Die Dosisleistung wird über die Höhe der Elektronenquelle gemittelt.

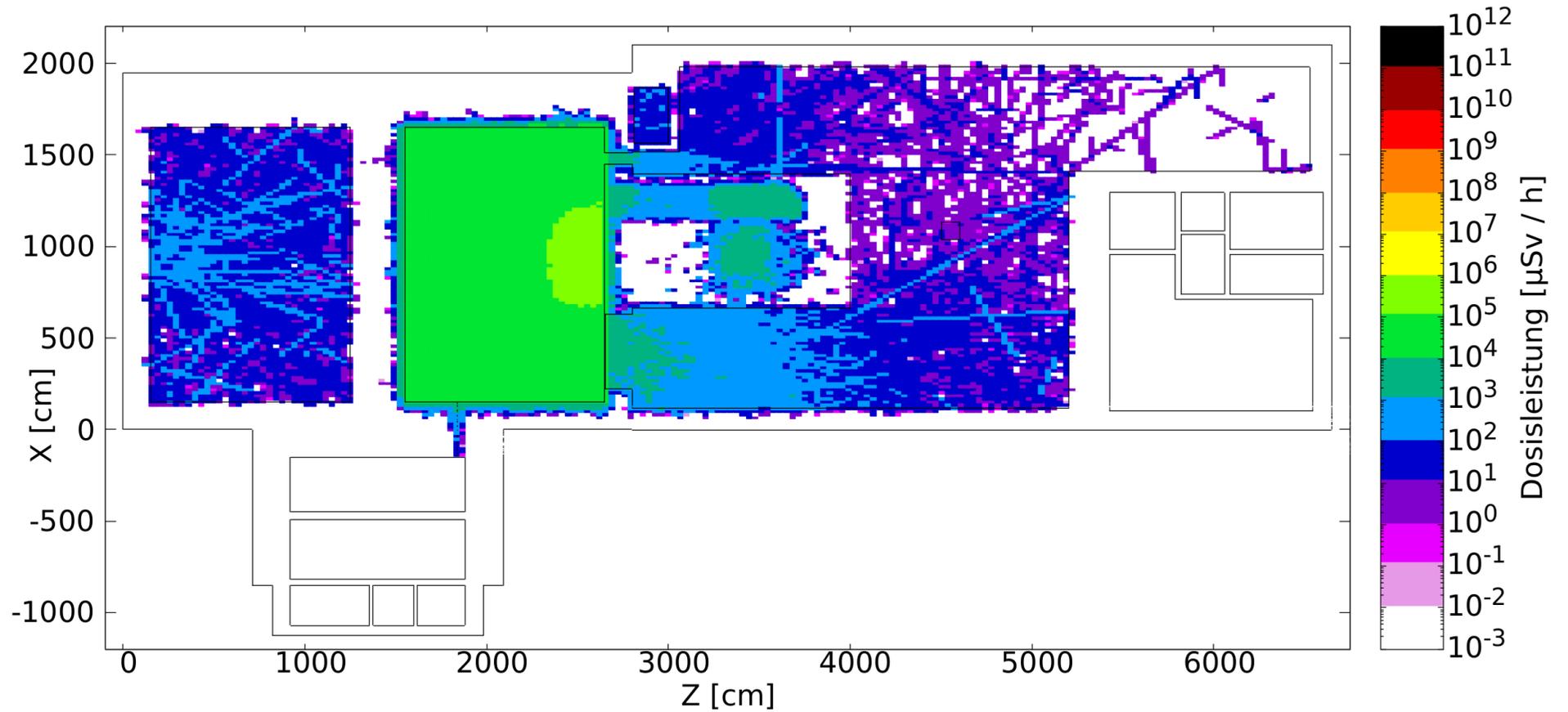


Abbildung A.27.: Äquivalenzdosisleistung der Neutronen während Strahlbetrieb. Die Dosisleistung wird über die Höhe der Elektronenquelle gemittelt.

A.2.5. Simulation Variante 4

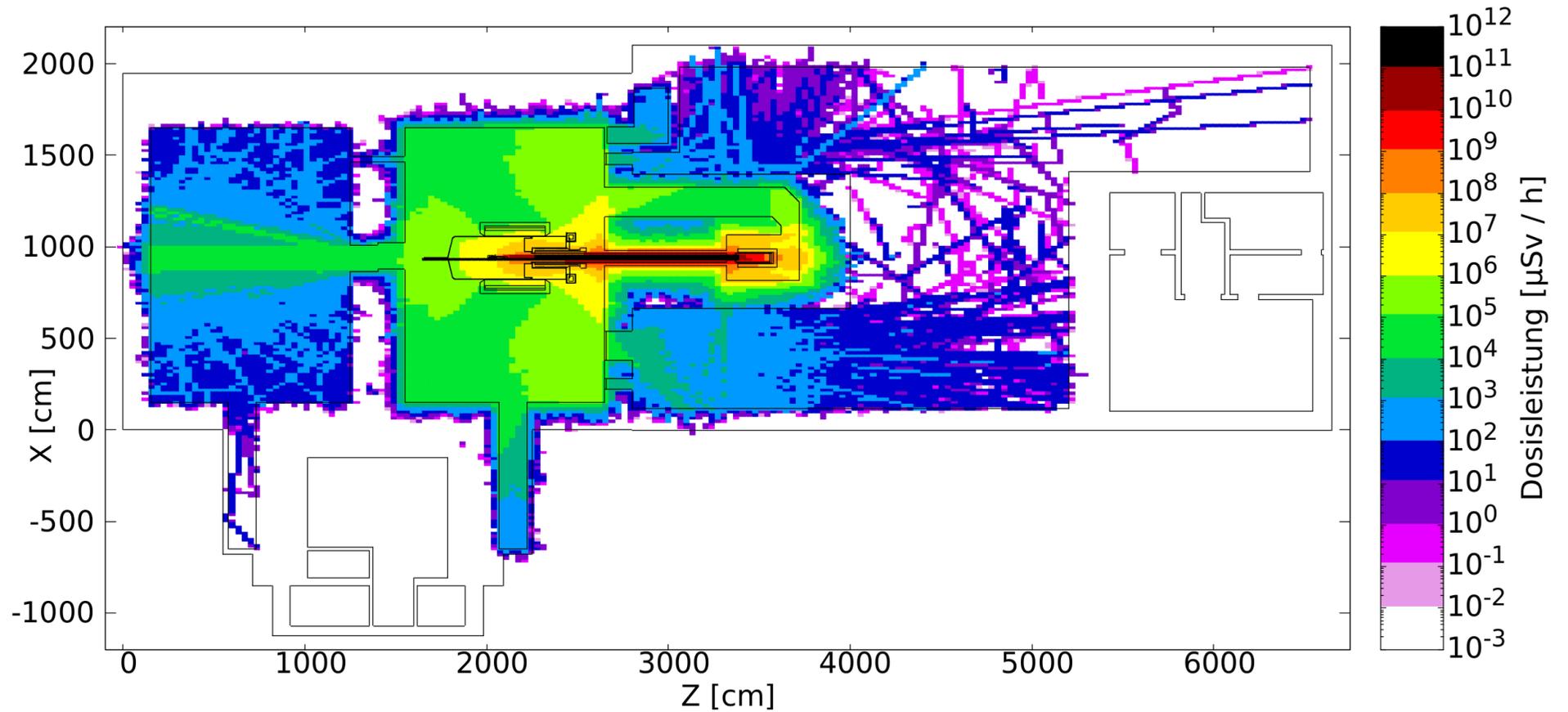


Abbildung A.28.: Äquivalenzdosisleistung der Neutronen während Strahlbetrieb. Bei der Geometrie handelt es sich um die vierte Variante. Die Dosisleistung wird über die Höhe der Elektronenquelle gemittelt.

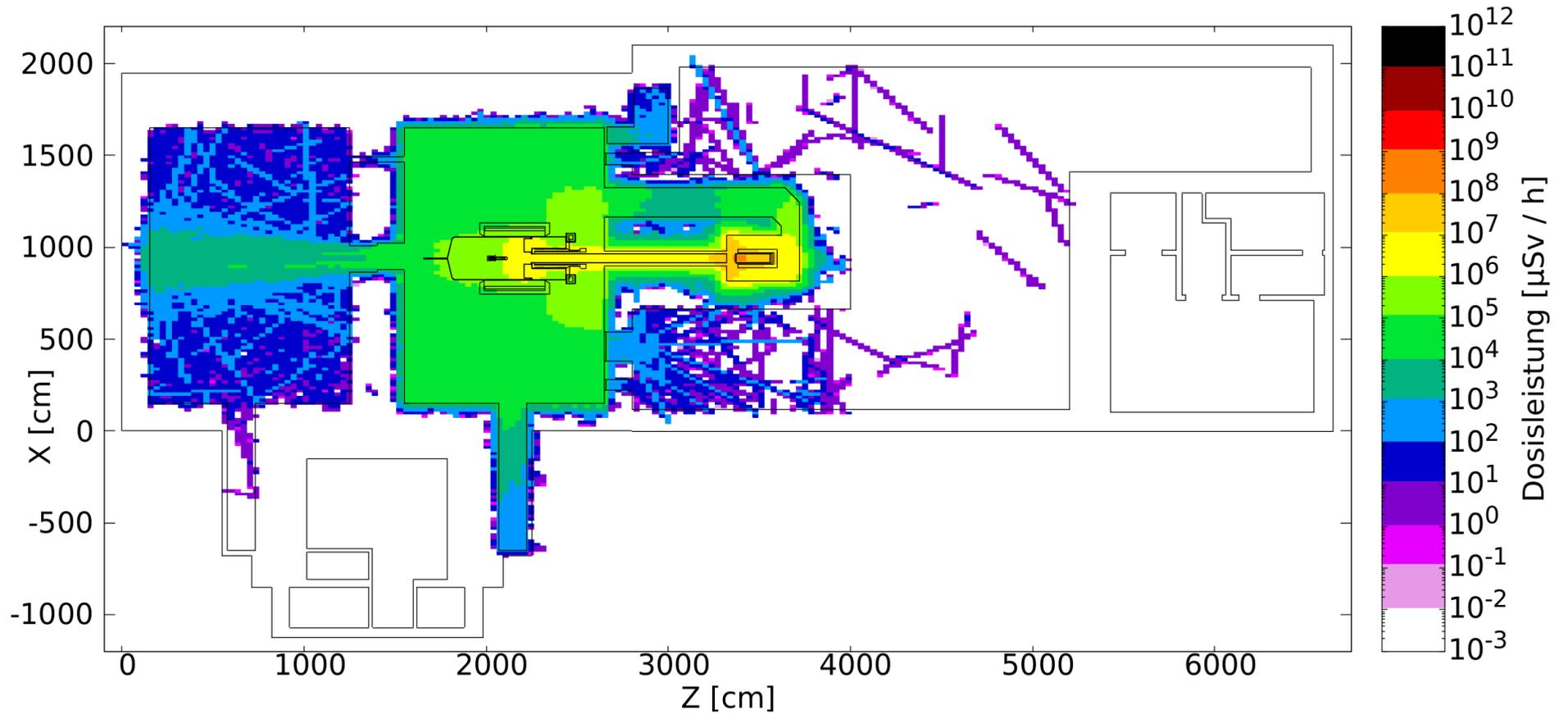


Abbildung A.29.: Äquivalenzdosisleistung der Neutronen während Strahlbetrieb. Bei der Geometrie handelt es sich um die vierte Variante. Die Dosisleistung wird über die Höhe der Elektronenquelle gemittelt.

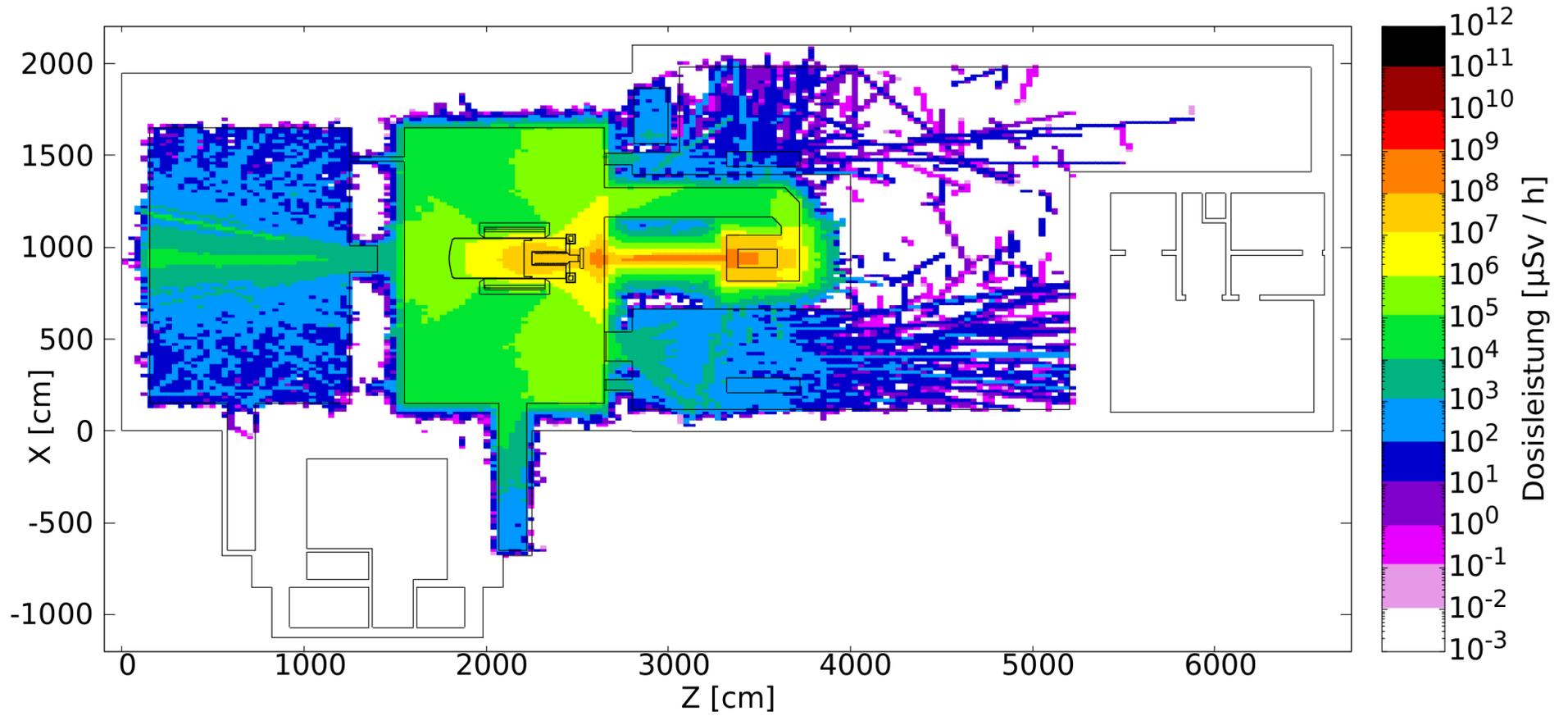


Abbildung A.30.: Äquivalenzdosisleistung während Strahlbetrieb. Die Dosisleistung wird über die Höhe der Kryomodul gemittelt.

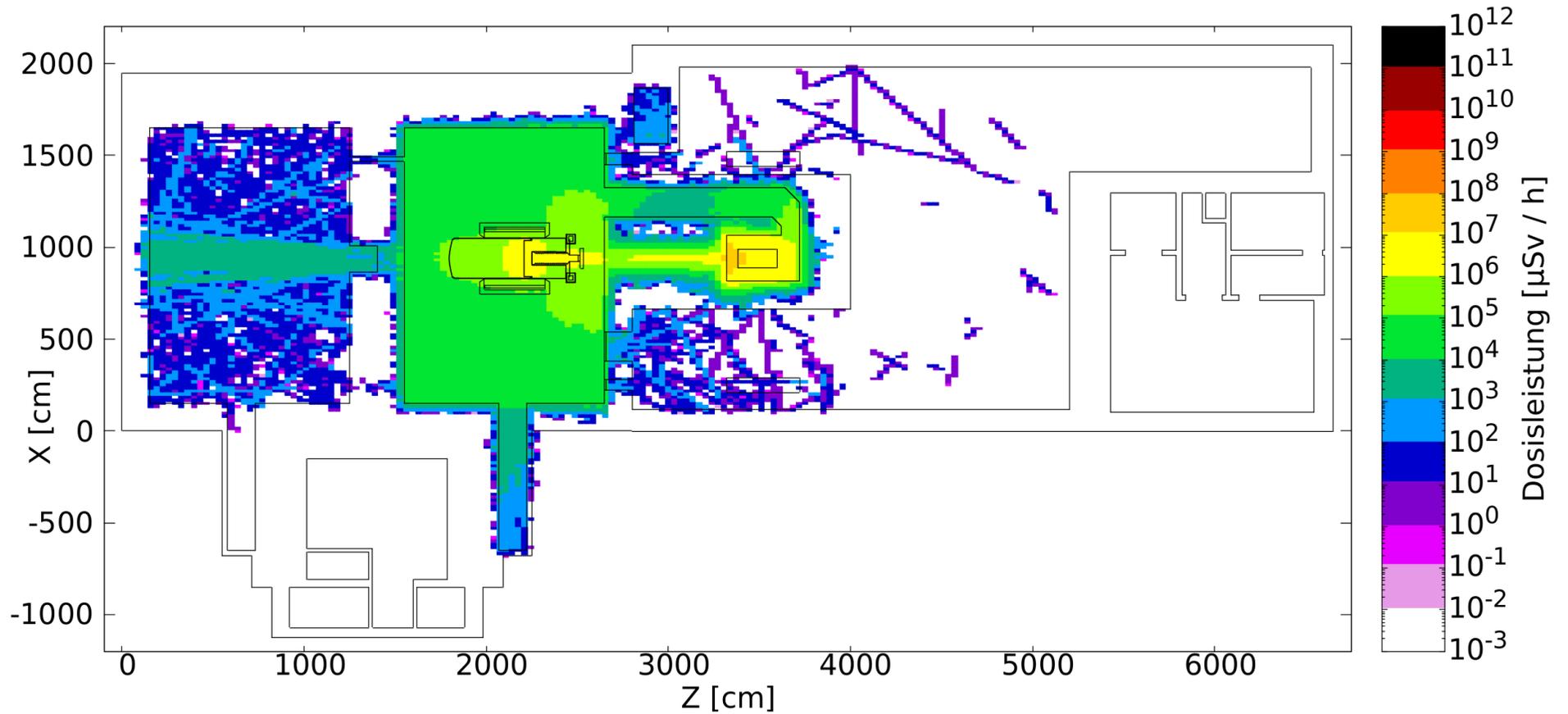


Abbildung A.31.: Äquivalenzdosisleistung der Neutronen während Strahlbetrieb. Die Dosisleistung wird über die Höhe der Kryomodul gemittelt.

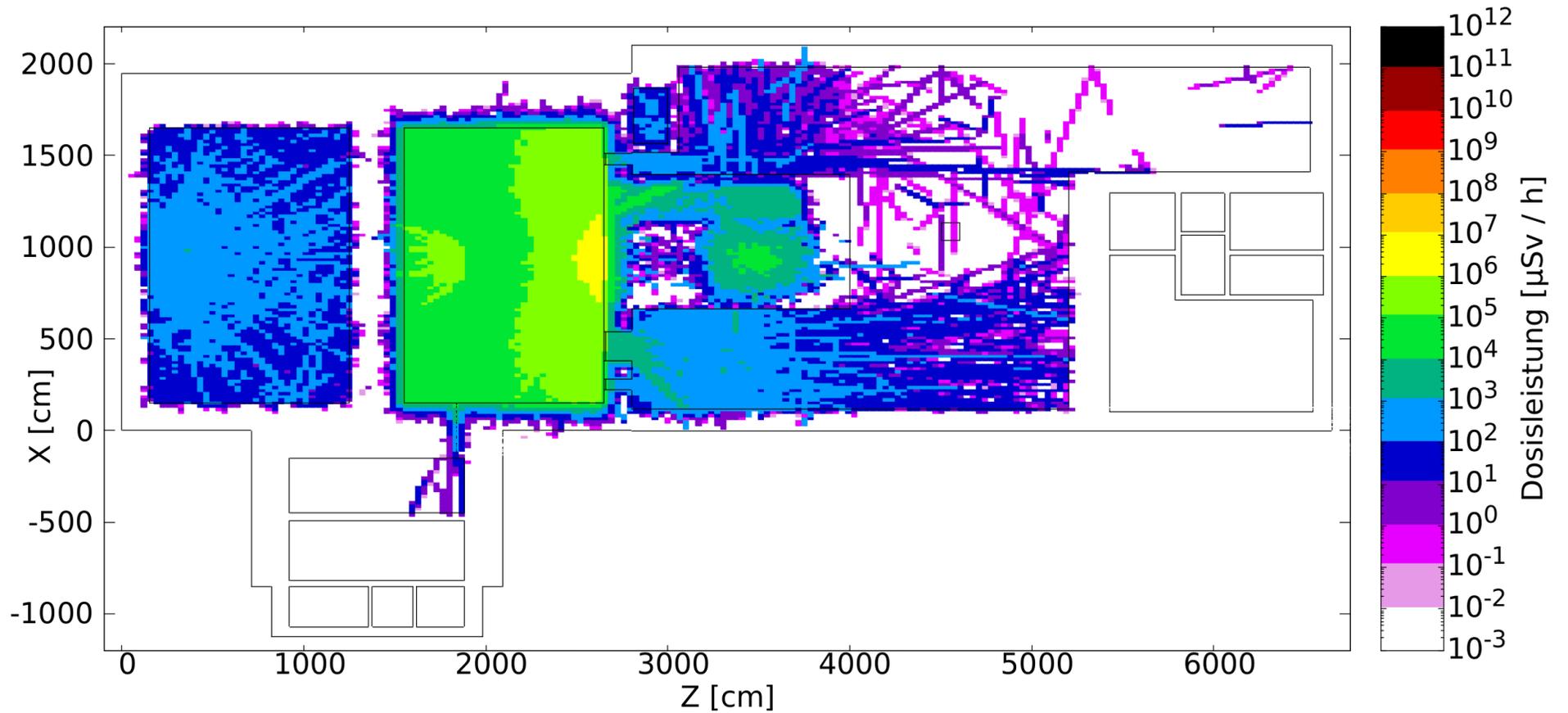


Abbildung A.32.: Äquivalenzdosisleistung während Strahlbetrieb. Die Dosisleistung wird über die Höhe der Elektronenquelle gemittelt.

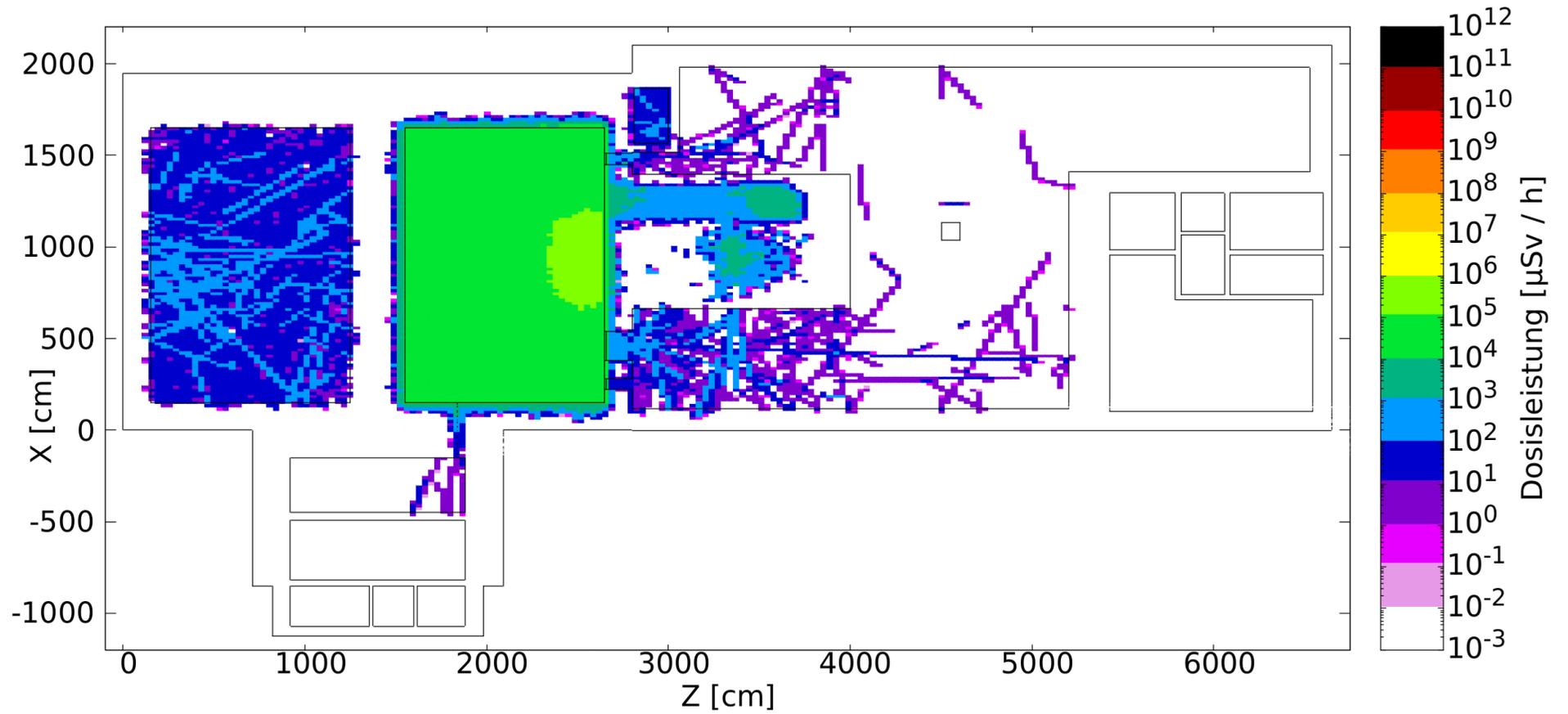


Abbildung A.33.: Äquivalenzdosisleistung der Neutronen während Strahlbetrieb. Die Dosisleistung wird über die Höhe der Elektronenquelle gemittelt.

A.3. Remanente Radioaktivität

A.3.1. Erzeugte Isotope

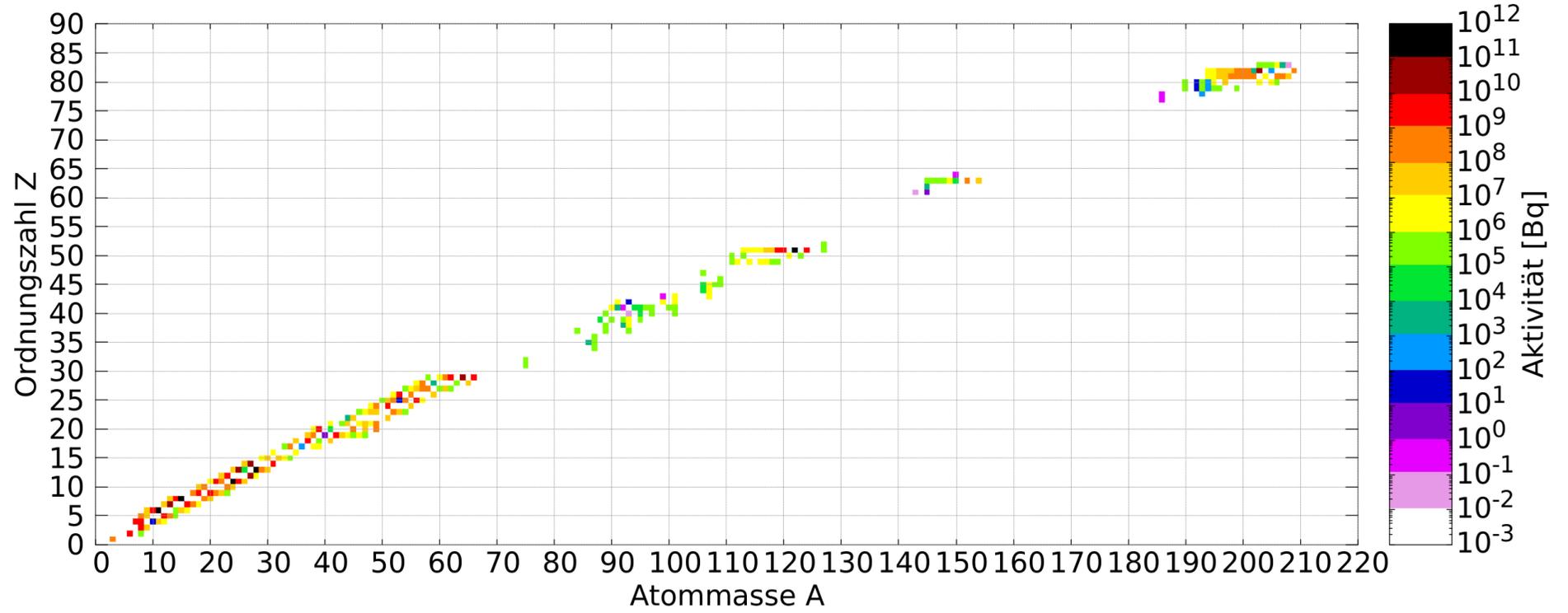


Abbildung A.34.: Übersicht zu der Aktivität der erzeugten Isotope nach einer Abklingzeit von $t_a = 0$ h

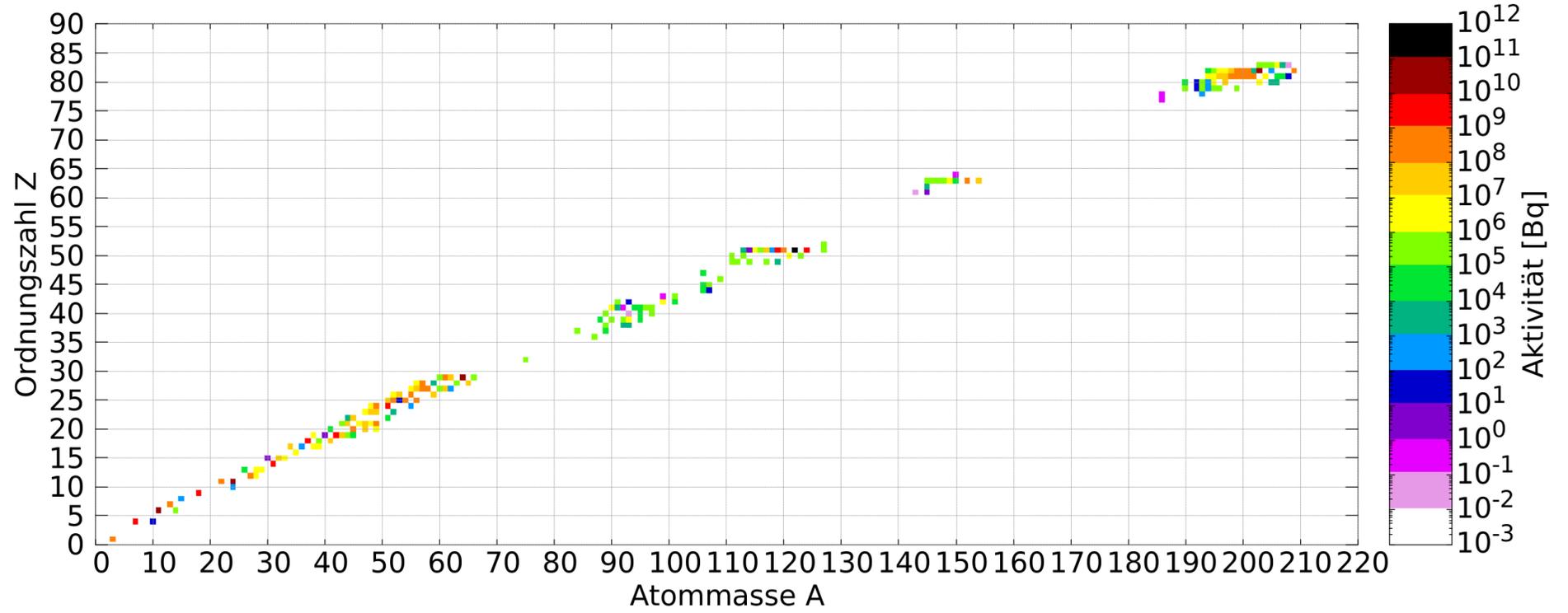


Abbildung A.35.: Übersicht zu der Aktivität der erzeugten Isotope nach einer Abklingzeit von $t_a = 1$ h

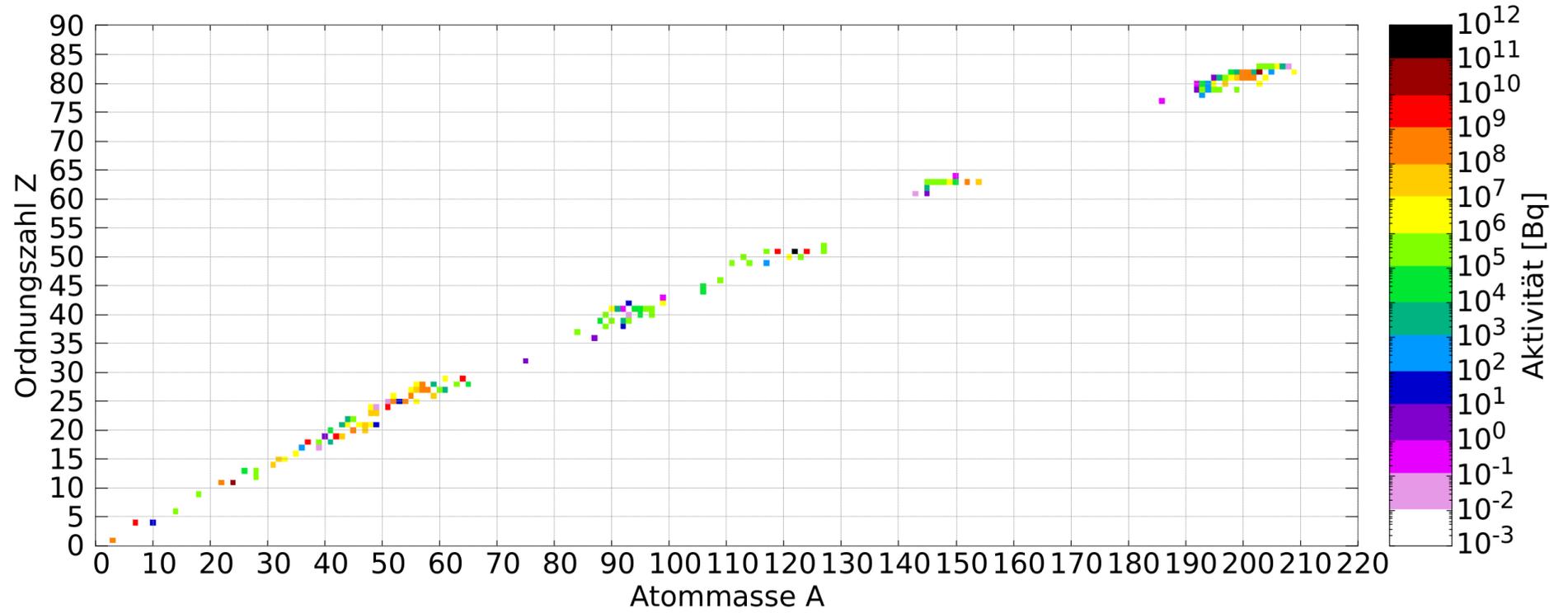


Abbildung A.36.: Übersicht zu der Aktivität der erzeugten Isotope nach einer Abklingzeit von $t_a = 1$ d

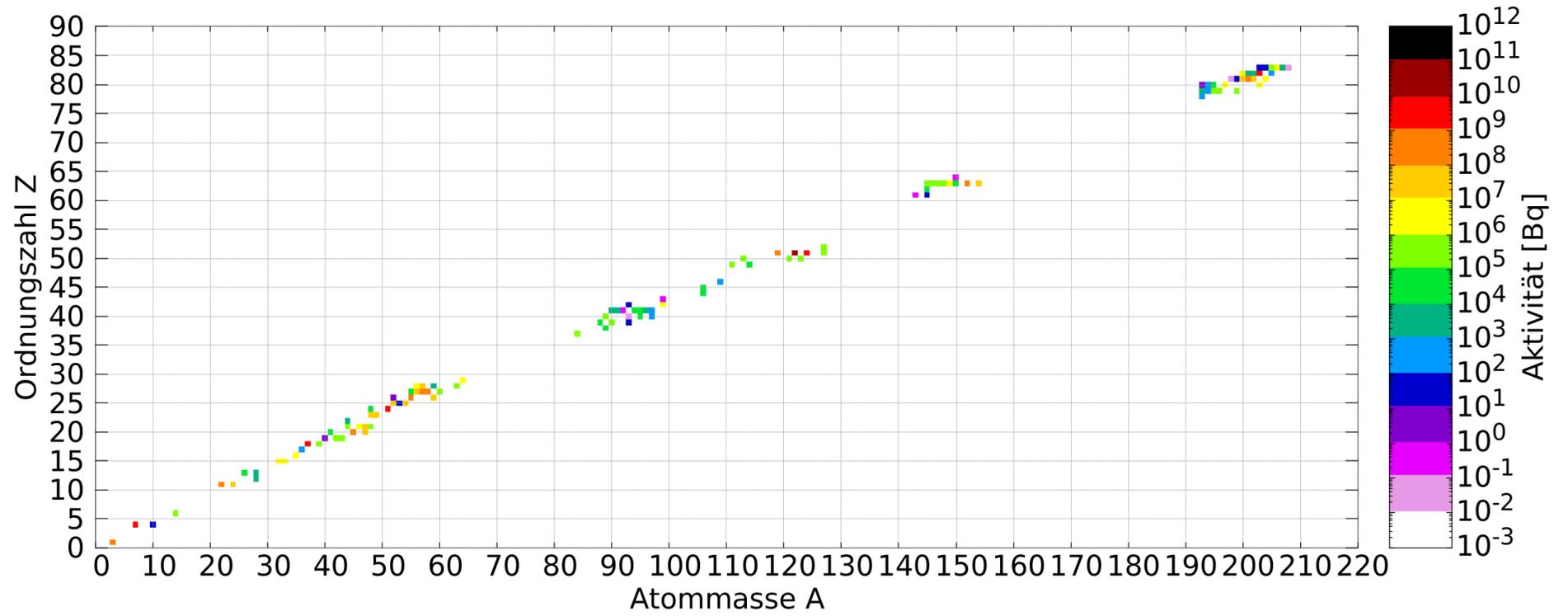


Abbildung A.37.: Übersicht zu der Aktivität der erzeugten Isotope nach einer Abklingzeit von $t_a = 1$ w

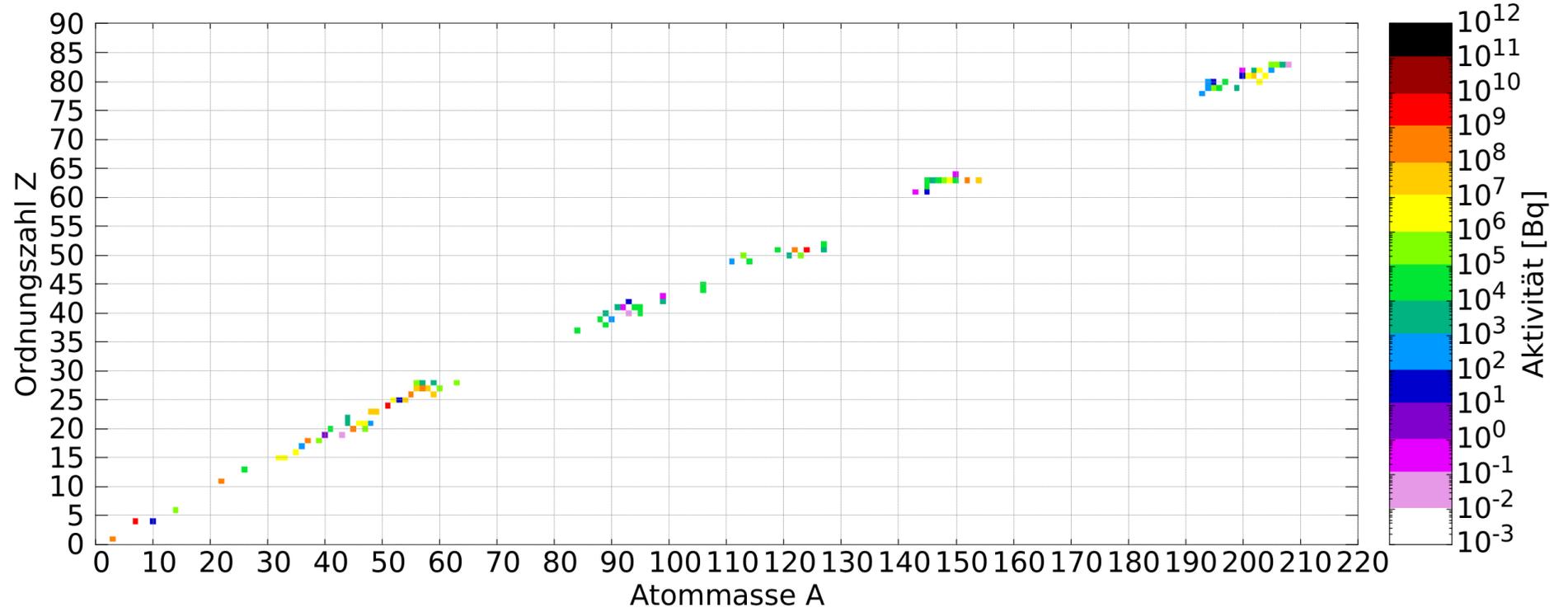


Abbildung A.38.: Übersicht zu der Aktivität der erzeugten Isotope nach einer Abklingzeit von $t_a = 4$ w

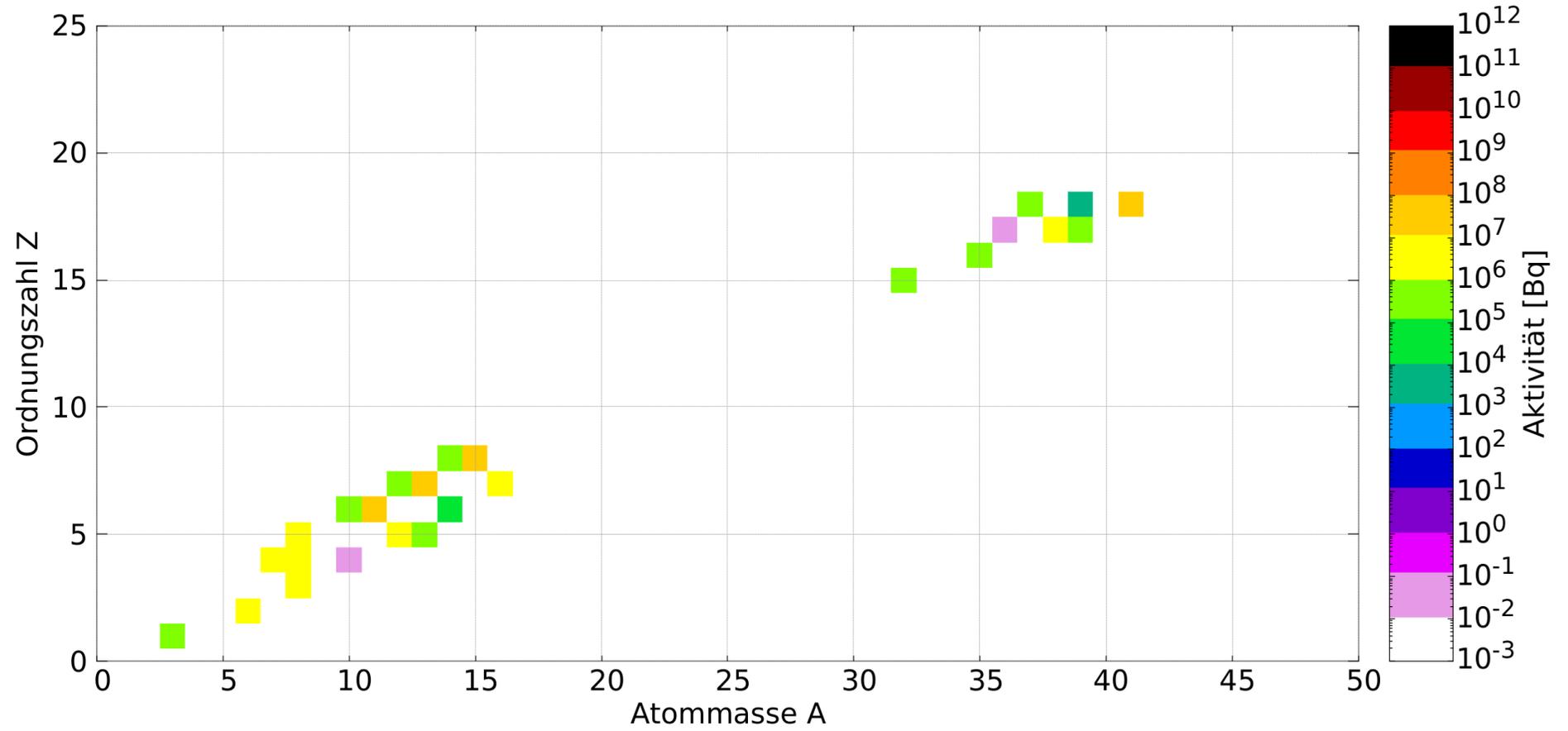


Abbildung A.39.: Übersicht zu der Aktivität der erzeugten Isotope im Beamdum nach einer Abklingzeit von $t_a = 0$ h

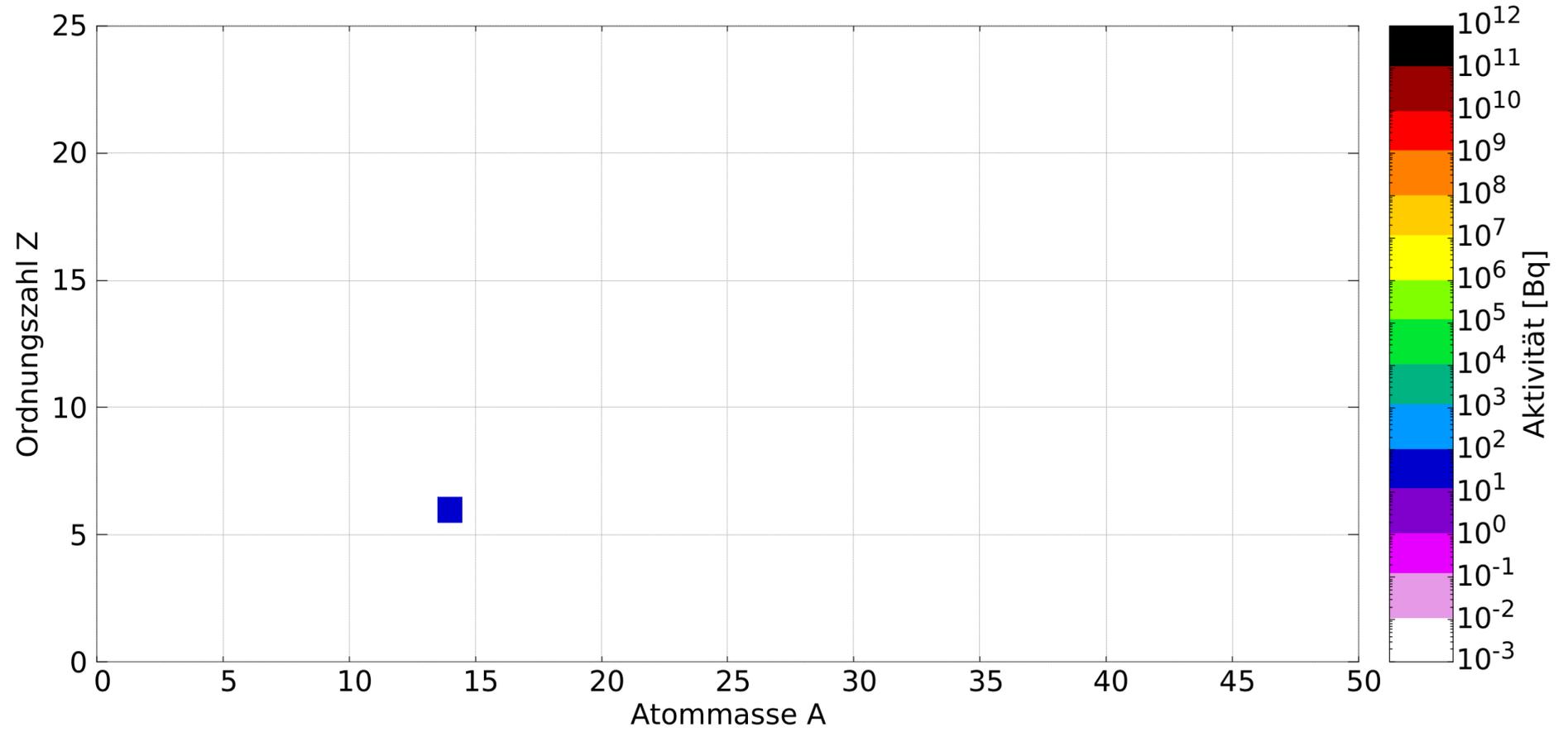


Abbildung A.40.: Übersicht zu der Aktivität der erzeugten Isotope in der Experimentierhalle 1 nach einer Abklingzeit von $t_a = 0$ h

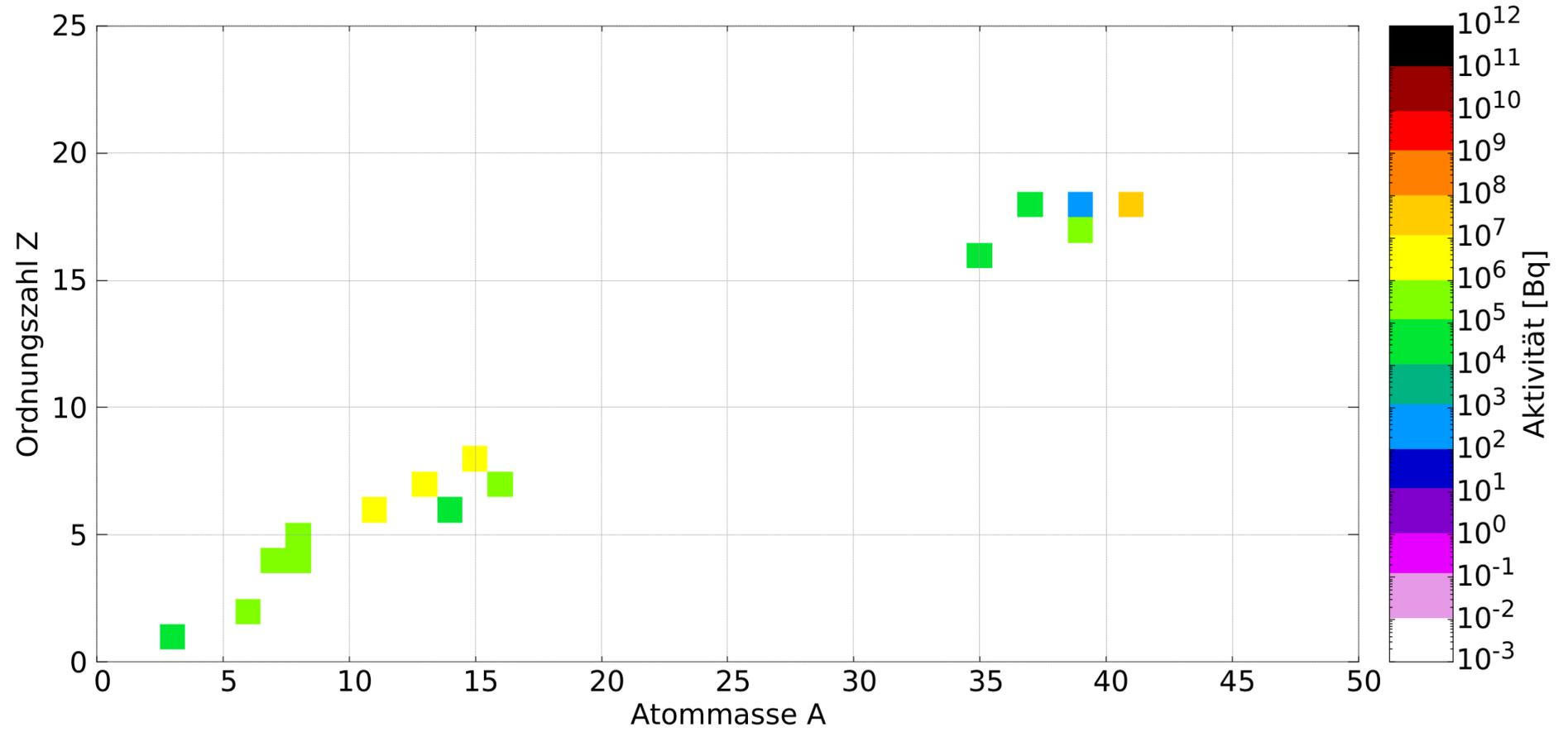


Abbildung A.41.: Übersicht zu der Aktivität der erzeugten Isotope in der Experimentierhalle 2 nach einer Abklingzeit von $t_a = 0$ h

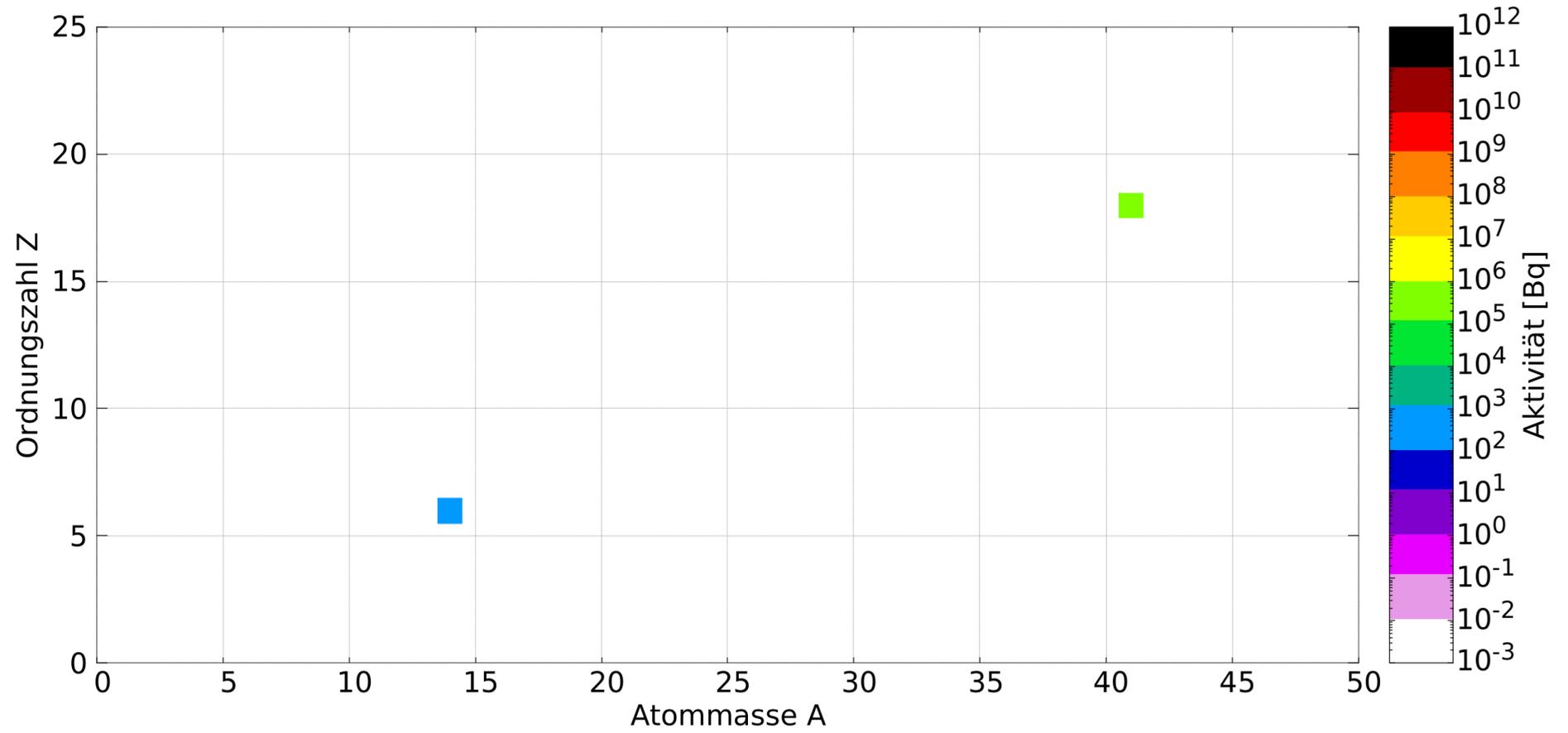


Abbildung A.42.: Übersicht zu der Aktivität der erzeugten Isotope nach einer Abklingzeit von $t_a = 0$ h

A.3.2. Aktivitätsverteilung

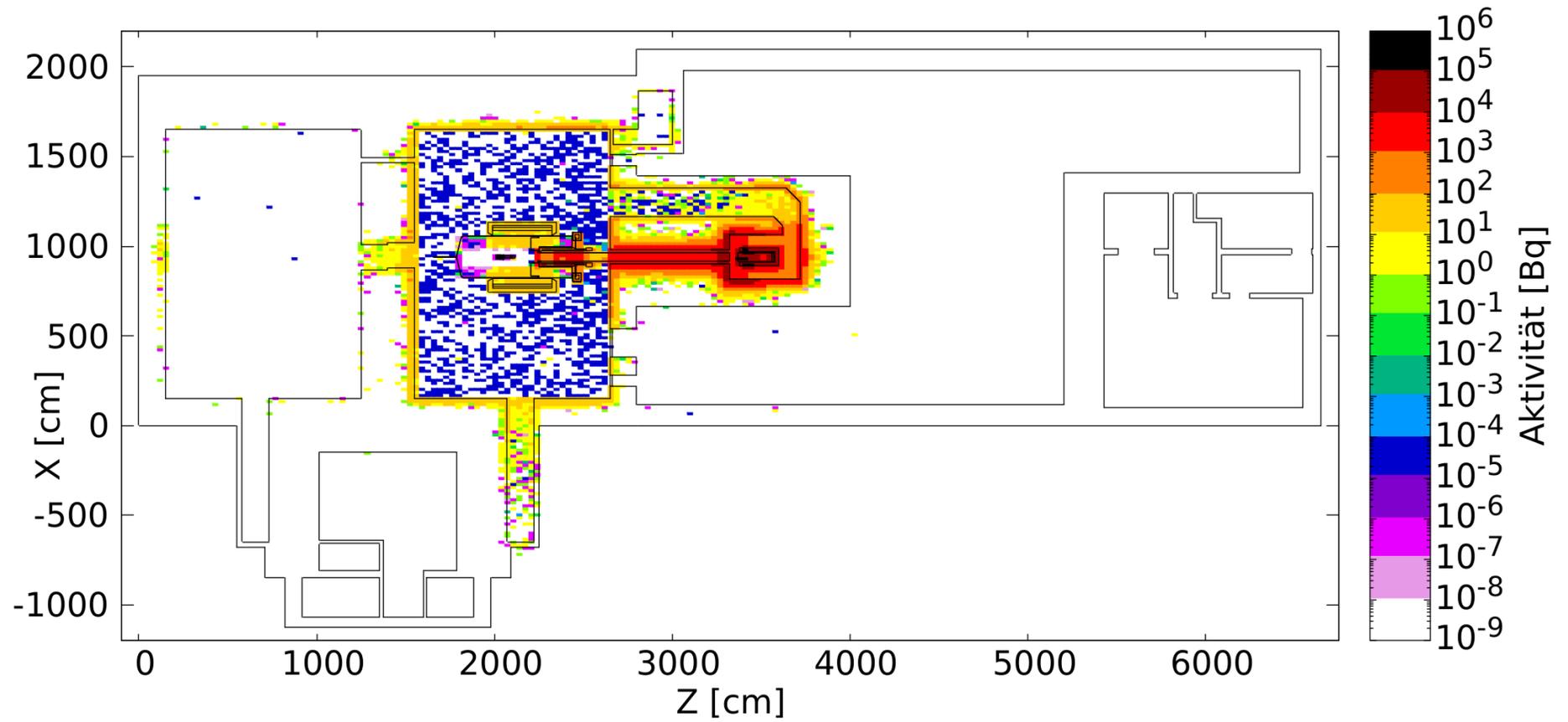


Abbildung A.43.: Aktivitätsverteilung zum Zeitpunkt $t_a = 1$ h

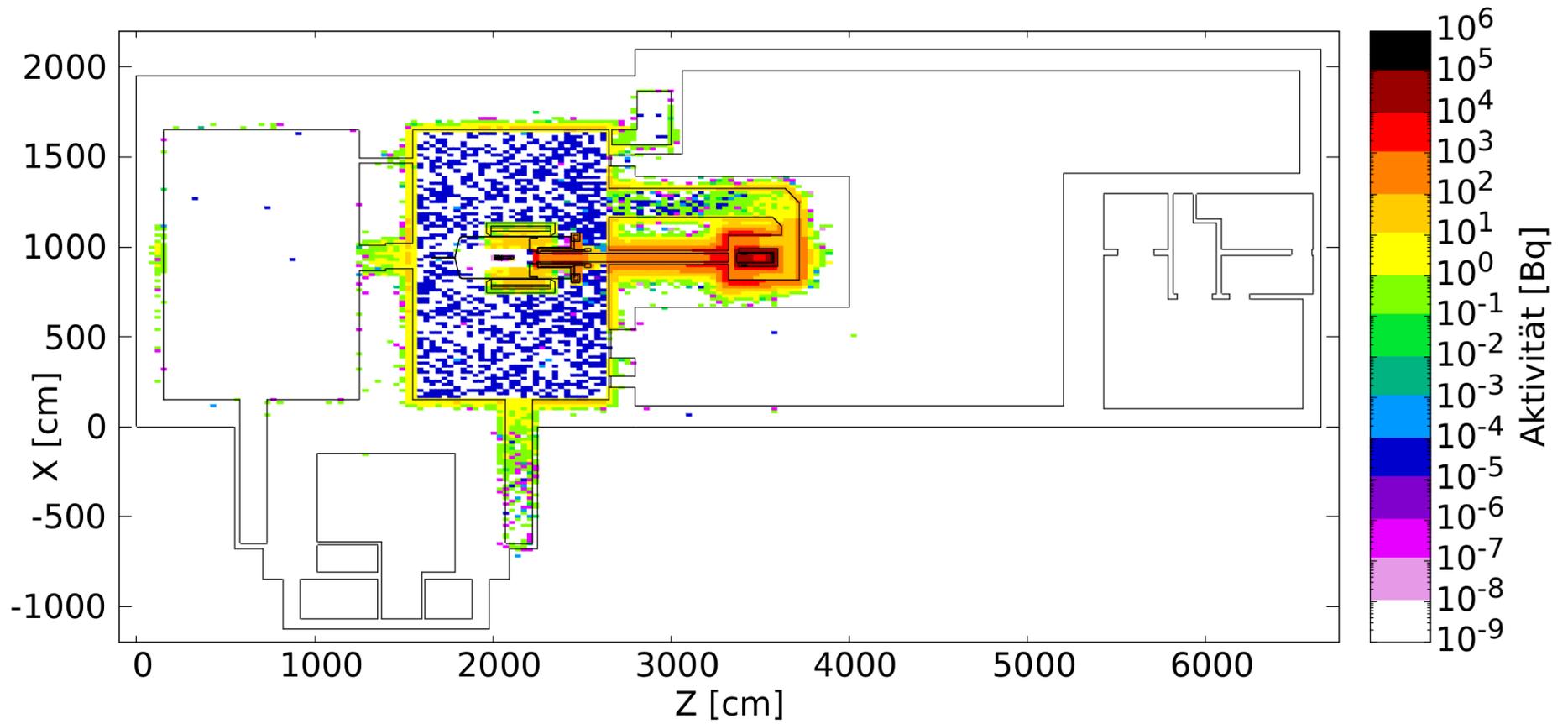


Abbildung A.44.: Aktivitätsverteilung zum Zeitpunkt $t_a = 1$ d

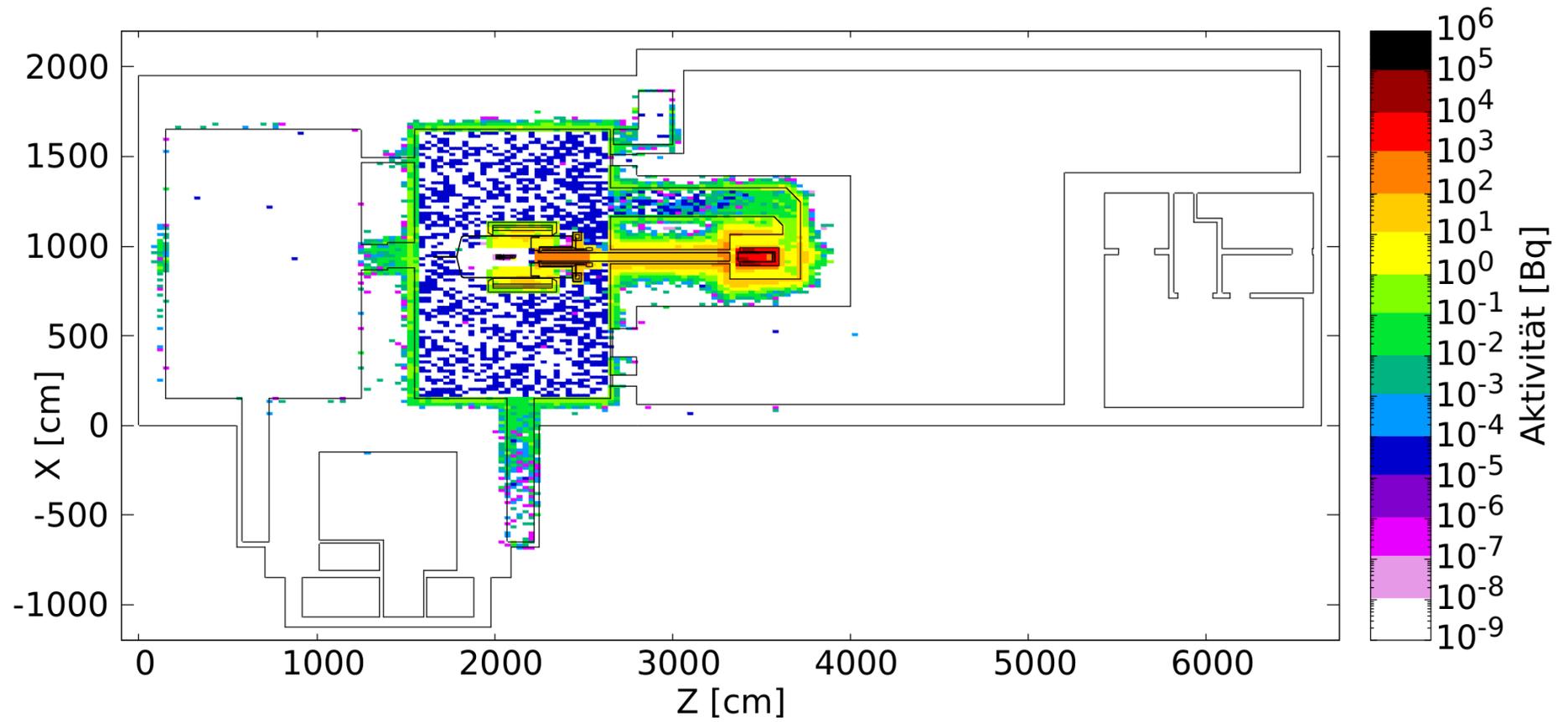


Abbildung A.45.: Aktivitätsverteilung zum Zeitpunkt $t_a = 1$ w

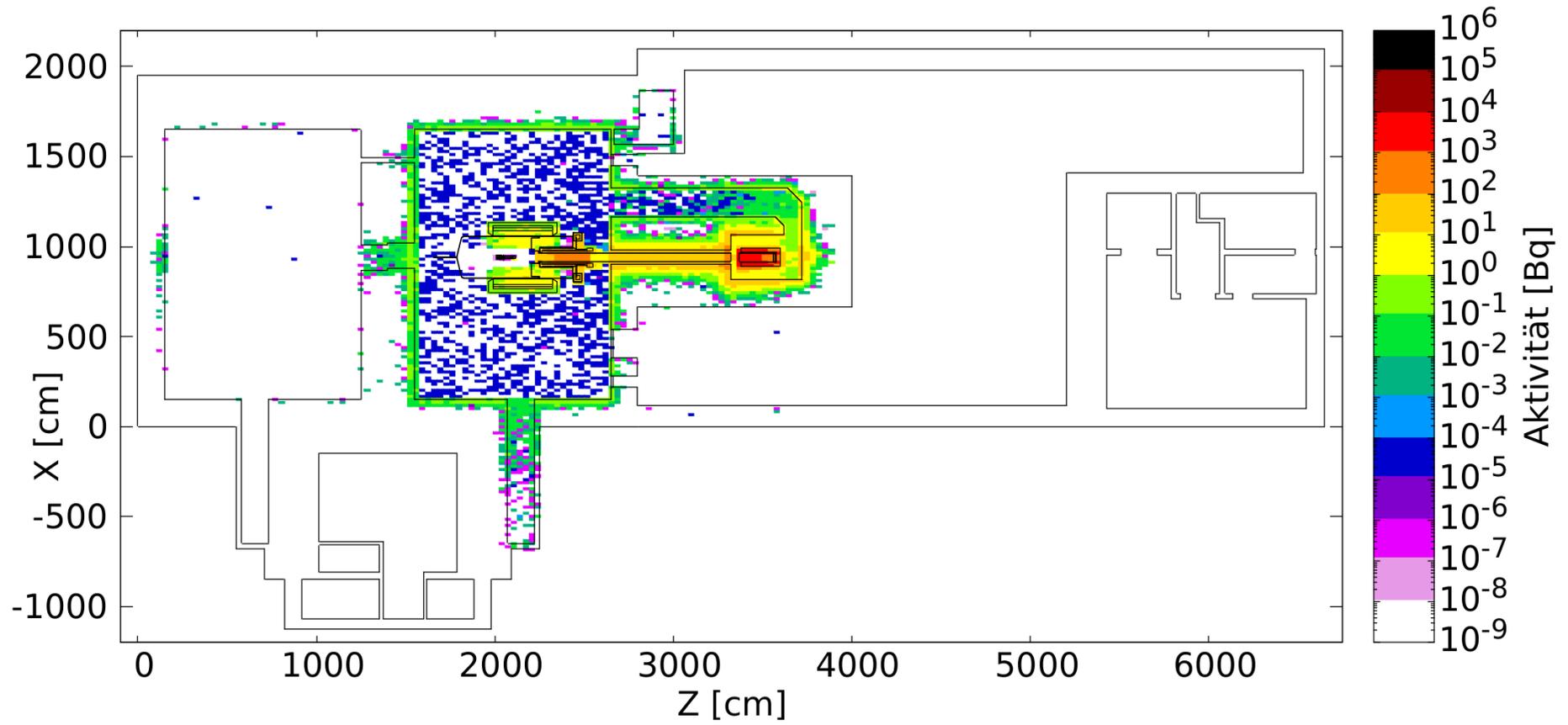


Abbildung A.46.: Aktivitätsverteilung zum Zeitpunkt $t_a = 4$ w

A.3.3. Erzeugte Dosisleistung

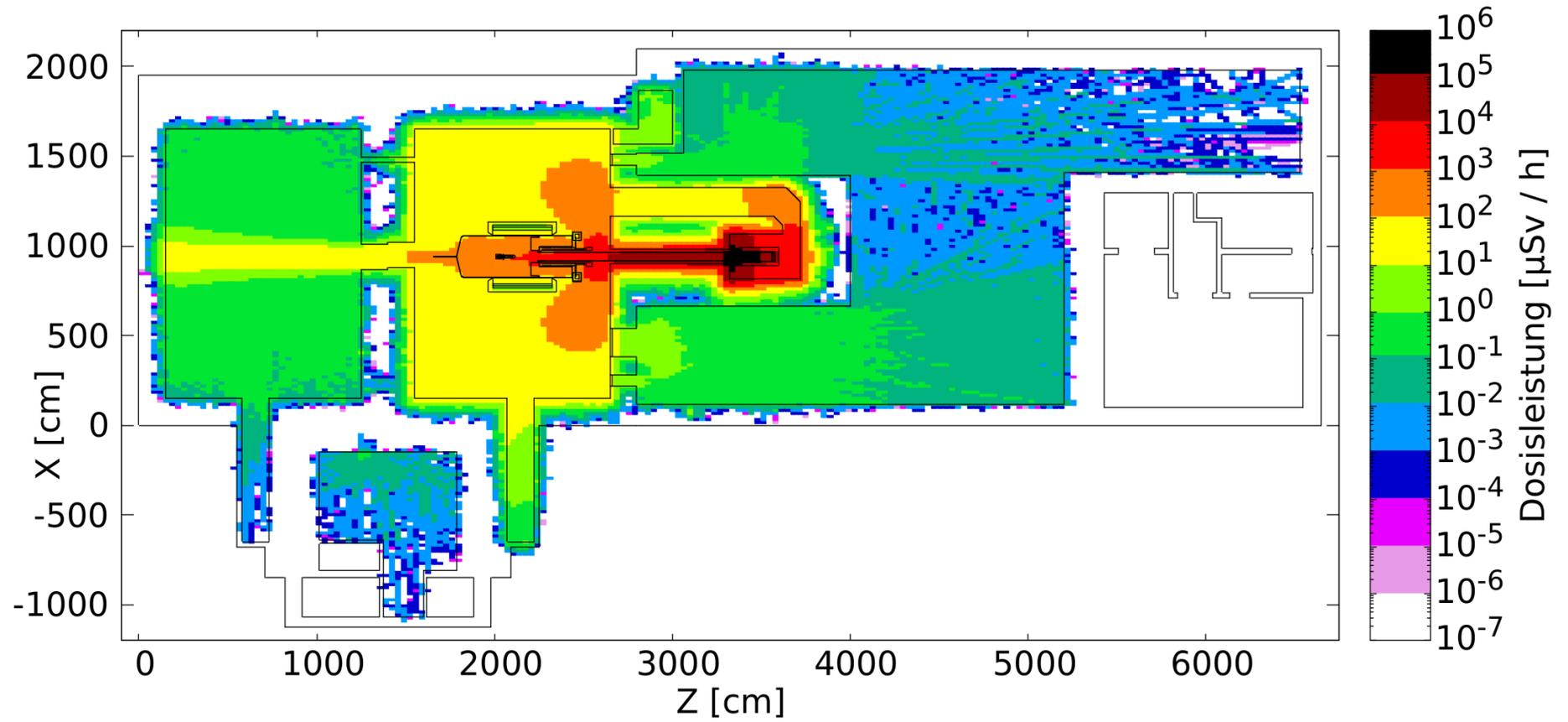


Abbildung A.47.: Betrachtung der Äquivalenzdosisleistung ausgehend von dem Zerfall radioaktiver Nuklide nach einer Abklingzeit von $t_a = 0$ h

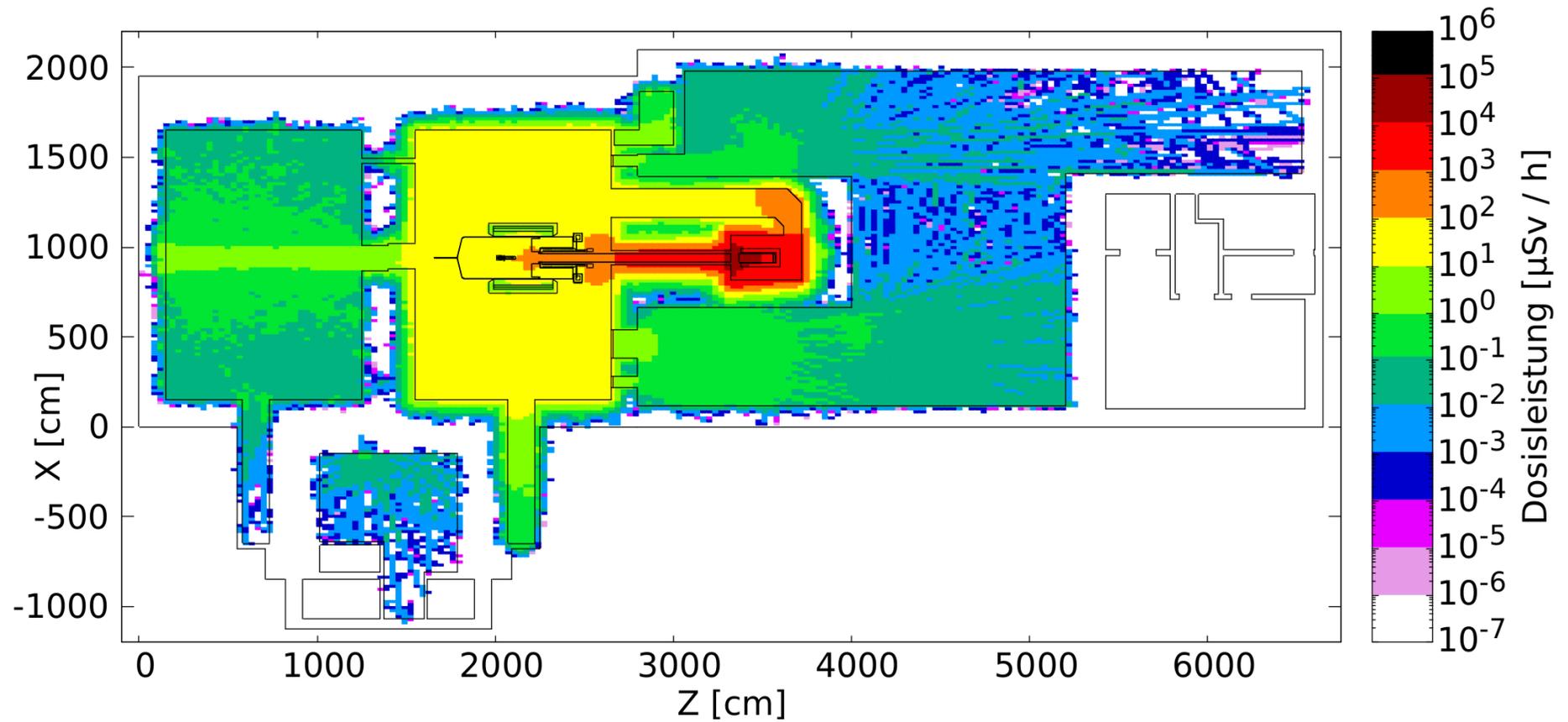


Abbildung A.48.: Betrachtung der Äquivalenzdosisleistung ausgehend von dem Zerfall radioaktiver Nuklide nach einer Abklingzeit von $t_a = 1$ h

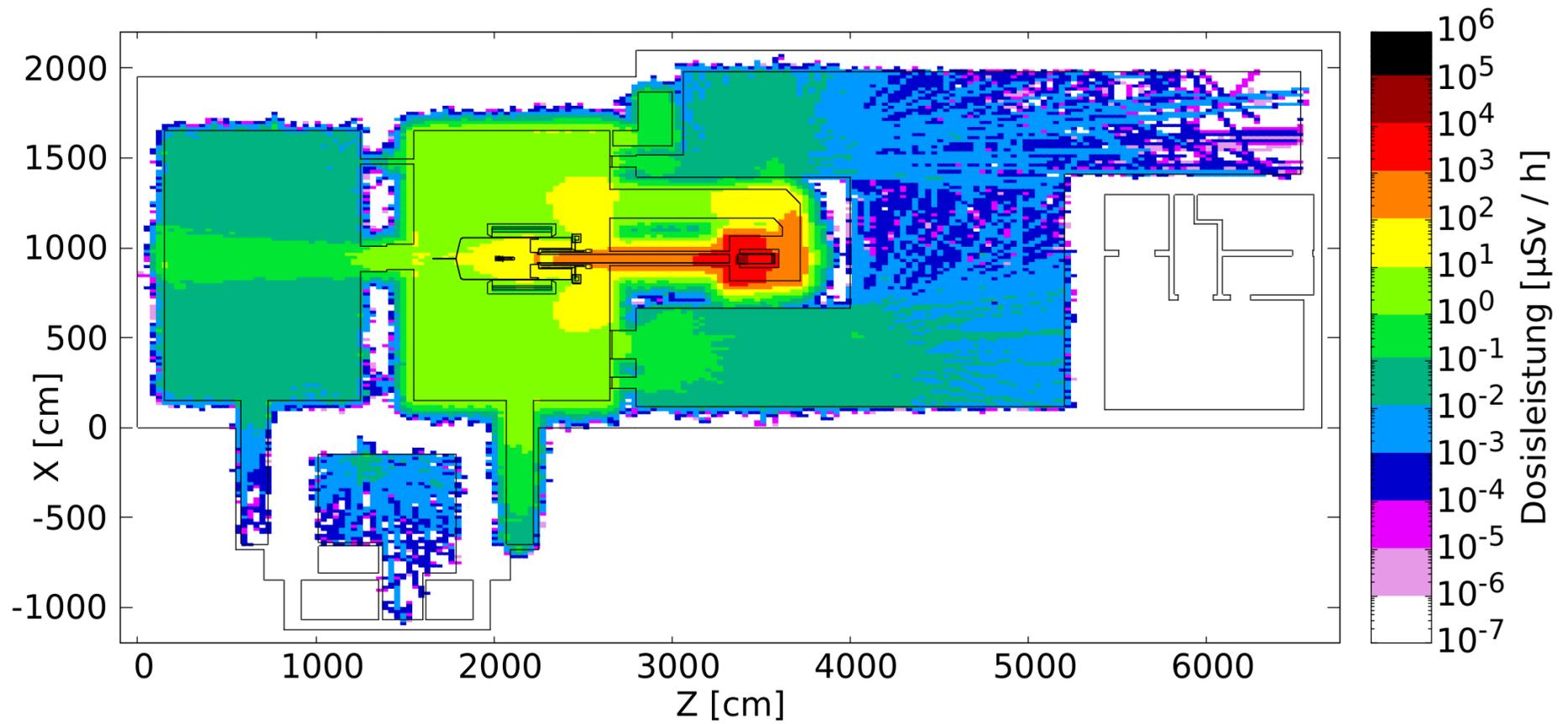


Abbildung A.49.: Betrachtung der Äquivalenzdosisleistung ausgehend von dem Zerfall radioaktiver Nuklide nach einer Abklingzeit von $t_a = 1$ d

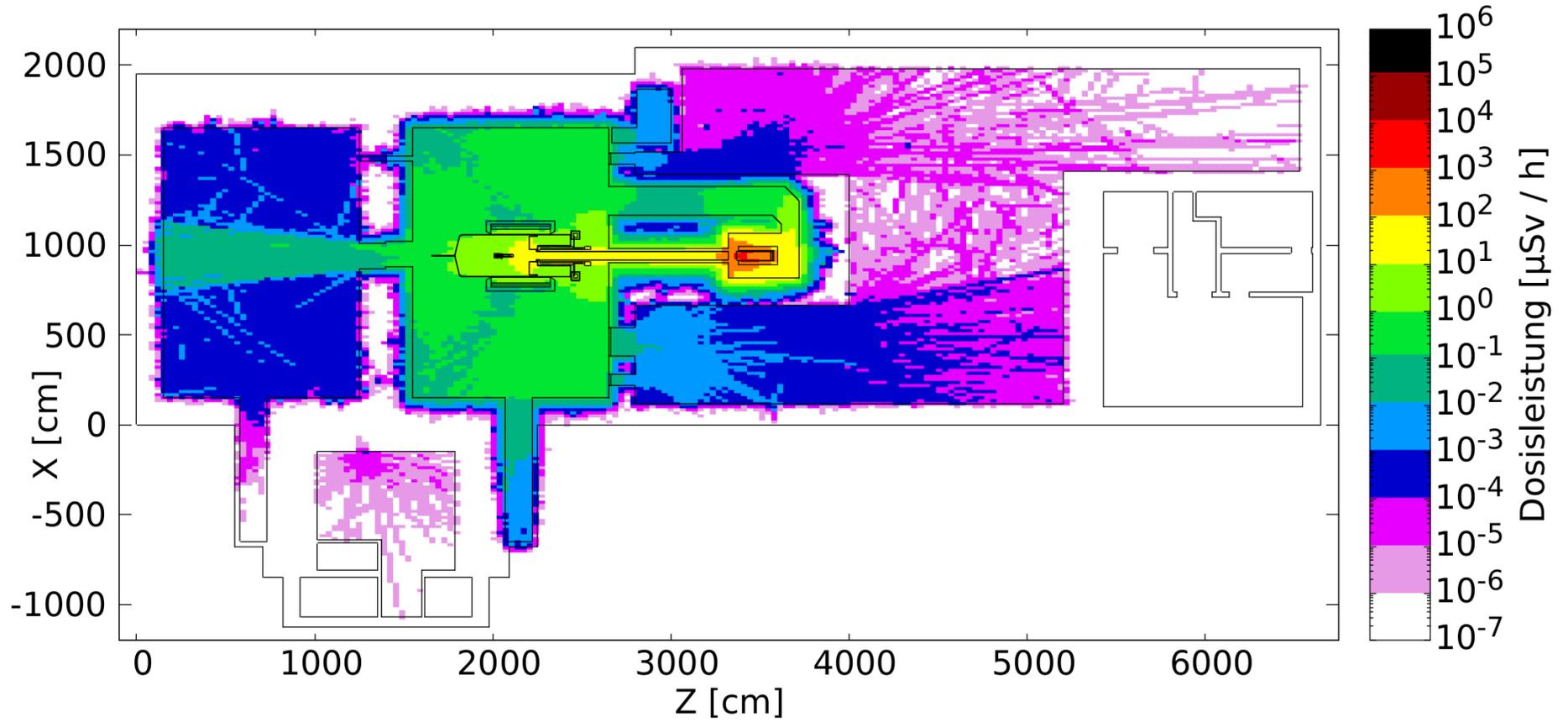


Abbildung A.50.: Betrachtung der Äquivalenzdosisleistung ausgehend von dem Zerfall radioaktiver Nuklide nach einer Abklingzeit von $t_a = 1$ w

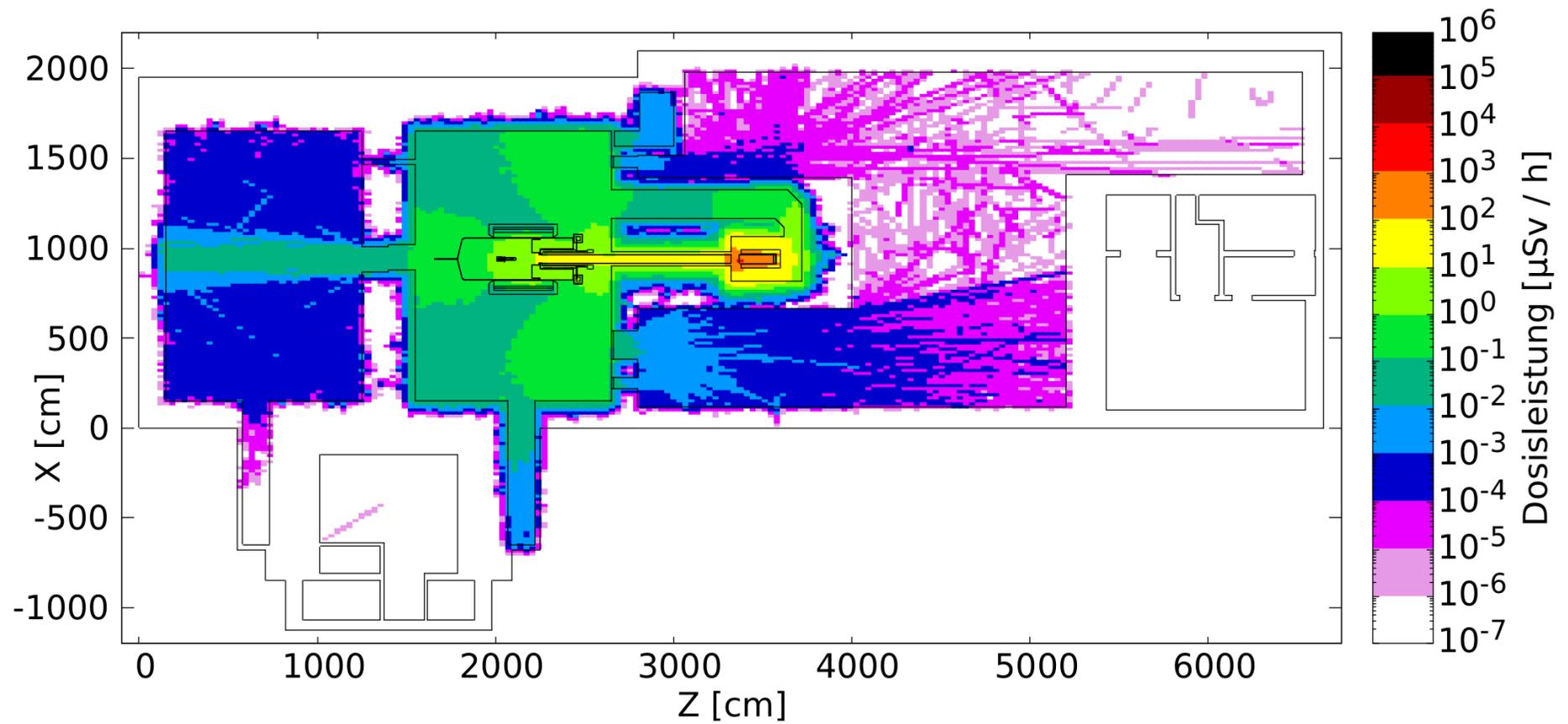


Abbildung A.51.: Betrachtung der Äquivalenzdosisleistung ausgehend von dem Zerfall radioaktiver Nuklide nach einer Abklingzeit von $t_a = 4$ w