



Industrie Service

**Mehr Sicherheit.
Mehr Wert.**

Strahlenschutzgutachten

im Rahmen der Sachverständigentätigkeit nach § 20 AtG zur
Begutachtung der Einhaltung der Strahlenschutzverordnung
(StrlSchV) im Forschungsexperiment Wendelstein 7-X im
Hinblick auf die Schutzwirkungen der Torushalle sowie ggf.
Unterbreitung von Vorschlägen für weitere Maßnahmen
am Max-Planck-Institut für Plasmaphysik (IPP)
am Standort: 17491 Greifswald, Wendelsteinstraße 1

Datum: 23.10.2013

Unsere Zeichen:
IS-ATA1-DRE/Bit

Dokument:
GA-IPP-W7X-01ges.docx

Das Dokument besteht aus
118 Seiten
Seite 1 von 118

Die auszugsweise Wiedergabe des
Dokumentes und die Verwendung
zu Werbezwecken bedürfen der
schriftlichen Genehmigung der
TUV SUD Industrie Service GmbH.

Die Prüfergebnisse beziehen
sich ausschließlich auf die
untersuchten Prüfgegenstände.

Oktober 2013

Erstellt im Auftrag des

Landesamtes für Gesundheit und Soziales, Mecklenburg-
Vorpommern

von der TÜV SÜD Industrie Service GmbH



Sitz: München
Amtsgericht München HRB 96 869
USt-IdNr. DE129484218
Informationen gemäß § 2 Abs. 1 DL-InfoV
unter www.tuev-sued.de/impressum

Aufsichtsrat:
Karsten Xander (Vorsitzender)
Geschäftsführer:
Ferdinand Neuwieser (Sprecher),
Dr. Ulrich Klotz, Thomas Kainz

Telefon: +49 351 4202-324
Telefax: +49 351 4202-356
www.tuev-sued.de
TÜV[®]

TÜV SÜD Industrie Service GmbH
Region Nordost
Abteilung Strahlenschutz
Drescherhäuser 5d
01159 Dresden
Deutschland

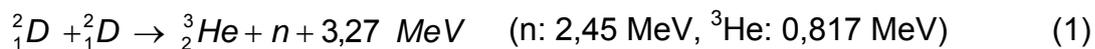
Inhaltsverzeichnis		Seite
1	Einleitung	4
2	Allgemeine Aufgabenstellung und Bewertungsgrundlagen	7
3	Torushalle für den Betrieb des Fusionsexperiments	11
3.1	Zweckbestimmung	11
3.2	Strahlungsquelle und notwendige Abschirmung	13
3.3	Realisierte Abschirmung (Wände, Decken, Tore)	22
3.3.1	Datenlage	22
3.3.2	Ergänzende Beprobung der Torushallenwände	35
3.3.3	Systematische Untersuchung der Abhängigkeit der DL	45
4	Halterungen und Risse	58
4.1	Halterungen	58
4.2	Risse	60
5	Wanddurchbrüche	62
6	Weitere Strahlenschutzberechnungen	68
6.1	Konkurrenzreaktionen (DT-Reaktion)	68
6.2	Vergleich der Flussdichte-Dosisleistungs-Beziehungen	77
7	Zusammenfassung	81

Anlagen

A	Verwendete Unterlagen	92
A 1	Begutachtungsunterlagen	92
A 2	Gesetze, Verordnungen, Regeln, Richtlinien und Normen	97
A 3	Schriftverkehr, Gutachten, Literatur und Veröffentlichungen	99
B	Empfehlungen	102
C	MC-Simulation zu Berechnungen der ODL-Verteilung	103
D	Relevante Wirkungsquerschnitte für Neutronenreaktionen	113
E	Zusammenstellung der Berechnungsmodelle	116
F	Bauliche Darstellungen der Torushalle	117

1 Einleitung

Das Max-Planck-Institut für Plasmaphysik (IPP) mit Hauptsitz in Garching errichtet gegenwärtig am Standort des IPP-Teilinstituts Greifswald das Fusionsexperiment Wendelstein 7-X /U 1/. An dem nach dem Stellaratorprinzip designten Forschungsprojekt sollen alle Anlagenkomponenten (Plasmagefäß, Magnetspulen, Divertoren, Systeme zur Aufheizung des Plasmas u.a.) für den Betrieb eines Fusionsreaktors getestet und optimiert werden. Die Experimente zum Test und zur Optimierung der Anlagenkomponenten sollen in der überwiegenden Betriebszeit mit einem Wasserstoffplasma erfolgen /U 2/. Nur über sehr begrenzte Zeiträume (max. 1,4 h pro Jahr) sollen die Experimente mit einem Deuterium-Plasma durchgeführt werden, bei dessen Betrieb infolge der Kernreaktion (1) Neutronen mit einer Energie von $E_n = 2,45 \text{ MeV}$ erzeugt werden. Die für die Experimente mit einem Deuterium-Plasma relevanten Kernreaktionen sind im Folgenden zusammengestellt:



Bei den vorgesehenen Experimenten mit einem Deuterium-Plasma (ca. 500 Pulse pro Jahr mit einer Dauer von 10 s) sind aus der DD-Reaktion (1) Neutronenraten von $6 \cdot 10^{15} \text{ s}^{-1}$ zu erwarten, was zu einer Neutronenzahl von ca. $6 \cdot 10^{16}$ pro Puls bzw. zu einer jährlichen Neutronenzahl von $3 \cdot 10^{19}$ führt. Obwohl der Betrieb mit Tritium als „Brennstoff“ für das Plasma ausdrücklich ausgeschlossen wird, entsteht durch die Konkurrenzreaktion (2a) eine geringe Menge Tritium im Plasma (Tritiumrate: ca. $6 \cdot 10^{15} \text{ s}^{-1}$) aus der über die DT-Reaktion (2b) Neutronen mit einer maximalen Energie von $E_n = 14,1 \text{ MeV}$ erzeugt werden. Entsprechend der Antragsunterlagen soll die, aus der Kernreaktion (2b), resultierende Neutronenrate ca. $2,9 \cdot 10^{13} \text{ s}^{-1}$ betragen, was etwa 1/200 der Neutronenrate aus der DD-Reaktion (1) entspricht. Gemäß Feststellung im Sicherheitsbericht /U 2/ sind die Neutronen aus der DT-Reaktion (2b) bei den Berechnungen zum baulichen Strahlenschutz der Torushallenwände vernachlässigbar. Bei der Dimensionierung der Abschirmungen gegen die beim Fusionsexperiment entstehende Neutronen- und Gammastrahlung (im Gutachten allgemeiner mit Photonenstrahlung bezeichnet) wurden als Primär- oder Quellteilchen ausschließlich die Neutronen ($E_n = 2,45 \text{ MeV}$, $3 \cdot 10^{19}$ Neutronen pro Jahr) der DD-Reaktion betrachtet.

In den vorliegenden Unterlagen zur Berechnung des baulichen Strahlenschutzes und der Dimensionierung der Torushallenwände (Nord-, Ost-, Süd- und Westwand sowie Hallendecke) wird abgeleitet, dass zur optimalen Abschirmung der entstehenden Kernstrahlung bzw. der daraus resultierenden Ortsdosis ein spezieller Strahlenschutzbeton erforderlich ist. Der Hauptbestandteil des Strahlenschutzbetons ist Normalbeton mit der Rohbetondichte von $2,3 \text{ g/cm}^3$. Zur effektiven Abschirmung der Neutronenstrahlung und der Sekundärstrahlung (Photonen) wurde eine Betonmischung identifiziert, die einen minimalen Wassergehalt (Wasservolumenanteil) von 120 l pro m^3 Beton und einen Borgehalt (Bormassenanteil) von mindestens 1000 ppm enthalten muss. Durch Zugabe von ca. 17,5 ... 19,4 kg des Zuschlagsstoffes Colemanit ($2 \text{ CaO} \cdot 3 \text{ B}_2\text{O}_3 \cdot 5 \text{ H}_2\text{O}$) auf 1 m^3 Normalbeton wird der erforderliche Bormassenanteil im Beton erreicht.

Mit den Schreiben /L 1, L 2/ und dem Werkvertrag /L 3/ wurde die TÜV SÜD Industrie Service GmbH im Rahmen der Sachverständigentätigkeit nach § 20 AtG /R 2/ mit der Erstellung eines weiteren Gutachtens /R 7/ zum Antrag auf Genehmigung zur Errichtung einer Anlage zur Erzeugung ionisierender Strahlung (Fusionsexperiment) nach § 11 StrlSchV /R 1/ beauftragt. Der Auftrag umfasst die Prüfung der Genehmigungsvoraussetzungen gemäß § 13 StrlSchV /R 1/. Demnach sind in die Begutachtung die Torushalle und alle angrenzenden Raumbereiche, in denen beim strahlenschutzrelevanten Betrieb (DD-Reaktion) des Fusionsexperiments Wendelstein 7-X Anforderungen an den Strahlenschutz bestehen, einbezogen.

Die zu begutachtenden Sachverhalte sind in den einzelnen Kapiteln des Gutachtens eingeordnet. So werden ausgehend von den vorgelegten Berechnungen /U 4 - U 9/ in Kapitel 3 die Berechnungsmodelle und die angenommenen Ausgangsdaten auf deren Plausibilität geprüft. Des Weiteren werden die Berechnungsergebnisse für die Ortsdosen aus der Direktstrahlung beim Betrieb des Fusionsexperiments bewertet. Wenn zur Bewertung der vorgelegten Dosisberechnungen alternative Berechnungen erforderlich wurden, wurden für einzelne Modelle komplexe MC-Simulationen (siehe Tab. E01 in Anlage E) mit den analogen Ausgangsdaten durchgeführt. Diese MC-Simulationen wurden mit dem Berechnungscode MCNPX (Version 2.6.0 von 2008) /L 11/ absolviert.

Die weiteren Sachverhalte, die im Leistungsumfang der Begutachtung liegen, wurden in den entsprechenden Kapiteln (3 - 6) bewertet und begutachtet.

Das Gutachten enthält Empfehlungen (E) zur Optimierung des Strahlenschutzes, die in Anlage B zusammengefasst sind.



Der Begutachtung liegen die vom IPP vorgelegten Begutachtungsunterlagen sowie die sonstigen im Unterlagenverzeichnis (vgl. Anlage A 1) aufgeführten weiteren Unterlagen zugrunde. Die bei dem Gutachten berücksichtigten Gesetze, Verordnungen, Regeln, Richtlinien und Normen sind in Anlage A 2 zusammengefasst. Der Schriftverkehr, weitere Gutachten bzw. weiterführenden Literatur sind in Anlage A 3 angeführt.

An der Erstellung des Gutachtens waren folgende Mitarbeiter beteiligt:

Mitarbeiter

Fachgebiet

Dr. Michel Bittner

alle Teilgebiete

Dipl.-Ing.(BA) Jens Richter

Halterungen und Risse
Kernbohrungen
Probenahme und Auswertung
Rückverfüllung

2 Allgemeine Aufgabenstellung und Bewertungsgrundlagen

Das Strahlenschutzgutachten dient als eine Grundlage für die Entscheidung der Frage, ob die Anlage gemäß Errichtungsgenehmigung für das Forschungsexperiment Wendelstein 7-X errichtet wurde. In diesem Zusammenhang ist zu prüfen, ob insbesondere die Schutzwirkungen der Torushalle im Forschungsexperiment Wendelstein 7-X im Hinblick auf die Strahlenschutzverordnung (StrlSchV) /R 1/ eingehalten werden. Dabei ist das oberste Ziel (Schutzziel), die im Untersuchungsauftrag ausgewiesenen Fragestellungen des Schutzes der Gesundheit von Menschen und der Umwelt vollumfänglich zu beantworten.

Die Aufgabenstellung des Angebotes der TÜV SÜD Industrie Service GmbH /L 2/ für die vorgesehene Sachverständigentätigkeit umfasst dabei folgende detailliert zu prüfende Sachverhalte:

1. Prüfung der vorhandenen Unterlagen (Akten, Gutachten, Berechnungen usw.), ob diese ausreichend und aussagefähig sind, die im Untersuchungsauftrag geforderten Prüfungen/Nachweise erbringen zu können. Nur ein positives Gesamtergebnis führt direkt zur 2. Leistungsposition, andernfalls wird, ggf. auch nur teilweise mit der 3. und 4. Leistungsposition fortgefahren.
2. Erstellung eines Gutachtens aus der Sichtung und Bewertung der vorhandenen Unterlagen (Akten, Gutachten, Berechnungen usw.), mit dem untersucht wird, ob das Schutzziel sicher erreicht wird. Dabei sind insbesondere die folgenden Nachweise zu führen:
 - a) Sichere Einhaltung der Grenzwerte der StrlSchV /R 1/, insbesondere hinsichtlich des Schutzes des Personals vor zusätzlicher Strahlenexposition nach dem Minimierungsgebot und der Einhaltung der Grenzwerte für beruflich strahlenexponierte Personen nach § 54 StrlSchV /R 1/ bzw. für die Bevölkerung nach § 46 StrlSchV /R 1/, damit auch für nicht beruflich strahlenexponiertes Betriebspersonal, beim Betrieb der Anlage mit der in der Errichtungsgenehmigung /U 1/ beantragten Neutronenrate pro Jahr.
 - b) Risse in der Ummantelung des Experimentierraumes (Schutzhülle) haben keine sicherheitsrelevanten Auswirkungen in Bezug auf den Strahlenschutz.

- c) Nachträglich vorgenommene Wanddurchbrüche in der Schutzhülle haben keine sicherheitsrelevanten Auswirkungen in Bezug auf den Strahlenschutz.
 - d) Die gesicherten Betongüteparameter gewährleisten eine ausreichende Strahlenschutzwirkung.
 - e) Eventuelle gegebene Abweichungen zu den in der Errichtungsgenehmigung vorgeschriebenen Betongüteparametern sind im Hinblick auf die Erreichung des Schutzziels zu bewerten.
 - f) Die entsprechend der Berechnungen vom 23.08.2000 vorgenommene Verstärkung der Tore ist entsprechend den Anforderungen der StrlSchV ausreichend.
 - g) Prüfung der Einhaltung der Auflagen aus der Errichtungsgenehmigung zur Ausführung der Schutzhülle und ggf. Bewertung im Hinblick auf das Schutzziel.
3. Durchführen von weitergehenden Untersuchungen, wenn die Unterlagen für die Erbringung des Nachweises gemäß Untersuchungsauftrag nicht ausreichend sind. Wobei insbesondere die folgenden Fragestellungen bearbeitet werden sollten:
- a) Entwicklung von Methoden, die eine sichere Bewertung der Strahlenschutzzeigenschaften und der Strahlenschutzhülle der Torushalle ermöglichen (Abschirmberechnungen, Betonproben)
 - b) Feststellung der am besten geeigneten Methode unter Berücksichtigung von sicherheitstechnischen Aspekten
 - c) Bewertung des Restrisikos, wenn sich der gesicherte Nachweis der Erfüllung der Schutzziele erst durch Dosisleistungsmessungen während der Betriebsphase (Probetrieb im Sinne des § 14 Abs. 5 StrlSchV) erbringen lässt.
4. Unterbreitung von Vorschlägen und gutachterliche Bewertung von Maßnahmen, wenn die Einhaltung der Anforderungen der StrlSchV nicht oder nicht vollständig nachgewiesen werden kann.
5. Teilnahme an zwei öffentlichen Veranstaltungen des Landesamtes für Gesundheit und Soziales für interessierte Bürgerinnen und Bürger sowie der Presse

1. Informationsmeeting vor dem Beginn der Bearbeitung des Gutachtens im Dezember 2012

2. Vorstellung und Erläuterung der Ergebnisse des Gutachtens

Hierzu wird geprüft, ob die Vorschriften der StrlSchV /R 1/ eingehalten und die nach dem Stand von Wissenschaft und Technik erforderlichen Ausrüstungen vorhanden und Maßnahmen getroffen sind. Gemäß Strahlenschutzverordnung /R 1/ sind insbesondere folgende Anforderungen zu erfüllen:

- Jede unnötige Strahlenexposition oder Kontamination von Mensch und Umwelt ist zu vermeiden und jede Strahlenexposition oder Kontamination von Mensch und Umwelt ist unter Beachtung des Standes von Wissenschaft und Technik und unter Berücksichtigung aller Umstände des Einzelfalles auch unterhalb der in der Strahlenschutzverordnung festgelegten Grenzwerte so gering wie möglich zu halten (§ 6 StrlSchV).

- Die Grenzwerte für beruflich strahlenexponierte Personen nach §§ 54, 55 StrlSchV /R 1/ bzw. für die Bevölkerung nach § 46 StrlSchV /R 1/ müssen eingehalten werden.

- Darüber hinaus sind zum Schutz des Personals vor Kontamination und Inkorporation die in den §§ 43 und 44 StrlSchV enthaltenen Schutzvorschriften zu beachten.

Unseren Prüfungen haben wir folgende übergeordnete Bewertungsgrundlagen zugrunde gelegt:

- Verordnung über den Schutz vor Schäden durch ionisierende Strahlen (Strahlenschutzverordnung - StrlSchV) vom 20.07.2001 (BGBl. I, S. 1714) mit letzter Änderung vom 24.02.2012 (BGBl. I, S. 212)

- Verordnung über den Schutz vor Schäden durch ionisierende Strahlen („Alte“ Strahlenschutzverordnung – StrlSchV alt) vom 13.10.1976 i.d.F. der Bekanntmachung vom 30. Juni 1989 (BGBl. I, S. 1321, 1926)



- Atomgesetz/Gesetz über die friedliche Verwendung der Kernenergie und den Schutz gegen ihre Gefahren (AtG) vom 15.07.1985 (BGBl. I, S. 1565) mit letzter Änderung vom 08.11.2011 (BGBl. I S. 2178)
- DIN EN 12504-1: Prüfung von Beton in Bauwerken, Teil 1: Bohrkernproben, 07/2009
- BAW-Merkblatt der Bundesanstalt für Wasserbau „Bohrkernentnahme für Bauwerksuntersuchungen (MBK)“, Ausgabe 2012
- BAW-Merkblatt der Bundesanstalt für Wasserbau „Zweitbeton (MZB)“, Ausgabe 2012
- Richtlinie des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton (DAfStB): Herstellung und Verwendung von zementgebundenem Vergussbeton und Vergussmörtel, Ausgabe 2011
- BMI: Rahmenrichtlinie über die Gestaltung von Sachverständigengutachten in atomrechtlichen Verwaltungsverfahren vom 15.12.1983 (GMBI. 1984, Nr. 2, S. 21)
- unsere Kenntnisse aus den entsprechenden Begehungsberichten /L 4, L 5, L 6/
- Veröffentlichungen in der Fachliteratur.

Die speziellen Bewertungsgrundlagen werden in den entsprechenden Kapiteln jeweils aufgeführt und sind in Anlage A 2 bzw. A 3 zitiert.

3 Torushalle für den Betrieb des Fusionsexperiments

3.1 Zweckbestimmung

Während des Betriebes des Fusionsexperiments Wendelstein 7-X sollen Tests und Optimierungen aller Anlagenkomponenten durchgeführt werden, wobei in der überwiegenden Betriebszeit das Fusionsexperiment mit einem Wasserstoffplasma betrieben werden soll /U 2/. Über sehr begrenzte Zeiträume von insgesamt etwa 1,4 h pro Jahr sind Experimente mit einem Deuterium-Plasma vorgesehen. Beim Betrieb mit Deuterium werden infolge der Kernreaktion (1) Neutronen mit einer Energie von $E_n \approx 2,45$ MeV erzeugt. Dazu ist für den sicheren Einschluss der Anlagenkomponenten, von denen radioaktive Strahlung (primäre Kernstrahlung, sekundäre Strahlung infolge an Aktivierung) ausgeht, eine Hülle um das Fusionsexperiment zu errichten.

Neben der Sicherung der für die vorgesehenen Traglasten erforderlichen Statik kommt dem Baukörper der Torushalle die wesentliche Funktion für die Abschirmung der Kernstrahlung zu. Diese nukleare Strahlung besteht im Wesentlichen aus Neutronen- und Photonenstrahlung. Die Neutronenstrahlung, deren Quelle in der Erzeugung von ca. 2,45 MeV Neutronen bei den Kernfusionsreaktionen (1) liegt, ist die primäre Strahlungskomponente. Die Photonenstrahlung, die hauptsächlich aus Gammastrahlung besteht, entsteht bei sekundären Prozessen wie der Streuung von Neutronen (inelastisch) oder im Resultat von Kernreaktionen (Absorption von Neutronen), wenn die entstandenen Atomkerne sich abregen und Gammastrahlung emittiert wird. Beide Strahlungskomponenten, die im Fusionsreaktor Wendelstein 7-X und an dessen Strukturelementen bzw. den Betriebsmaterialien (z. B. Kühlwasser) entstehen, haben stark durchdringende Wirkung und besitzen somit eine hohe Reichweite (große mittlere freie Weglänge) in Luft.

Für die erforderliche Abschirmung der primären Neutronenstrahlung ($E_n \approx 2,45$ MeV), die im Deuterium-Plasma entsteht, und der sekundären Strahlungskomponenten wurden die Wände und Decke der Torushalle aus speziellem Strahlenschutzbeton konzipiert /U 2/. Sowohl die bautechnischen Eigenschaften des geplanten Strahlenschutzbetons /U 11 – U 15, U 20/ als auch dessen Abschirmwirkung gegen die erwartete Kernstrahlung /U 4 – U 9, U 16 – U 19/ wurden in zahlreichen Gutachten, Berichten und Veröffentlichungen untersucht.

Im Resultat aller Untersuchungen wurde eine Zusammensetzung des Strahlenschutzbetons mit einer Rohbetondichte von $2,3 \text{ g/cm}^3$ favorisiert, die einen Gesamtwassergehalt

(Volumenanteil) von 120 l pro m³ Beton und einen Massenanteil an natürlichem Bor von 1000 ppm enthält. Bei dieser Zusammensetzung wurden Dicken der Torushallenwände von 180 cm und der Torushallendecke von 120 cm ermittelt /U 2, U 7, U 9/, um den Anforderungen an den Strahlenschutz /R 1, R 2/ zu entsprechen (s. Anlage F).

Bewertungsmaßstäbe

Um die grundsätzliche Funktion der Torushallenwände aus der Sicht des baulichen Strahlenschutzes bewerten zu können, wurden einschlägige Normen zur Klassifikation von Abschirmbetonen, wie die DIN 25413 Teil 1 und Teil 2 /R 10/, sowie die allgemeinen Strahlenschutzgrundsätze §§ 4-6 StrlSchV /R 1/ herangezogen.

Wertung

Wesentlich für eine gute Abschirmung von Neutronenstrahlung sind neben der Dichte des Betons, wobei die Rohbetondichte von Normalbeton in Bereichen von 2,0-2,6 g/cm³ /R 10/ liegen muss, der Gesamtwassergehalt (Summe aus Zugabewasser, Wasser in dem Gestein bzw. Wasser in Zuschlagstoffen) zur Neutronenmoderation und Absorption sowie der Anteil von speziellen Zuschlagstoffen zur Neutronenabsorption, wie Bor in Form von Colemanit oder Borcarbid.

Während die Rohbetondichte als eine wesentliche Größe für die Abschirmwirkung einer Betonwand zu Beginn der Untersuchungen /U 4 – U 14/ eher beiläufig in die Betrachtungen/Abschätzungen einbezogen wurde, widmete man dem Wassergehalt und dem Bor Gehalt im Normalbeton großen Raum in den Studien und Gutachten. In den weiteren Berechnungen wurde von einer Betondichte von 2,3 g/cm³ ausgegangen, wobei nicht berücksichtigt wurde, dass bei Zugabe von zusätzlichem Wasser ($\rho_w=1,0$ g/cm³) und Zuschlagstoffen geringerer Dichte, wie Colemanit ($\rho_c=2,2$ g/cm³), sich für die Betonmischung eine geringere Dichte als 2,3 g/cm³ ergeben muss, wenn nicht Gesteinskörnung höherer Dichte zugegeben wird. Der unmittelbare Einfluss der Dichte auf die Wanddicke wird mit einer einfachen Abschätzung deutlich. Die Strahlungsschwächung hängt direkt (exponentiell) von der Flächenmasse $\mu = \rho \cdot d$, also dem Produkt aus Dichte und Wanddicke, ab. Bei Reduzierung der Dichte um 0,1 g/cm³ (ca. 4,3%) muss die Wanddicke um etwa 8 cm größer sein, um die gleiche Abschirmwirkung zu erzielen. Eine ggf. geringere Betondichte wird aber durch die Wirkung der Zuschlagstoffe hinsichtlich der Abschirmwirkung kompensiert, wie sich im Weiteren zeigen wird.

Baustoff	Normalbeton mit Bor	Normalbeton	Normalbeton	Barytbeton	Borbeton	Borbeton *)	Borbeton *)	Beton gemäß Sicherheitsb.	Betonmischung realisiert *)	Borbeton #)
Parameter										
Dichte [g/cm ³]	2,3	2,3	2,3	3,25	2,3	2,3	2,3	2,3	ca. 2,3	2,25
Wassergehalt [l/m ³]	100	100	60	165	100	120	120	120	ca. 120	100
Borgehalt [ppm]	400	0	0	0	400	1000	1000	1000	ca. 1000	700
notw. Wanddicke [cm]	190	200	226	174	186	170	180	180	180	180
Dicke Bodenpl./Decke [cm]								120	120	
Datum:	20.03.1996	16.04.1996	16.04.1996	16.04.1996	16.04.1996	22.05.1996	22.08.1996	14.05.1997	1997-1998	Okt. 1998
Bemerkung:										
Neutr.-Quellstärke n/a	7,0E+19	7,0E+19	7,0E+19	7,0E+19	7,0E+19	3,0E+19	3,0E+19	3,0E+19	3,0E+19	3,0E+19
Grenzwert eff. Dosis mSv im a	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
Strahlungswichtungsfaktoren	ICRP 21	ICRP 21	ICRP 21	ICRP 21	ICRP 21	ICRP 21	ICRP 60	ICRP 60	ICRP 60	ICRP 60

*) Zuschlagstoff ist borhaltiges Colemanit (2 CaO · 3 B₂O₃ · 5 H₂O); #) IPP-Report: Neutrons at W 7-X, J. Junker, A. Weller, Oct. 1998 /U 9/

Tab. 3.1 Festlegungen zu Dichte und Wasser- bzw. Borgehalt des Normalbetons für die Torushallenwände (U 2, U 4 – U14)

Entsprechend den Anforderungen aus den Abschätzungen zur erforderlichen Betonzusammensetzung und den Angaben aus dem Sicherheitsbericht für den Antrag auf Errichtungsgenehmigung /U 2/ wurde eine mittlere Rohbetondichte von ca. 2,3 g/cm³ realisiert, darauf weisen auch die Auswertungen der Messergebnisse zu den Probewürfeln und den Kernbohrungen hin. Die Ausgangsbetrachtungen zu den Abschirmmaterialien und den erforderlichen Dicken der Torushallenwände können als abdeckend bewertet werden. Die wesentlichen Aussagen zum Vergleich der Vorgaben aus den Berechnungen zum baulichen Strahlenschutz ($\rho_B = 2,3 \text{ g/cm}^3$, $f_{ZW}^V = 120 \text{ l/cm}^3$, $f_{mD}^C = 1000 \text{ ppm}$) mit den Messergebnissen der Rückstellproben (Probewürfel) und den Kernbohrungen, die bereits in Gutachten und Berichten /U 14/ dargestellt wurden, und deren Interpretation erfolgt in den anschließenden Kapiteln des Gutachtens. Hier wird insbesondere auf den Einfluss des Wasser- und Borgehaltes in den Normalbetonwänden auf die Wirksamkeit der Abschirmung gegen Neutronen- bzw. Photonenstrahlung eingegangen.

3.2 Strahlungsquelle und notwendige Abschirmung

Als primäre Strahlungsquelle wurde für die Berechnungen zum baulichen Strahlenschutz in den Antragsunterlagen /U 4 – U 9, U 16 – U 19/ usw. sowie bei den weiterführenden Betrachtungen und Berechnungen des Gutachtens von einer Neutronenquelle mit quasi-monoenergetischen Neutronen aus der DD-Reaktionen (1) mit einer Energie von 2,45 MeV ausgegangen. Der Betrieb der Fusionsexperiments mit Tritium als „Brennstoff“ für das Plasma wird ausdrücklich ausgeschlossen /U 2/. Dennoch entsteht durch die Konkurrenzreaktion (2a) eine geringe Menge Tritium im Plasma (Tritiumrate: ca. $6 \cdot 10^{15} \text{ s}^{-1}$) aus der über die DT-Reaktion (2b) Neutronen mit einer maximalen Energie von $E_n = 14,1 \text{ MeV}$ erzeugt werden. Entsprechend den Antragsunterlagen soll die aus der Kernreaktion (2b) resultierende Neutronenrate ca. $2,9 \cdot 10^{13} \text{ s}^{-1}$ betragen, was etwa 1/200 der Neutronenrate

aus der DD-Reaktion (1) entspricht. Gemäß Feststellung im Sicherheitsbericht /U 2/ sind die Neutronen aus der DT-Reaktion (2b) bei den Berechnungen zum baulichen Strahlenschutz der Torushallenwände vernachlässigbar. Bei der Dimensionierung der Abschirmungen gegen die beim Fusionsexperiment entstehende Neutronen- und Photonenstrahlung wurden als Primär- oder Quellteilchen ausschließlich die Neutronen ($E_n = 2,45 \text{ MeV}$, $3 \cdot 10^{19}$ Neutronen pro Jahr) der DD-Reaktion betrachtet.

Bei der Beschreibung des Zeitverhaltens der vorgesehenen Experimente mit einem Deuterium-Plasma geht man von ca. 500 Pulsen pro Jahr mit einer Dauer von 10 s aus. Aus der DD-Reaktion (1) ist eine Neutronenrate von $6 \cdot 10^{15} \text{ s}^{-1}$ zu erwarten, was zu einer Neutronenzahl von ca. $6 \cdot 10^{16}$ pro Puls bzw. zu einer jährlichen Neutronenzahl von $3 \cdot 10^{19}$ führt. Diese Neutronenrate wird in etwa 5000 s, was ca. 1,4 h entspricht, pro Jahr erzeugt. Wenn man von einer jährlichen Arbeitszeit des Personals von 2000 h ausgeht, führt die in maximal 500 Impulsen pro Jahr emittierte Neutronenzahl zu einer mittleren Neutronenrate von $4,17 \cdot 10^{12} \text{ s}^{-1}$, wenn man eine kontinuierliche Exposition über 2000 h pro Jahr annimmt.

Bewertungsmaßstäbe

Die grundsätzlichen Anforderungen an die Neutronenquelle hinsichtlich Reaktionen und Neutronenraten werden in den Unterlagen zum Fusionsexperiment Wendelstein 7-X formuliert, des Weiteren wurden bekannte Lehrbücher der Kern- und Strahlenschutzphysik /L 15, L 16/ sowie die allgemeinen Strahlenschutzgrundsätze §§ 4-6 StrlSchV /R 1/ herangezogen.

Wertung

Das vorgesehene Zeitregime beim Betrieb des Fusionsexperiments entspricht den im Sicherheitsbericht /U 2/ dargestellten Anforderungen für die geplanten Experimente. Das betrifft insbesondere die angenommenen maximalen Pulsraten und Pulslängen für den Deuterium-Betrieb des Fusionsexperiments Wendelstein 7-X, die zu Neutronenraten von $3 \cdot 10^{19}$ pro Jahr führen. Diese Annahmen sind wesentliche Voraussetzungen für die Festlegung der Beton-Mixtur und für die Dimensionierung der Torushallenwände.

Eine weitere wesentliche Voraussetzung für die Planung der Abschirmungen und somit der Dimensionierung der Torushallenwände sind die Betrachtungen zu den möglichen Konkurrenz-Kernreaktionen (2-3), was in Kapitel 6.1 des Gutachtens abdeckend erfolgt.

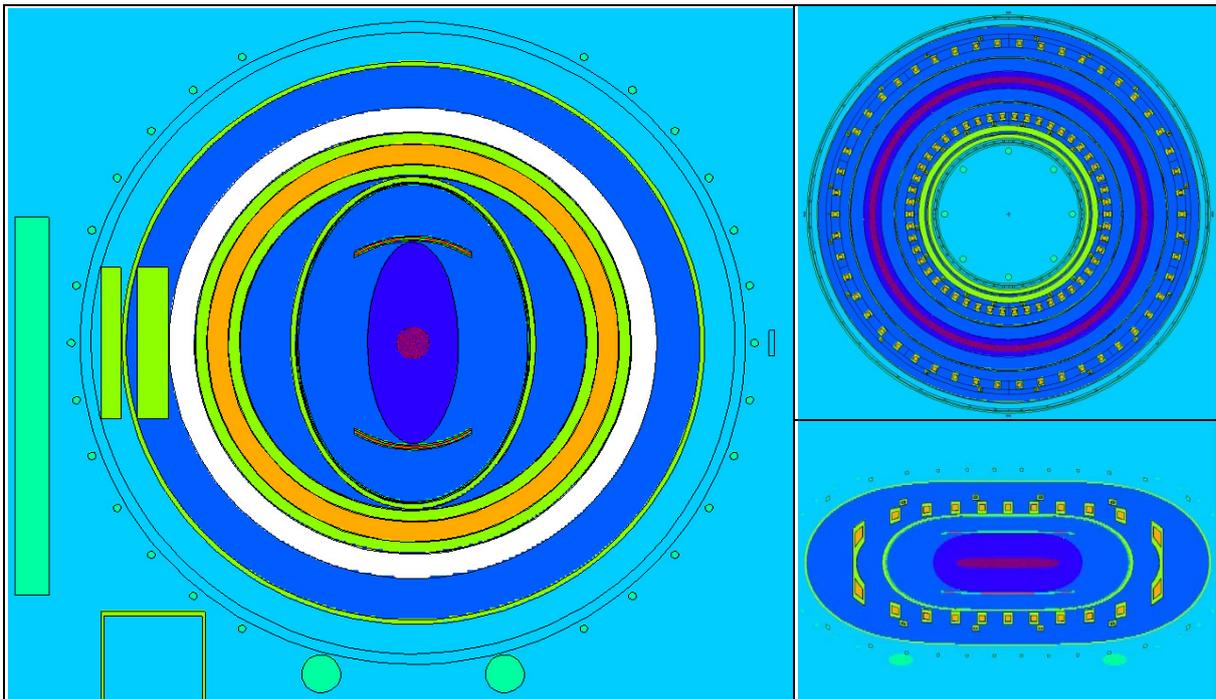


Abb. 3.1 a-c Vertikaler Schnitt (xz-Ebene) durch Torus im Modells W7XB34M mit Neutronenquelle als roter Kreis im Zentrum (li.), horizontaler Schnitt durch Torusdurchmesser (xy-Ebene) mit Neutronenquelle als roter Kreisring (re. oben) und vertikaler Schnitt (yz-Ebene in Torus-ring bei x=550 m) mit Neutronenquelle im Zentrum (re. unten) – nicht maßstabsgerecht

Die Berechnungen zum Gutachten wurden mit einer Normalverteilung der Neutronenenergie um den Mittelwert von 2,45 MeV mit einer Halbwertsbreite von 1% ausgeführt (s. Abb. C01a in Anlage C). Die Geometrie der Strahlungsquelle entspricht im Allgemeinen einer kreisförmigen Linienquelle (Kreisumfang des großen Torus-Radius), wobei in jedem Linienelement der Linienquelle eine isotrope Neutronenverteilung angenommen wurde. Bei den Berechnungen zum Gutachten wurde von einer toroidalen Volumenquelle mit dem großen Torus-Radius des Wendelsteinexperiments und einem kleinen Torus-Radius von 12,5 cm (Abb. 3.1 a-c) ausgegangen. Damit sind die Berechnungen zum Gutachten sowohl hinsichtlich der Energieverteilung der Quellneutronen ($E_n \approx 2,42...2,48$ MeV) als auch hinsichtlich des minimalen Abstandes von der Strahlungsquelle als konservativ anzusehen.

Bei der Simulation des Fusionsreaktor-Innenbereiches wurde zwischen Plasmakammer und Kryostaten sowie im Außenbereich auf die Zuführungen (ca. 300 Dome mit Rohren zu den inneren Komponenten aus Edelstahl) verzichtet. Dass diese Vereinfachung des Fusionsreaktor-Modells hinsichtlich der primären und sekundären Strahlungskomponenten möglich ist, zeigt die systematische Auswertung des Neutronen- und Photonenflusses in virtuellen Testdetektoren, die in der Simulation der Torushalle positioniert wurden. Die Testdetektoren sind in Abb.3.2 dargestellt, insbesondere sind die zur Auswertung der

Neutronen- und Photonenflussdichte relevanten Testdetektoren (915 und 916) in Form von Kugeldetektoren auf der x-Achse in Abb. 3.2 b (rechts) auszumachen. Ebenso sind in Abb. 3.2 b die 33 Berechnungsdetektoren für die Torushallenwände (12 Detektoren 821 ... 832 der Ostwand auf der x-Achse, 12 Detektoren 801 ... 812 der Nordwand auf der y-Achse und 9 Detektoren 841 ... 849 der Decke auf der z-Achse) dargestellt. Bei den Simulationsrechnungen werden nur diese Torushallenwände (Nord- und Ostwand) betrachtet, da sie wegen der asymmetrischen Positionierung der Fusionsanlage in der Torushalle im Vergleich zu der Süd- bzw. Westwand die kritischeren Anforderungen an den Strahlenschutz aufweisen. Wenn der bauliche Strahlenschutz für die Nord- bzw. Ostwand erfüllt ist, dann ist er für die anderen Wände wegen des größeren mittleren Abstandes zur quasi-isotropen Strahlenquelle erst recht erfüllt.

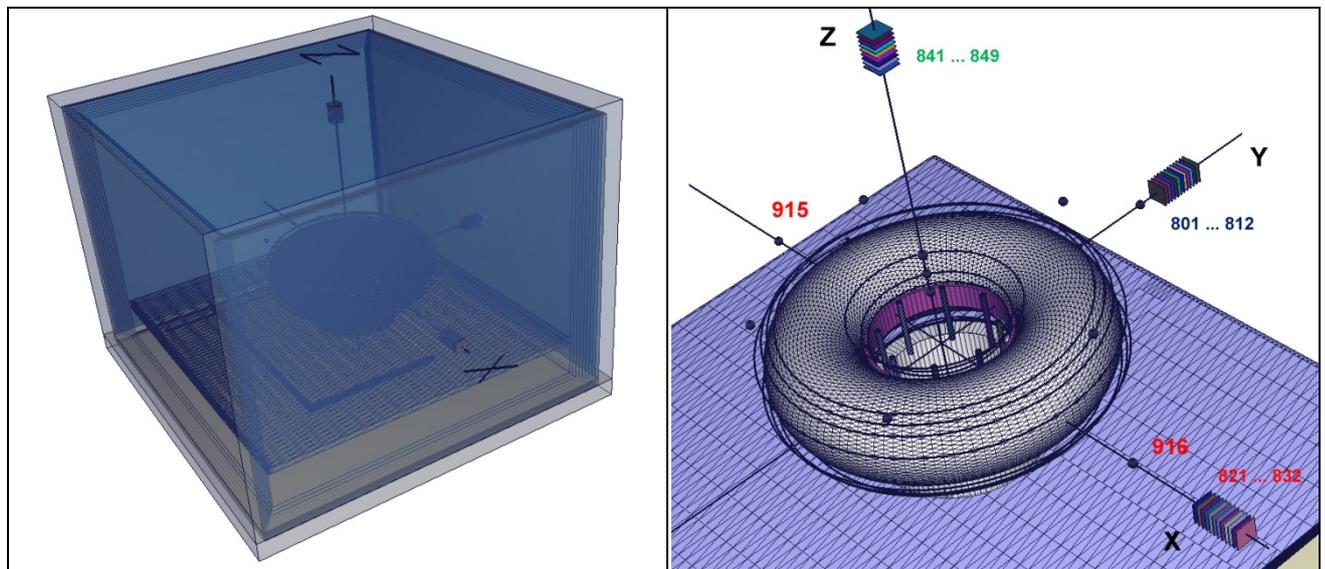


Abb. 3.2 a, b Abbildung des Modells (W7XB34M) der Torushalle (links, transparent) und Modell des Fusionsexperiments Wendelstein 7-X mit Koordinaten-Achsen und allen Testdetektoren (Kugeldetektoren 915 und 916 auf der x-Achse)

Die Verifikationsergebnisse sind in den folgenden Abbildungen 3.3 a-d und 3.4 a, b wiedergegeben. Aus dem Vergleich der berechneten spektralen Verteilungen der Neutronenflussdichte in den Testdetektoren, die in der Torushalle (Detektor 915 bei $x=-1150$ m und 916 bei $x=1150$ m) positioniert wurden, ergibt sich in den Abb. 3.2, dass die bei der Begutachtung erstellten MC Simulationsmodelle (ab Modell W7XB261) in recht guter Übereinstimmung zu den Monte-Carlo-Modellen für die Berechnung des baulichen Strahlenschutzes aus den Jahren 2009-2012 sind. Aus früheren Gutachten zu Berechnungen der Abschirmwirkung der Torushallenwände /U 4 - U 9, U 15 - U 19/ liegen dem Gutachter keine spektralen Verteilungen der Neutronen- bzw. Photonenflussdichte in der Torushalle vor, die zum Vergleich herangezogen werden können.

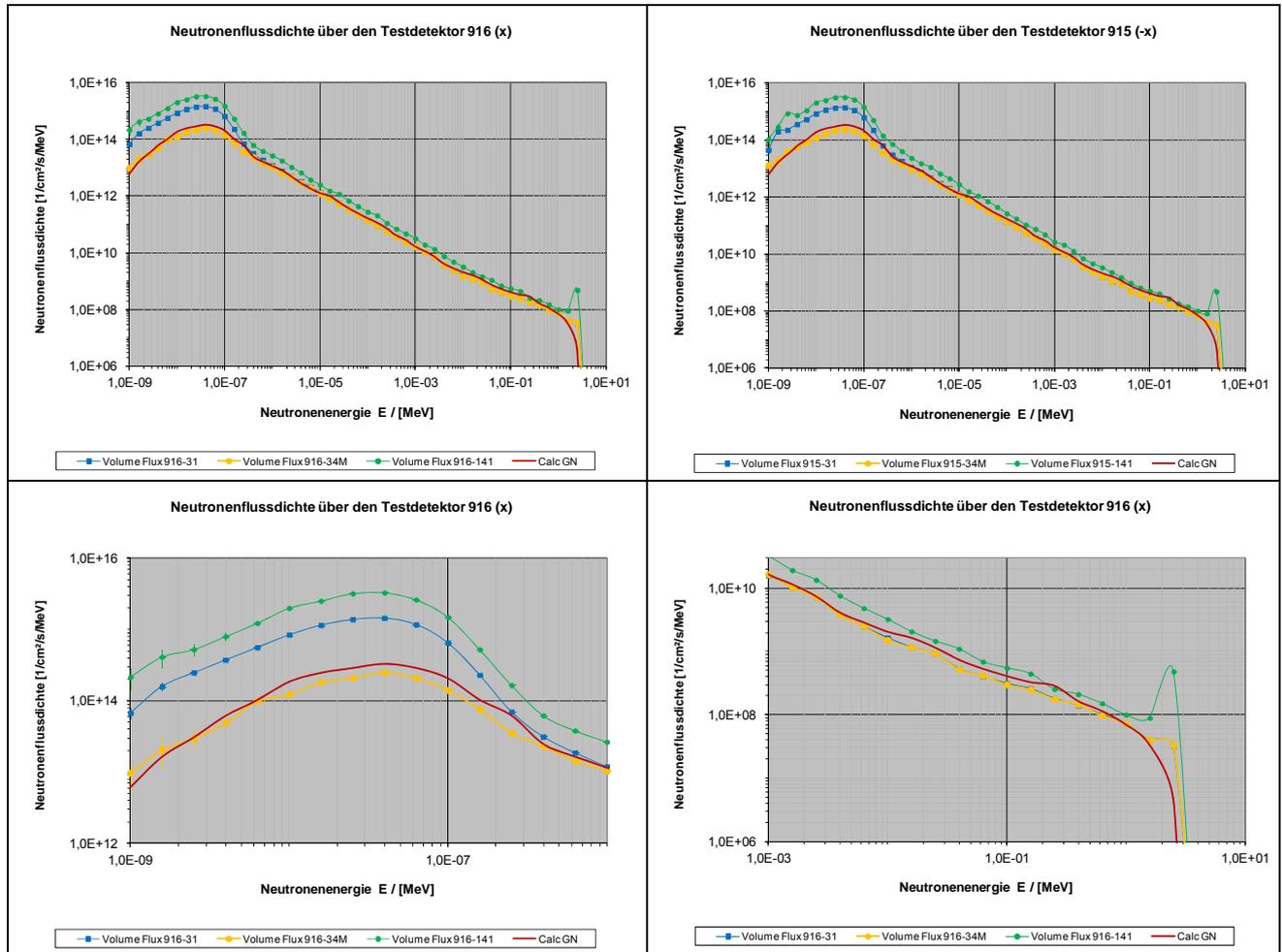


Abb. 3.3 Neutronenflussdichte in den Testdetektoren 915 und 916 auf der x-Achse der Modelle W7XB141 (DD-Neutronenquelle ohne Strukturmaterialien des Fusionsreaktors, Normalbeton LAC), W7XB31 (Fusionsreaktor-Modell komplett, Normalbeton mit Wassergehalt von 120 l/m³) und W7XB34M (Fusionsreaktor-Modell komplett, Normalbeton mit Wassergehalt 120 l/m³ und 1000 ppm Bor), Vergleichsspektrum aus den Berechnungen zum baulichen Strahlenschutz /U 28/ für Beton mit einem Borgehalt von 2200 ppm (oben), Neutronenflussdichte im Energiebereich der thermischen Neutronen (links unt.) und der schnellen Neutronen (rechts, unt.)

Ausgangspunkt für die vergleichenden Betrachtungen ist die Verteilung für das Modell W7XB141, bei dem ausschließlich die entsprechenden DD-Neutronenquelle in der Geometrie des Fusionsreaktors (ohne jegliche Strukturmaterialien) und die Torushallenwände (inklusive Decken) aus dem Standard Los Alamos Beton /L 11/ enthalten sind (grüne Kurven). Das Modell W7XB34M (gelbe Kurven), mit dem sowohl das Fusionsexperiment als auch die Torushallenwände möglichst real modelliert wurden, befindet sich hinsichtlich der berechneten spektralen Verteilung der Neutronenflussdichte in den Testdetektoren (915 und 916) in recht guter Übereinstimmung mit den Ergebnissen der Begutachtungsunterlagen /U 28/ (rote Kurven).

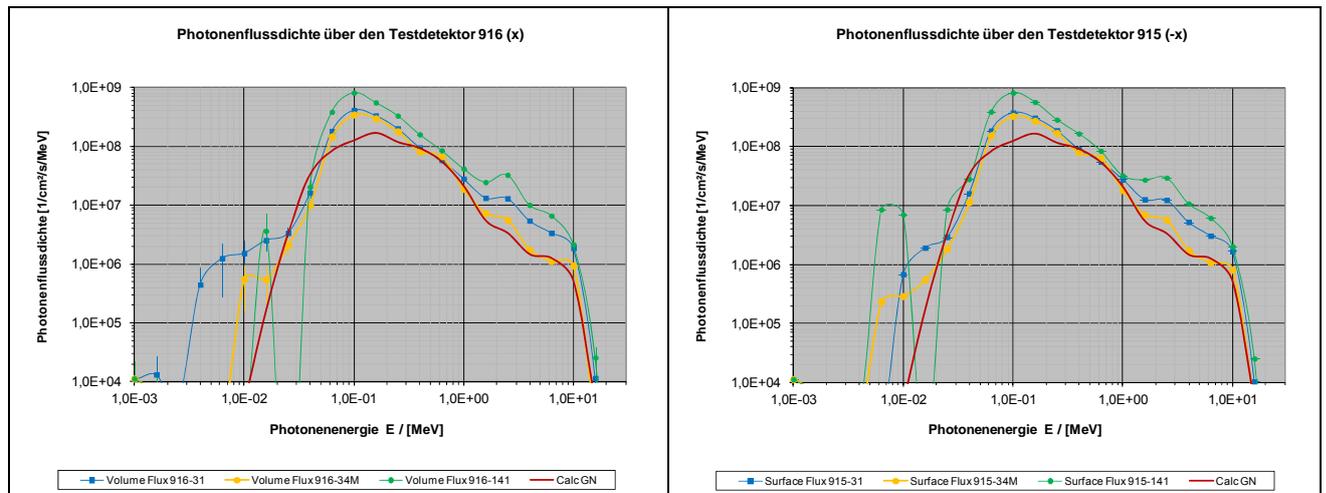


Abb. 3.4 Photonenflussdichte in den Testdetektoren 915 und 916 auf der x-Achse der Modelle W7XB141 (DD-Neutronenquelle ohne Strukturmaterialien des Fusionsreaktors, Normalbeton LAC), W7XB31 (Fusionsreaktor-Modell komplett, Normalbeton mit Wassergehalt von 120 l/m³) und W7XB34M (Fusionsreaktor-Modell komplett, Normalbeton mit Wassergehalt 120 l/m³ und 1000 ppm Bor), Vergleichsspektrum aus den Berechnungen zum baulichen Strahlenschutz /U 28/ für Beton mit einem Borgehalt von 2200 ppm

Gleiches gilt ebenso für die Photonenflussdichte, wobei diese jeweils um einige Größenordnungen unter der Neutronenflussdichte liegt. Damit können die zur Begutachtung und zur Verifikation der Abschirmberechnungen entwickelten Modelle als abdeckend für die Simulationen und die Bewertung der Torushallenwände betrachtet werden.

Mit den getroffenen Annahmen zur Neutronenquelle (Geometrie bzw. Energieverteilung) und der modellierten Geometrie des Fusionsexperiments sowie der Geometrie der Torushalle wurden erste MC-Simulationen zu den geplanten Betonzusammensetzungen (Rohdichte: 2,213 g/cm³ ; Wassergehalt: 120 l/m³ Beton; Borgehalt: 1000 ppm) mit dem Modell W7XB35M für die relevanten Strahlenschutzwände (Nord, Ost, Decke) der Torushalle durchgeführt. Zur Berechnung der Neutronen- bzw. der Photonendosisleistung wurden die entsprechenden Konversionsfaktoren (Funktionen nach ANSI/ANS1991 – ICRP74, siehe Tab. C01 und C02 in Anlage C) verwendet. Die ermittelten spektralen Verteilungen der Neutronen- bzw. der Photonendosisleistung für die beiden Simulationsrechnungen sind für die Nordwand und die Ostwand der Torushalle in verschiedenen Wandschichten (Oberfläche, 40 ... 160 cm tiefe) in Abb. 3.5 a-d dargestellt.

In den Darstellungen der Neutronendosisleistung wird deutlich, dass die Torushallenwände in der ausgeführten Dicke von 180 cm die Neutronenstrahlung sowohl im Bereich der thermischen Neutronen (< 1·10⁻⁷ MeV) als auch bei schnellen Neutronen (10⁻² ... 20 MeV) um mindestens 6 Größenordnungen schwächen. Die Photonendosisleistung wird

durch die Torushallenwände mit einer Dicke von 180 cm im für die Photonen wesentlichen Energiebereich ($10^{-1} \dots 10$ MeV) um mindestens 5 Größenordnungen geschwächt.

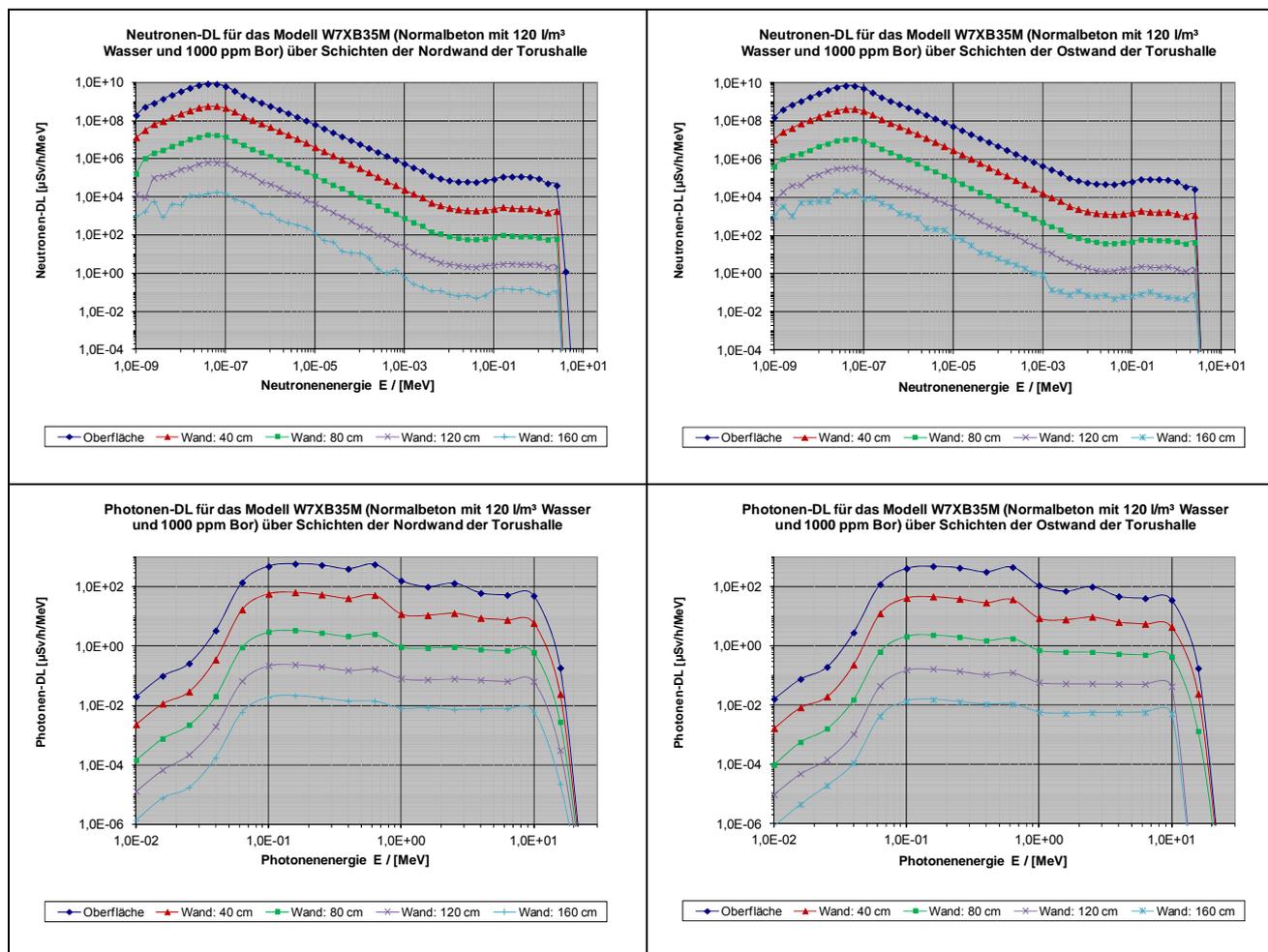


Abb. 3.5 Neutronen- bzw. Photonendosisleistung (oben/unt.) in verschiedenen Schichten der Nordwand/ Ostwand der Torushalle in den Testdetektoren der jeweiligen Wandschichten für das Modell W7XB35M (Normalbeton mit Wassergehalt von 120 l/m^3 und 1000 ppm Bor)

Neben der spektralen Verteilung der Neutronen- und Photonflussdichte und der entsprechenden Neutronen- und Photonendosisleistung wurden auch die Werte der totalen Neutronen- und Photonendosisleistung sowie der gesamten Dosisleistung der Strahlungskomponenten in den jeweiligen Testdetektoren berechnet. Die Berechnungsergebnisse der Simulationsrechnung zur Dosisleistung sind in den grafischen Darstellungen (Abb. 3.6 a-c) zur Ermittlung der relevanten Parameter (erforderliche Wanddicke bzw. Zehntelwertdicke) für die jeweilige Wandgeometrie (Nordwand, Ostwand, Decke) zum Modell W7XB35M aufgeführt. Diese relevanten Wandparameter sind in Tab. 3.2 zusammengestellt.

Hallenwände Größen	Nordwand	Ostwand	Decke *)	Bemerkungen
Neutronendosisleistung				
Dicke [cm] bei 1 mSv/a:	151,2	147,0	116,9	dominierender Anteil
Dicke [cm] bei 0,3 mSv/a:	165,2	161,1	130,3	dominierender Anteil
ZW-Dicke x_{ZW} [cm]:	27,4	27,4	26,0	
Photonendosisleistung				
Dicke [cm] bei 1 mSv/a:	130,4	125,4	89,2	
Dicke [cm] bei 0,3 mSv/a:	150,7	145,8	109,4	
ZW-Dicke x_{ZW} [cm]:	39,9	39,9	39,6	
Gesamte Dosisleistung				
Dicke [cm] bei 1 mSv/a:	155,2	150,8	119,6	resultierend aus n-DL
Dicke [cm] bei 0,3 mSv/a:	169,7	165,4	133,4	resultierend aus n-DL
ZW-Dicke x_{ZW} [cm]:	28,3	28,3	26,7	

*) Für Aufenthaltsfaktor 0,1 (maximal)

Tab. 3.2 Bestimmung der erforderlichen Wanddicken zu dem Berechnungsmodell W7XB35M mit den geplanten Beton-Parametern für die Torushallenwände /U 2/

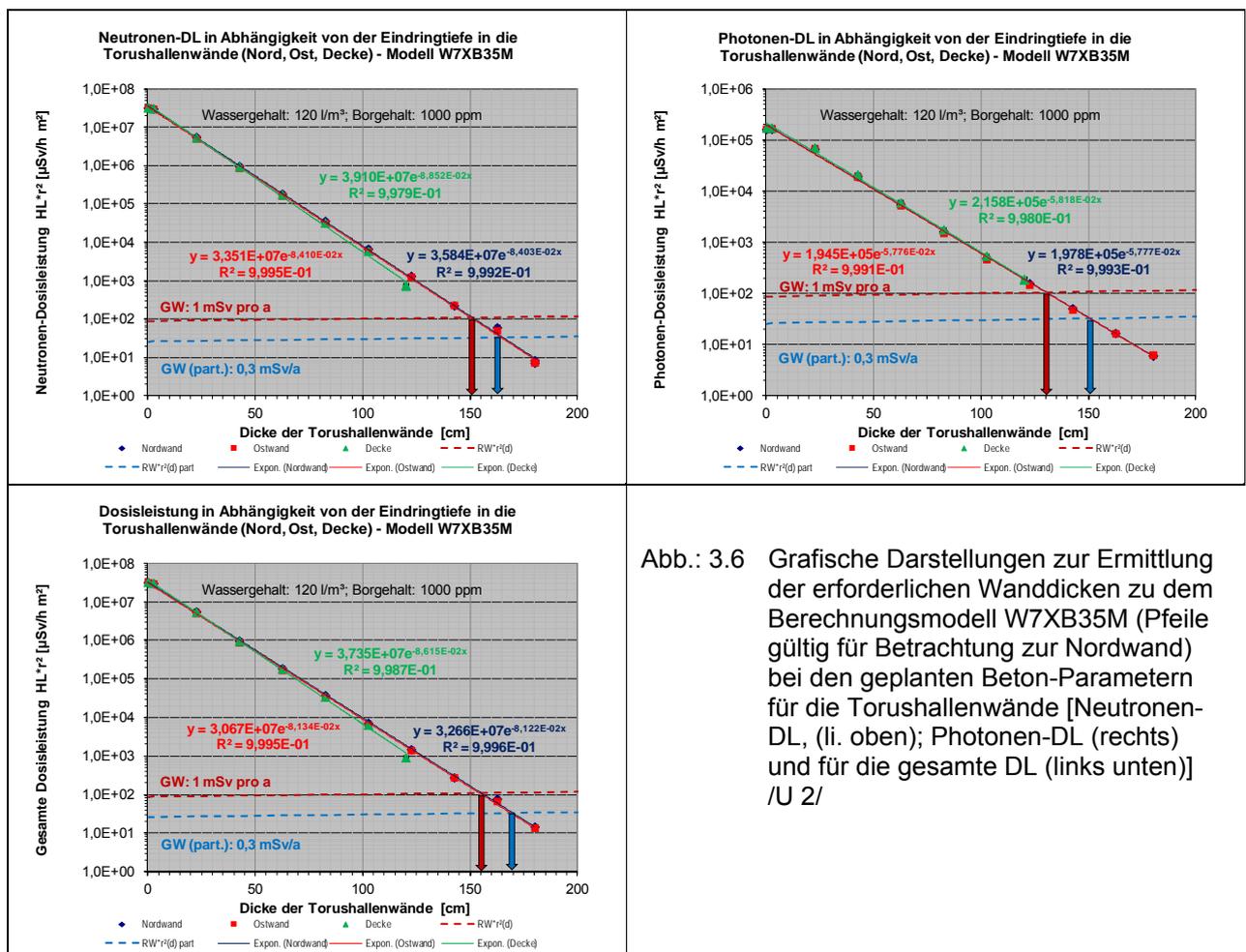


Abb.: 3.6 Grafische Darstellungen zur Ermittlung der erforderlichen Wanddicken zu dem Berechnungsmodell W7XB35M (Pfeile gültig für Betrachtung zur Nordwand) bei den geplanten Beton-Parametern für die Torushallenwände [Neutronen-DL, (li. oben); Photonen-DL (rechts) und für die gesamte DL (links unten)] /U 2/

Die gleichen Aussagen zur Abschirmwirkung der Torushallenwände ergeben sich bei der Betrachtung der räumlichen Verteilung der Neutronen-Dosisleistung in der Torushalle und den angrenzenden Bereichen sowie der Umwelt, die in sog. Mesh-Tally-Plots mittels MCNPX /L 11/ für Modell W7XB34M in Abb. 3.7 a-d gezeigt sind.

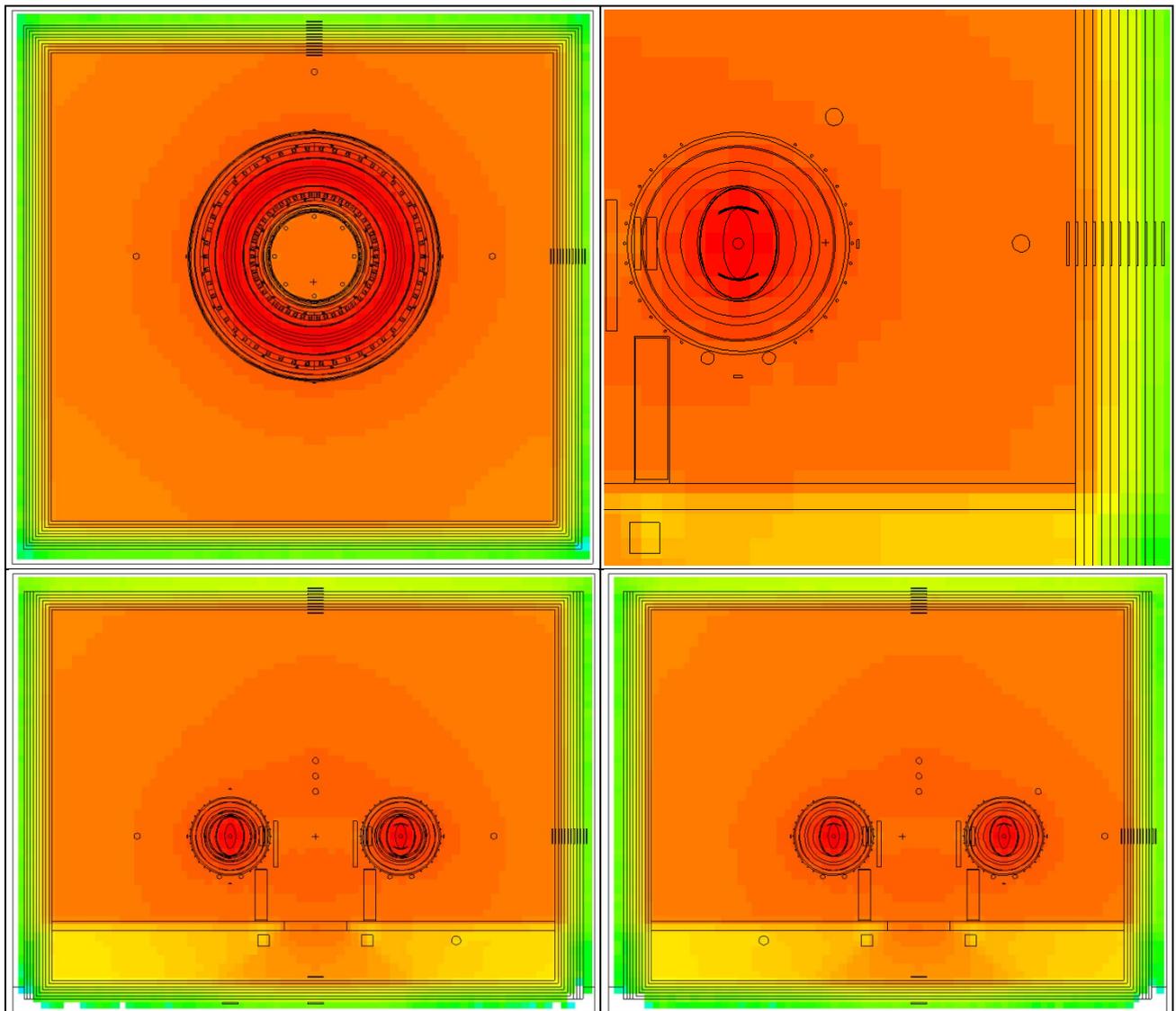


Abb. 3.7 Räumliche Verteilung der Neutronendosisleistung in verschiedenen Schnittebenen durch den Torus und die Torushallenwände: a) xy-Ebene mit Nord- und Ostwand sowie den Testdetektoren zu Berechnung des Abschirmvermögens (li. oben); b) xz-Ebene mit Ostwand und Hallendecke (li. unten); c) und d) yz-Ebene mit Nordwand und Hallendecke für das Modell W7XB261 (Normalbeton mit Wassergehalt von 120 l/m³)

Aus den Berechnungen (Tab. 3.2, Abb. 3.6) ergibt sich eindrucksvoll, dass bei den vorgesehenen Betonzusammensetzungen (Betondichte von 2,3 g/cm³, Wasseranteil von 120 l/m³ und Bormassenanteil von 1000 ppm) der Torushallenwände Wanddicken von 155 cm (Nordwand), 151 cm (Ostwand) und 120 cm Decke (bei Aufenthaltsfaktor von 0,1)

ausreichend wären, um den Grenzwert von 1 mSv pro Kalenderjahr für die Bevölkerung und die Umwelt nach § 46 StrlSchV /R 1/ sicher zu unterschreiten. Die grundsätzlichen Fragen, wie sicher diese Parameter der Betonzusammensetzung erreicht wurden und welche statistischen Schwankungen im Borbeton vorliegen, werden im folgenden ausgeführt, ebenso der Einfluss dieser Parameter auf die Abschirmwirkung der relevanten Strahlungskomponenten.

3.3 Realisierte Abschirmung (Wände, Decken, Tore)

3.3.1 Datenlage

3.3.1.1 Torushallenwände und -decken

Als Beton für die Torushallenwände, die Bodenplatte und die Betondecken wurde ein spezieller Strahlenschutzbeton aus Normalbeton mit Colemanit-Zusatz eingesetzt. Aus den ersten Berechnungen /U 4 – U 14/ zum baulichen Strahlenschutz und den Untersuchungen zu den Betonmixturen wurde ein Beton für die strahlenschutzrelevanten Wände des Torushallengebäudes gewählt, der eine optimale Abschirmung von Neutronen- und Gammastrahlung erreichen soll (siehe Tab. 3.1).

Wesentlich für die Neutronenbremsung bzw. -absorption im Beton ist der Gehalt an physikalisch und chemisch gebundenem Wasser und der Borgehalt, der aus dem Colemanit-Zuschlagstoff resultiert. Bei den vorliegenden Betrachtungen wurden als Richtwerte für den erforderlichen Wassergehalt ein Wert von 120 l/m³ und den Borgehalt von 1000 ppm angegeben. Diese Richtwerte werden so auch im Sicherheitsbericht /U 2/ aufgeführt.

In der Zusammenfassung zu den Strahlenschutzwänden /U 45/ führt der zukünftige Betreiber der Anlage aus, dass zur Ermittlung der geeigneten Dicke und Zusammensetzung der Torushallenwände verschiedene Berechnungen /U 4 - U 7/ notwendig waren.

Als Ergebnis dieser Berechnungen wurden unter Annahme der oben genannten Richtwerte für die erforderliche Abschirmwirkung Dicken von 1,80 m bei den Torushallenwänden ermittelt. Zur Zusammensetzung des Betons für die Torushallenwände wird in den Antragsunterlagen /U 4/ festgestellt, dass Schwer- oder Borbeton dem Normalbeton vorzuziehen ist.

Betonrezeptur / Bauphysikalische Eignung

In den Berichten /U 11, U 12/ der TU Berlin wurde festgestellt, dass Colemanit aufgrund bauchemischer und bauphysikalischer Eigenschaften (Erstarrungsverhalten, Druckfestigkeit u.a.), als borhaltiger Zusatz zur Verbesserung der Strahlenschutzigenschaften von Beton verwendet werden kann.

In dem Bericht der Ph. Holzmann AG /U 13/ werden die Eignungsprüfungen, des für den Bau der Strahlenschutzwände der Torushalle vorgesehenen Strahlenschutzbetons mit Colemanit, hinsichtlich der bauphysikalischen und bauchemischen Parameter dargestellt. Danach wird der in den Berichten /U 11, U 12/ festgelegte Colemanitgehalt von 17,5 kg/m³ /U 13/ bestätigt. In diesem Bericht wurde festgestellt, dass von den fünf nach /U 11, U 12/ untersuchten Betonen, die Betonrezepturen 4 und 5 /U 11/ für den Baukörper der Torushalle geeignet sind und alle gestellten bauphysikalischen Anforderungen erfüllen.

Nach dem Bericht der Ph. Holzmann AG /U 13/ und nach Kenntnis, dass das vorgesehene Colemanit-Steinmehl nur ca. 83 - 86% Colemanit enthält, wurde unter Berücksichtigung der gutachterlichen Stellungnahme vom 23.10.1997 /U 14/ der Anteil von Colemanit auf mindestens 18,5 kg/m³ in der Betonmischung als Vorhaltemaß erhöht. Entsprechend diesen Angaben wurden die Torushallenwände und -decken geplant und ausgeführt, wobei Untersuchungen der Rückstellproben (Probewürfel aus Borbeton) gemäß Angaben auf den Lieferscheinen zeigten, dass der tatsächliche Colemanit-Anteil in den Proben 19,4 kg pro 1 m³ Normalbeton betragen hat /U 15/.

Auswertung der Messergebnisse zu den Probewürfeln

Zur Qualitätssicherung des Betons wurden beim Betonieren aus jedem Betonierabschnitt Proben in Form von Würfeln mit einer Kantenlänge von 15 cm als Rückstellproben genommen /U 15/. Diese Probewürfel wurden hinsichtlich des Borgehaltes ausgewertet. Die vier Proben aus der Sohle (Proben 1, 3, 4, 5) wurden zusätzlich bezüglich des Wassergehaltes ausgewertet. In Tab. 3.3a sind die Messwerte des Borgehaltes für die Probewürfel der Bodenplatte, der Torushallenwände und der Zwischendecken zusammengestellt. In Tab. 3.3b ist die Auswertung des Borgehaltes für die Probewürfel der Torushallendecke aufgeführt.

Lfd. Nr.	Probe 1997	Borgehalt in ppm			Ort der Messung
		oben	unten	Mittelwert	
1	1	1100	1000	1050	Bodenplatte Torushalle
2	3	1100	1000	1050	Bodenplatte Torushalle
3	4	1100	1100	1100	Bodenplatte Torushalle
4	5	1200	1100	1150	Bodenplatte Torushalle
5	K	1200	1100	1150	Wand Torushalle 2. UG (Achse 9 ⁰ / B ⁴ Höhe 60 cm)
6	L	1200	1000	1100	Wand Torushalle 2. UG (Achse M ⁰ / B ⁴ Höhe 1,20 m)
7	M	1100	1100	1100	Wand Torushalle 2. UG (Achse 3 ⁰ / B ¹ Höhe 3 m)
8	N	1100	980	1040	Wand Torushalle 2. UG (Achse 3 ⁰ / A ¹¹ Höhe 1,80 m)
9	N1	1100	936	1018	Wand vom Kryokanal 2. UG (Achse 5 ⁰ / A ⁷ Höhe 1,20 m)
10	O	1060	952	1006	Wand vom Kryokanal 2. UG (Achse 6 ⁰ / A ¹¹ Höhe 1,20 m)
11	P	1070	958	1014	Wand vom Kryokanal 2. UG (Achse 5 ⁰ / A ¹⁰ Höhe 3 m)
12	R	1130	975	1052,5	Wand vom Kryokanal 2. UG (Achse 6 ⁰ / A ¹⁰ Höhe 2,70 m)
13	T	1080	1010	1045	Decke 2. UG Torushalle (Achse B ⁴ / 9 ⁰ Höhe 30 cm)
14	U	1220	1020	1120	Decke 2. UG Torushalle (Achse A ¹⁷ / 6 ⁰ Höhe 30 cm)
15	V	1180	884	1032	Decke 2. UG Torushalle (Achse B ³ / 5 ⁰ Höhe 60 cm)
16	W	1180	924	1052	Decke 2. UG Torushalle (Achse A ¹⁵ / 6 ⁰ Höhe 60 cm)
17	Y	1140	973	1056,5	Decke 2. UG Kryokanal (Achse M ⁰ / A ⁸ Höhe 30 cm)
18	Z	1070	873	971,5	Decke 2. UG Kryokanal (Achse 5 ⁰ / A ⁷ Höhe 60 cm)
19	VIII	1100	980	1040	Wand Torushalle 1. UG - 3. OG (Achse 10 ⁰ / A ¹⁶ Höhe = 2,50 m)
20	XXVI	1200	1000	1100	Wand Torushalle 1. UG - 3. OG (Achse 2 ⁰ / A ¹² Höhe = 4,30 m)
21	XLII	1000	1000	1000	Wand Torushalle 1. UG - 3. OG (Achse 10 ⁰ / B ³ Höhe = 9,60 m)
22	8/Col	1000	980	990	Wand Torushalle 1. UG - 3. OG (Achse 10 ⁰ / A ¹³ Höhe = 15,90 m)
23	LII	1000	1000	1000	Wand Torushalle 1. UG - 3. OG (Achse 2 ⁰ / B ¹ Höhe = 12,50 m)
24	LVII	1100	980	1040	Wand Torushalle 1. UG - 3. OG (Achse 10 ⁰ / B ⁴ Höhe = 14,10 m)
25	LXIII	1100	910	1005	Wand Labyrinth Südwand 1. UG (Achse 8 ⁴)
26	LXIV	1100	960	1030	Wand Labyrinth Südwand 1. UG (Achse 8 ⁴)
27	LXIX	1000	920	960	Wand im Labyrinth Südwand 1. UG (Achse 8 ⁴)
28	LXX	1100	900	1000	Wand im Labyrinth Südwand 1. UG (Achse 8 ⁴)
29	LXXI	1000	930	965	Decke 2. UG ECRH-Kanal (Achse M ^A)
30	LXXII	1100	960	1030	Decke 2. UG ECRH-Kanal (Achse M ^A)
31	LXXIII	1080	1020	1050	Schachtwände ICRH-Kanal 1. UG (Achse 11 ⁰ - 1 ³ / A ¹³ - A ⁻¹ Höhe = 1 m)
32	LXXIV	1160	1010	1085	Schachtwände ICRH-Kanal 1. UG (Achse 11 ⁰ - 1 ³ / A ¹³ - A ⁻¹ Höhe = 1,80 m)
33	COL 3	1100	940	1020	Unterzug Labyrinth Nordwand (Achse 1 ⁴)
34	COL 10	1200	1000	1100	Lüftungslabyrinth 3. OG (Achse B ⁵)
35	COL 13	1100	870	985	Decke Erdgeschoss Labyrinth Nordwand
36	COL 16	960	900	930	Wand Torushalle - Lüftungszentrale (Achse B ⁵ - B ⁵ / M ⁰ Höhe = 1,40 m)

Tab.: 3.3a Darstellung der Mess- bzw. Untersuchungsergebnisse zum Borgehalt

Lfd. Nr.	Probe 1997	Borgehalt in ppm			Ort der Messung
		oben	unten	Mittelwert	
1	LXV	1100	1000	1050	Decke Torushalle (Achse 8 ⁰ / B ³ Höhe = 20 cm)
2	LXIV	1100	1000	1050	Decke Torushalle (Achse 5 ⁰ / A ¹⁴ Höhe = 40 cm)
3	LXVII	1000	960	980	Decke Torushalle (Achse 5 ⁰ / B ³ Höhe = 1,10 m)
4	LXVIII	850	780	815	Decke Torushalle (Achse 4 ⁰ / B ³ Höhe = 70 cm)
5	192	1000	1000	1000	Decke Torushalle (Achse 9 ⁰ / B ³ Höhe = 10 cm)
6	194	1100	1000	1050	Decke Torushalle (Achse 5 ⁰ / A ¹⁵ Höhe = 30 cm)
7	196	950	845	897,5	Decke Torushalle (Achse 8 ⁰ / A ¹⁷ Höhe = 1,10 m)
8	202	1220	835	1027,5	Decke Torushalle (Achse 4 ⁰ / B ³ Höhe = 70 cm)

Tab.: 3.3b Darstellung der Mess- bzw. Untersuchungsergebnisse zum Borgehalt (Hallendecke)

In Tabelle 3.4 sind die Messergebnisse zum chemischen und physikalischen Wassergehalt sowie zur Rohdichte im Festbeton für die vier Proben aus der Sohle (Proben 1, 3, 4, 5) entsprechend des Berichtes zur Qualitätssicherung /U 15/ dargestellt.

Material- probe	Rohdichte im Festbeton [g/cm ³]	physikalisch ge- bundenes Wasser [l/m ³]	chemisch gebun- denes Wasser [l/m ³]	Gesamter Wasseranteil [l/m ³]
1	2,200	60	110	170
3	2,270	105	114	219
4	2,300	98	114	212
5	2,300	101	113	224

Tab.3.4 Darstellung der Messergebnisse zum chemischen und physikalischen Wassergehalt und der Rohdichte für die Proben der Bodenplatte

Gemäß Sicherheitsbericht /U 2/ wurde für die geplante Rezeptur und damit für die erforderliche Abschirmwirkung ein Richtwert für den Borgehalt von 1000 ppm vorgegeben. Die Auswertung der Probewürfel hinsichtlich des Borgehaltes zeigt, dass bei fast allen Proben der Wert von 1000 ppm im Mittel eingehalten oder übertroffen wird. In der gutachterlichen Stellungnahme /U 15/ wurden schwankende oder zu niedrige Borgehalte mit den Besonderheiten bei der Probekörperherstellung erklärt.

Entsprechend dem Sicherheitsbericht /U 2/ ist für die erforderliche Abschirmwirkung der Betonwände ein Richtwert für den Wassergehalt von 120 l/m³ angegeben. Werden die Werte für das physikalisch gebundene Wasser zu den Werten des chemisch gebundenen Wassers addiert, dann ergeben sich bei allen vier Proben Gesamtwassergehalte von meist weit mehr als 170 l/m³. Die Gesamtwassergehalte übertreffen damit den als Richtwert für den Wassergehalt angegebenen Wert von 120 l/m³ deutlich.

Eine Aussage zum Wassergehalt des Betons für die Torushallenwände konnte in diesem Zusammenhang nicht getroffen werden, da lediglich für die Probewürfel zur Bodenplatte der Gehalt an physikalisch bzw. chemisch gebundenem Wasser bestimmt wurde und die Ergebnisse in der Stellungnahme /U 15/ dokumentiert sind.

Die vier Proben weisen eine Rohdichte von 2,200 bis 2,300 g/cm³ auf. Diese Werte entsprechen der Rohdichte von Normalschutzbeton mit der erforderlichen Abschirmwirkung. Spezielle Anforderungen an die Rohdichte werden gemäß den Begutachtungsunterlagen /U 1, U 2/ nicht genannt. Eine Aussage zur Rohdichte des Betons für die Torushallenwände konnte in diesem Zusammenhang nicht getroffen werden, da lediglich für die Probewürfel zur Bodenplatte die Rohbetondichte ermittelt wurde und die Ergebnisse in der Stellungnahme /U 15/ dokumentiert sind.

Auswertung der Messergebnisse zu den Kernbohrungen

Zur Bestimmung der Trockenrohichte sowie des Bor- und Wassergehaltes wurden an den Torushallenwänden in den Bereichen Thomsondiagnostik, Rudix oben, Rudix unten sowie Zentrale Gasversorgung insgesamt 4 Kernbohrungen durchgeführt. Die Kernbohrungen wurden im Institut für Bauphysik und Biochemie laborseitig untersucht. Die Ergebnisse sind in einem entsprechenden Gutachten /U 20/ zusammengefasst.

In Tab. 3.5 sind die Messergebnisse der 4 Kernbohrungen, die in entsprechende Teilproben überführt wurden, für die Parameter Rohdichte und Borgehalt dargestellt.

Materialprobe	Rohdichte [g/cm ³]	Borgehalt [ppm]	Bemerkungen
Thomsondiagnostik (A 2)	2,260	950	Bohrkern 1
Thomsondiagnostik (A 5)	2,240	900	Bohrkern 1
Thomsondiagnostik (A 6)	2,270	970	Bohrkern 1
Rudix oben (A 2)	2,290	1.100	Bohrkern 2
Rudix oben (A 4)	2,270	1.100	Bohrkern 2
Rudix oben (A 5)	2,250	990	Bohrkern 2
Rudix unten (E 2)	2,240	1.000	Bohrkern 3
Rudix unten (E 4)	2,260	990	Bohrkern 3
Rudix unten (E 5)	2,250	1.000	Bohrkern 3
Zentrale Gasversorgung (Z 1)	2,310	940	Bohrkern 4
Zentrale Gasversorgung (Z 2)	2,330	1.000	Bohrkern 4

Tab.3.5 Darstellung der Untersuchungsergebnisse

Gemäß den Unterlagen /U 1, U 2/ ist für die geplante Rezeptur und damit für die erforderliche Abschirmwirkung ein Richtwert für den Borgehalt von 1000 ppm vorgegeben. Die untersuchten Materialproben weisen Borgehalte im Bereich von 900 bis 1.100 ppm auf. Das Institut für Bauphysik und Biochemie hat im Gutachten /U 20/ vom 18.12.2012 die Messergebnisse zu den Proben bewertet. Für die Materialprobe „Rudix oben“ ergibt sich damit ein Mittelwert von 1.063 ppm, damit ist der Richtwert für den erforderlichen Borgehalt von 1000 ppm eingehalten. Der Wandbereich „Rudix unten“, für den sich aus der Materialprobe ein Mittelwert von 997 ppm ergibt, wird als anforderungsgerecht bewertet. Für die Proben der „Thomsondiagnostik“ wird beschrieben, dass alle Einzelwerte unter 1.000 ppm liegen und sich ein Mittelwert von 940 ppm ergibt. Für die Proben der „Zentralen Gasversorgung“ wurde ein Mittelwert von 970 ppm errechnet. Damit ist der Richtwert für den erforderlichen Borgehalt von 1000 ppm für die Materialproben „Thomsondiagnostik“ und „Zentrale Gasversorgung“ um 6% bzw. 3% unterschritten.

In Tab. 3.6 sind die Untersuchungsergebnisse der 4 Kernbohrungen für den Parameter: chemisch gebundener Wassergehalt dargestellt.

Materialprobe	Chemisch gebundener Wassergehalt [l/m ³]
Thomsondiagnostik	61
Rudix oben	41
Rudix unten	36
Zentrale Gasversorgung	56

Tab.3.6 Darstellung der Untersuchungsergebnisse

Gemäß /U 1, U 2/ ist bei den vorliegenden Betrachtungen als Richtwert für den erforderlichen Wassergehalt ein Wert von 120 l/m³ angegeben. Bei den vier Materialproben wurde lediglich der chemisch gebundene Wassergehalt bestimmt. Es ist damit keine sichere Beurteilung möglich, ob der Richtwert für den erforderlichen Wassergehalt von 120 l/m³ eingehalten wird. Im Gutachten /U 20/ wird erklärt, dass die Anforderungen mit hoher Wahrscheinlichkeit eingehalten werden, wenn die Halle keine außergewöhnlich geringe Raumlufffeuchte aufweist.

Bewertungsmaßstäbe

Die Bewertung der Datenlage zu den messtechnisch ermittelten Betonparametern (Dichte, Wasservolumenanteil und Bormassenanteil), die für die Abschirmwirkung der Torushallenwände von Bedeutung sind, erfolgt vorrangig über die Anzahl der vorhande-

nen Proben und deren zweckdienliche Auswertung sowie über die repräsentative Lage der Stellen für die Probenahme. Um die Zusammensetzung der ausgeführten Betonmischung unmittelbar nach Errichtung bzw. nach einer Standzeit von mehr als 15 Jahren aus der Sicht des Strahlenschutzes zu bewerten, wurden zur Auswertung der zahlreichen Rückstellproben und Bohrkerne /U 15/ bzw. der zusätzlichen Bohrkerne /U 20/ hinsichtlich der geforderten Betonparameter die einschlägigen Normen zur Klassifikation von Abschirmbetonen, wie die DIN 25413 Teil 1 und Teil 2 /R 10/, sowie die allgemeinen Strahlenschutzgrundsätze §§ 4-6 StrlSchV /R 1/ herangezogen.

Wertung

Zur Bewertung des ausgeführten Normalbetons mit Colemanit-Zusatz, mit dem die Wände und die Decken der Torushalle gefertigt wurden, wurden sowohl im Rahmen der Qualitätssicherung beim Rohbau als auch in den folgenden Jahren in großer Anzahl Proben aus Borbeton der Torushalle genommen und ausgewertet. Das betrifft:

1. Rückstellproben aus dem Normalbeton mit Colemanit-Zusatz, als Qualitätssicherung für die Betonzusammensetzung. Für diese Rückstellproben wurde zu 48 Probewürfeln mittels chemischer Verfahren (nicht zerstörungsfrei) deren Borgehalt ermittelt, wobei für jeden Würfel deren oberer und unterer Teil analysiert wurde (Tab.3.3a und b). Nur zu vier Probewürfeln aus der Betonplatte wurde der Wassergehalt (physikalisch bzw. chemisch gebundenen Anteil) ermittelt (Tab. 3.4) /U 15/. Die nicht zu Analysezwecken zerstörten Rückstellprobewürfel werden trocken und sicher verwahrt im IPP gelagert, wovon sich der Gutachter bei einer Begehung überzeugen konnte /L 4/.
2. Durchführung von vier Kernbohrungen zur Bestimmung der Trockenrohddichte und des Bor- bzw. Wassergehaltes an den Torushallenwänden in den Bereichen Thomsondiagnostik, Rudix oben, Rudix unten sowie Zentrale Gasversorgung. Dabei wurden die jeweiligen Bohrkerne für die Thomsondiagnostik (A1-A6) und Rudnix oben (A1-A6) bzw. Rudnix unten (E1-E6) in sechs Teilproben geteilt, die im Gutachten /U 20/ genau beschrieben sind. Wohingegen zur Bohrkernprobe „Zentrale Gasversorgung“ keine Teilung beschrieben wird, obwohl auch hier zwei Teilproben ausgewertet wurden. Während für die 11 analysierten Teilproben zur Rohddichte und zum Borgehalt brauchbare Messwerte (Tab. 3.5) vorliegen, wurde für alle vier Bohrkerne ausschließlich der chemisch gebundene Wassergehalt ermittelt. In dem Gutachten wird nicht beschrieben, welche Teilproben der Kernbohrungen analysiert wurden. Des Weiteren wurde nicht erklärt, warum der Anteil physikalisch gebundenes Wasser

nicht ermittelt werden konnte. Aus dieser Datenlage ist kann nicht sicher festgestellt werden, ob für diese 4 Messpunkte der Richtwert für den erforderlichen Wassergehalt von 120 l/m³ eingehalten wird. Weil die Torushalle mit Sicherheit keine außergewöhnlich geringe Raumlufffeuchte aufweist, stimmen wir der Feststellung im Gutachten /U 20/ zu, dass die Anforderungen hinsichtlich des erforderlichen Wassergehaltes eingehalten werden.

Hinsichtlich der gesamten Datenlage zur Beprobung der Torushallenwände sowie der messtechnischen Auswertung und Interpretation der Messergebnisse für die Strahlenschutz relevanten Betonparameter ist festzustellen, dass zwar eine ausreichende Anzahl von Proben an den Torushallenwänden und -decken genommen wurde, jedoch für keine Probe alle relevanten Messgrößen (Betondichte, Wassergehalt und Borgehalt) simultan ermittelt wurden.

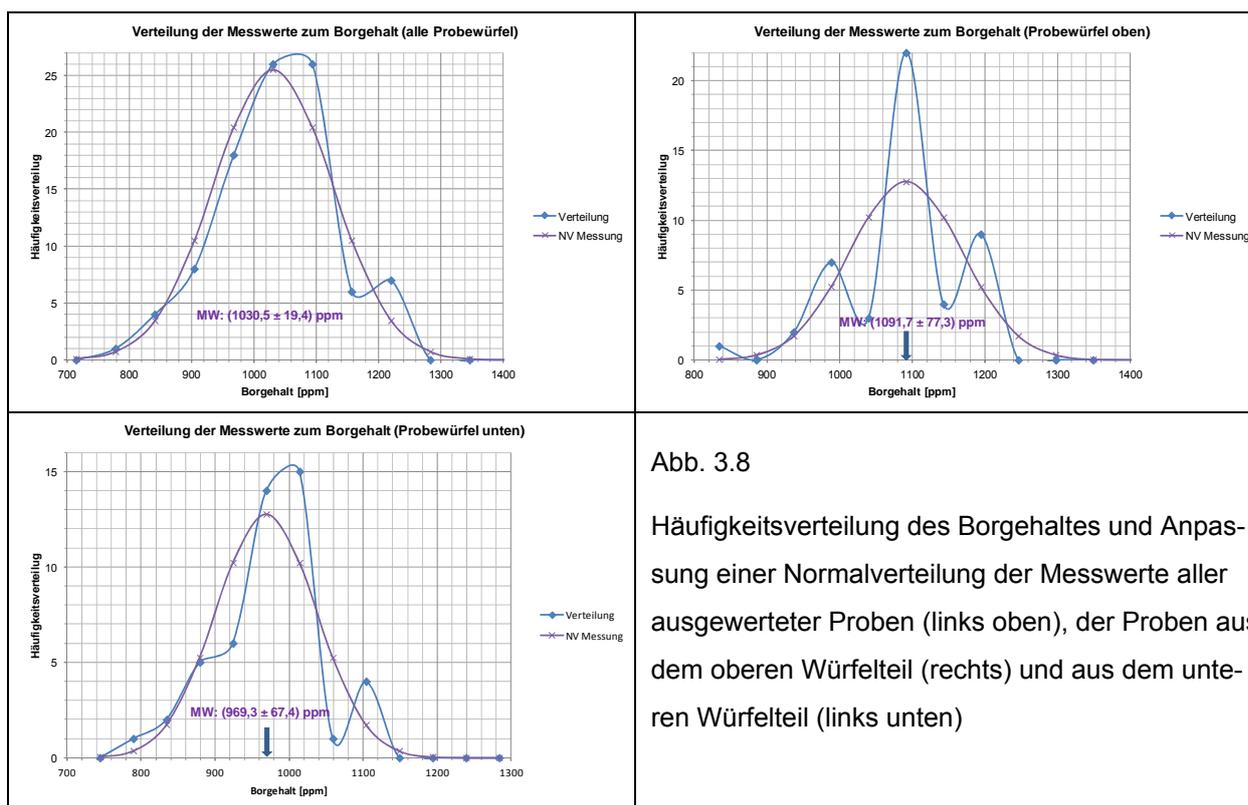


Abb. 3.8
Häufigkeitsverteilung des Borgehaltes und Anpassung einer Normalverteilung der Messwerte aller ausgewerteter Proben (links oben), der Proben aus dem oberen Würfelteil (rechts) und aus dem unteren Würfelteil (links unten)

Des Weiteren ist zu bemerken, dass in den vorliegenden Berichten bzw. Gutachten /U 14, U 15, U 20/ zu den Messungen bzw. der Analyse der Messdaten weder Aussagen zum jeweiligen Messverfahren noch zu den Fehlern der Messmethoden gemacht wurden. Die Dokumentation sowohl zu den Mess- und Auswerteverfahren und deren Qualitätssicherung als auch zu den systematischen und statistischen Messfehlern aller relevanten

Messgrößen von den jeweiligen Baustofflaboren (Labor für Berliner Wasser Betriebe /U 15/; IBB für /U 20, U 46/) lagen nicht zur Begutachtung vor.

Nach einfacher statistischer Auswertung der Messergebnisse zum Borgehalt in den Torushallenwänden zeigen sich die Ergebnisse aus den Probewürfeln /U 15/ als Häufigkeitsverteilungen, die in Abb. 3.8 zusammengestellt sind.

Daraus ergibt sich als Mittelwert und statistischer Fehler (mit 95% Vertrauensbereich) für den Bormassenanteil der 48 ausgewerteten Probewürfel (1030 ± 20) ppm. Für den oberen bzw. unteren Würfelteil erhält man einen Mittelwert der Bormassenanteile von (1092 ± 73) ppm bzw. (969 ± 67) ppm. Diese Ergebnisse deuten auf ein „Aufschwimmen“ des Colemanit-Zuschlagstoffes während und unmittelbar nach der Herstellung der Probewürfel hin.

Mit der Auswertung zu den Probewürfeln /U 15/ lagen zur Rohbetondichte und zum Wassergehalt ausschließlich 4 Proben für die Bodenplatte vor, was als nicht repräsentativ zur Bewertung der Torushallenwände angesehen werden kann. Als Mittelwert für die Rohbetondichte in der Betonplatte wurden ($2,27 \pm 0,05$) g/cm³ ermittelt, für den Wassergehalt ergab sich ein Mittelwert und ein statistischer Fehler von (206 ± 25) l/m³.

Bei der statistischen Auswertung der Messergebnisse zum Borgehalt /U 20/ in den Torushallenwänden, aus den in den Wandbereichen Thomsondiagnostik, Rudix oben, Rudix unten sowie Zentrale Gasversorgung entnommenen vier Bohrkerne, erhält man die Ergebnisse als Häufigkeitsverteilungen, die in Abb. 3.9 neben den Häufigkeitsverteilungen für die Betondichte der entsprechenden Proben zusammengestellt sind.

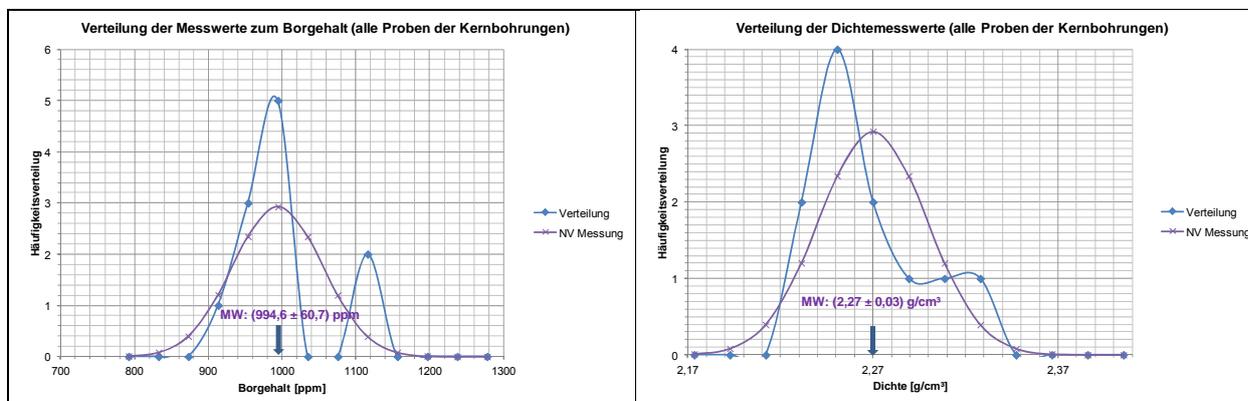


Abb. 3.9 Häufigkeitsverteilung des Borgehaltes (links) und der Dichte (rechts) sowie Anpassung jeweils einer Normalverteilung der Messwerte zu allen ausgewerteten Proben der Kernbohrungen /U 20/

Daraus ergibt sich als Mittelwert und statistischer Fehler (95% Vertrauensbereich) für den Bormassenanteil aller ausgewerteten Bohrkerne /U 20/ (995 ± 61) ppm. Für Mittelwert und statistischen Fehler (95% Vertrauensbereich) der Betondichte erhält man ($2,27 \pm 0,03$) g/cm³, wobei die Bestimmung des Mittelwertes über eine Normalverteilung den wahren Wert offensichtlich geringfügig überschätzt.

Im Ergebnis der einfachen statistischen Auswertung der Messergebnisse zu Betondichte, Wassergehalt und Borgehalt des Normalbetons /U 15, U 20/ zeigte sich, dass bei der Auswertung der Proben hinsichtlich Borgehalt und auch Betondichte die Datenlage ausreichend und repräsentativ ist. Insbesondere hinsichtlich des Borgehaltes von (1030 ± 20) ppm in allen ausgewerteten Rückstellproben und bei der Betondichte von ($2,27 \pm 0,03$) g/cm³ bei den Bohrkernen/Rückstellproben ergeben sich die erwarteten Ergebnisse aus den Messungen. Mit den Messungen zum Borgehalt konnte nicht restlos geklärt werden, welchen Einfluss Bereiche mit geringerem Borgehalt (Teilproben der Bohrkerne) auf die gesamte Abschirmwirkung der jeweiligen Torushallenwand haben. Deshalb wurden im Rahmen dieses Gutachtens umfangreiche Berechnungen zum Abschirmverhalten der Normalbetonwände bei Variation des Bor- und Wassergehalts durchgeführt (s. Kapitel 3.3.3).

Bezüglich der Wassergehalte der Torushallenwände liegen vier Messproben zu der Bodenplatte vor, was zum einen nicht ausreichend für die gesamte Torushalle ist und zum anderen zu den für den Strahlenschutz sehr bedeutsamen Torushallenwänden keine Aussagen liefert. Aufgrund dieser Tatsachen haben wir empfohlen, die Torushallenwände an sechs repräsentativen Stellen erneut mittels Kernbohrungen zu beproben und alle für den Strahlenschutz relevanten Messgrößen dort zu bestimmen. Das trifft insbesondere für den Wassergehalt der Torushallenwände zu, gilt aber ebenso für den Borgehalt und die Betondichte. Die Ergebnisse dieser ergänzenden Beprobung werden im Kapitel 3.3.2 zusammengestellt und bewertet.

3.3.1.2 Strahlenschutz Tore

In der Zusammenfassung zu den Strahlenschutz Toren /U 44/ führt der Antragsteller aus, dass bei den Strahlenschutz Toren (Montagetor, Personaltor) im oberen Teil Normalbeton mit einer Dicke von 2 m zur Anwendung kommt. Der untere Bereich der Tore, in dem ihr Fahrwerk untergebracht ist, wurde jeweils aus Barytbeton mit Borcarbid-Zusatz von 1 m

Dicke gefertigt. Nach /U 44/ wurde zusätzlich an beiden Toren torusseitig eine Polyäthylenplatte mit einer Dicke von 0,35 m vor dem Fahrwerkskasten angebracht.

In den Berichten /U 17, U 18, U 19/ wurden Berechnungen zur Abschirmwirkung des Personaltores bzw. des Montagetores durchgeführt, um die Dosisleistung hinter den Toren zu ermitteln. Diese Berichte zeigen, dass die Einhaltung des Grenzwertes von 1 mSv pro Kalenderjahr für die Bevölkerung nach § 46 StrlSchV /R 1/ gewährleistet ist. In dem Bericht B4-1287 /U 16/ weist die Ph. Holzmann AG die Eignung des eingesetzten Schwerbetons mit Borcarbid-Zusatz für den Bau der Strahlenschutz Tore nach.

In weiteren, wesentlich substantielleren MCNP-Berechnungen, welche im Bericht /U 21/ zusammengefasst wurden, wurde die Dosisleistung im Bereich der Strahlenschutz Tore genauer ermittelt. Im Ergebnis zeigt sich, dass außerhalb der Torushalle die Einhaltung des Grenzwertes von 1 mSv pro Kalenderjahr für die Bevölkerung nach § 46 StrlSchV /R 1/ gewährleistet ist und die bereits oben erwähnten Berichte /U 18, U 19, U 16/ damit bestätigt wurden.

Zur Bestimmung der Rohdichte sowie des Bor- und Wassergehaltes wurden an beiden Strahlenschutz Toren insgesamt 8 Kernbohrungen durchgeführt. Die Bohrkerne wurden im Institut für Bauphysik und Biochemie laborseitig untersucht. Die Ergebnisse wurden in einem entsprechenden Gutachten /U 20/ zusammengefasst.

In Tab. 3.7 sind die Untersuchungsergebnisse der 8 Kernbohrungen für die Parameter: Rohdichte, Borgehalt und Wassergehalt dargestellt.

Material- probe	Rohdichte [g/cm ³]	Gesamtwassergehalt [l/m ³]	Borgehalt [ppm]
1	3,150	177,5	16.290
2	3,120	176,5	15.700
3	3,150	154,5	16.270
4	2,280	142,5	-
5	2,300	148,0	-
6	2,380	168,0	-
8	2,260	103,0	-

Tab.3.7 Darstellung der Untersuchungsergebnisse

Zu allen Proben wurde im Gutachten /U 20/ festgestellt, dass die Betone unter praktischen Bedingungen ein homogenes und dichtes Gefüge aufweisen. Dabei wurde die Probe der Kernbohrung 7 von den Untersuchungen ausgeschlossen, da bei dieser Kernbohrung offensichtlich die Betonierfuge zwischen Strahlenschutzbeton und Normalbeton getroffen wurde, sodass eine Auswertung der Mischproben wenig Sinn hat.

Gemäß den Antragsunterlagen /U 1, U 2/ ist bei den vorliegenden Betrachtungen als Richtwert für den erforderlichen Wassergehalt ein Wert von 120 l/m^3 angegeben. Die Materialproben 1 bis 3 zum Schwerbeton weisen einen Wassergehalt von $154,5 - 177,5 \text{ l/m}^3$ auf und übertreffen damit den festgesetzten Richtwert für den erforderlichen Wassergehalt deutlich. Die Materialproben 4-6 zum Normalbeton weisen einen Wassergehalt von $142,5 - 168 \text{ l/m}^3$ auf und übertreffen damit den Richtwert von 120 l/m^3 für den erforderlichen Wassergehalt ebenso. Die Materialprobe 8 hat einen Wassergehalt von 103 l/m^3 und liegt damit unter dem geforderten Richtwert.

Nach dem Gutachten /U 20/ ist bei den Hallentoren als Richtwert ein Borgehalt von 15.305 ppm vorgegeben, der durch Zugabe von Borcarbid erreicht wird. Die untersuchten Materialproben 1 bis 3 weisen einen Borgehalt von $15.700 - 16.290 \text{ ppm}$ auf. Der als Richtwert für den erforderlichen Borgehalt des Schwerbetons angegebene Wert von 15.305 ppm wird eingehalten bzw. deutlich übertroffen.

Bewertungsmaßstäbe

Die Bewertung der Datenlage zu den messtechnisch ermittelten Betonparametern (Dichte, Wasservolumenanteil und Bormassenanteil) der Strahlenschutzore (Montagetor, Personaltor) erfolgt vorrangig anhand vorhandener Proben und deren zweckdienlicher Auswertung sowie über die repräsentative Lage der Stellen für die Probenahme. Um die Zusammensetzung der ausgeführten Betonmischung nach einer Standzeit von mehreren Jahren aus der Sicht des Strahlenschutzes zu bewerten, wurden zur Auswertung der acht Kernbohrungen /U 20/ hinsichtlich der geforderten Betonparameter die einschlägigen Normen zur Klassifikation von Abschirmbetonen, wie die DIN 25413 Teil 1 und Teil 2 /R 10/, sowie die allgemeinen Strahlenschutzgrundsätze §§ 4-6 StrlSchV /R 1/ herangezogen.

Wertung

Zur Bewertung des in den Strahlenschutztores ausgeführten Schwerbetons mit Borcarbid-Zusatz, aus dem der untere Teil der Tore gefertigt wurde, wurden im Rahmen der Qualitätssicherung der Torzusammensetzung an repräsentativen Stellen vier Kernbohrungen vorgenommen. Des Weiteren wurden zur Bewertung des für den oberen Teil der Strahlenschutztores ausgeführten Normalbetons an repräsentativen Stellen weitere vier Bohrkerne entnommen. Aus diesen acht Bohrkernen sollte die Rohdichte, der Wassergehalt bzw. der Borgehalt (für Schwerbeton mit Borcarbid-Zusatz) bestimmt werden.

Da Probe 7 nicht sinnvoll auszuwerten war, erfolgte die Analyse der restlichen sieben Bohrkerne. Diese Verfahrensweise wurde im Gutachten /U 20/ als erforderlich dargestellt. Für die sieben analysierten Proben wurden brauchbare Messwerte der Rohdichte und des Wassergehalts (Tab. 3.7) vorgelegt und für die drei Bohrkerne aus Schwerbeton der Borgehalt ermittelt.

Hinsichtlich der gesamten Datenlage zur Beprobung der Strahlenschutztores sowie der messtechnischen Auswertung und Interpretation der gemessenen strahlenschutzrelevanten Betonparameter ist festzustellen, dass eine ausreichende Anzahl von Proben an den Strahlenschutztores (Montagetor und Personaltor) genommen wurde.

3.3.2 Ergänzende Beprobung der Torushallenwände

3.3.2.1 Durchführung der Beprobung

Entsprechend der gutachterlichen Stellungnahme /L 8/ vom 22.02.2013 wird die Datenlage zum Nachweis des Wassergehaltes als nicht ausreichend eingeschätzt, da für den Nachweis des Wassergehalts ausschließlich Proben aus der Bodenplatte des Torushallengebäudes genommen und analysiert wurden.

Bei der Begehung am 14.02.2013 im Max-Planck-Institut für Plasmaphysik (IPP), Wendelsteinstraße 1 in 17491 Greifswald, wurden deshalb durch den Gutachter /L 6/ entsprechende Punkte für die Beprobung der vier Außenwände der Torushalle in den Bereichen 1. UG bis 2. OG ausgewählt.

Im Zeitraum vom 21.03.2013 bis 26.03.2013 fand im IPP/Greifswald die Probenahme mittels Kernbohrung für die sechs vom Gutachter ausgewählten Punkten an den vier Außenwänden der Torushalle in den Bereichen 1. UG bis 2. OG statt /L 10/. Dabei erfolgten die Kernbohrungen von der Außenwand in Richtung Fusionsexperiment bis zur halben Wanddicke. Es handelte sich dabei um folgende Punkte:

1. Punkt 4 1. UG, Flur (keine Labore), Torushallenwand WEST, Höhe: ca. 1,60 m – 1,70 m
2. Punkt 6 EG, Flur (keine Labore), Torushallenwand NORD, Höhe: ca. 1,60 m – 1,70 m
3. Punkt 7 EG, peripherer Diagnostikbereich, Torushallenwand OST, Höhe: ca. 1,60 m – 1,70 m
4. Punkt 9 1. OG, Flur und Labore, Torushallenwand NORD, Höhe: ca. 1,60 m – 1,70 m
5. Punkt 11 1. OG, Leitwarte Magnetsystem, Torushallenwand SÜD, Höhe: ca. 1,60 m – 1,70 m
6. Punkt 14 2. OG, Büro Helium-Kälteanlage, Torushallenwand SÜD, Höhe: ca. 1,60 m – 1,70 m

Der Gutachter hat dabei die Durchführung der Kernbohrungen an den Punkten 4, 6, 9 und 11 im Zeitraum vom 21.03.2013 bis 22.03.2013 begleitet und war bei den folgenden wesentlichen Schritten vor Ort:

1. Bestimmung der exakten Probenahmestellen mittels Bewehrungssuchgerät
2. Zeitliche Erfassung von Beginn und Ende der Probenahme
3. Entnahme und Kennzeichnung der einzelnen Bohrkernstücke
4. Verpackung der einzelnen Bohrkernstücke in luftdichte Folie
5. Lagerung der in einer verschweißten Folie verpackten Bohrkernstücke in eine entsprechend gekennzeichnete Transportkiste aus Holz
6. Versiegelung der Transportkisten
7. Erstellung des Probenahmeprotokolls für die einzelnen Punkte

Es wurde dabei besonders auf die Einhaltung der vom Gutachter erstellten Handlungsanweisung /L 7/ geachtet. Die einzelnen Schritte wurden fotodokumentarisch erfasst /L 10/.

Bewertungsmaßstäbe

Als Bewertungsmaßstab diente neben der vom Gutachter erstellten Handlungsanweisung /L 7/ vorrangig die DIN EN 12504-1 (Ausgabe: Juli/2009), Prüfung von Beton in Bauwerken, Teil 1: Bohrkernproben /R 3/. Für die Lagerung und den Transport der Bohrkernstücke wurden die Empfehlungen des BAW-Merkblattes „Bohrkernentnahme für Bauwerksuntersuchungen (MBK)“, Ausgabe 2012, Bundesanstalt für Wasserbau /R 4/ als Bewertungsmaßstab neben der vom Gutachter erstellten Handlungsanweisung /L 7/ herangezogen.

Wertung

Bei den sechs vom Gutachter ausgewählten Punkten für die Beprobung der vier Außenwände der Torushalle in den Bereichen 1.UG bis 2. OG wurden im Zeitraum vom 21.03.2013 bis 26.03.2013 Kernbohrungen durchgeführt. Der Gutachter hat dabei die Durchführung der Probenahme mittels Kernbohrung für die Punkte 4, 6, 9 und 11 im Zeitraum vom 21.03.2013 bis 22.03.2013 begleitet. Bei der Begutachtung vor Ort konnte dabei festgestellt werden, dass die Beprobung und die Lagerung entsprechend der vom Gutachter erstellten Handlungsanweisung /L 7/ fachgerecht durchgeführt wurden. Es wurde ferner darauf geachtet, dass die Bohrlöcher vor Fremdeinwirkung durch Abkleben mit Klebeband bis zur Rückverfüllung geschützt sind. Für alle Bohrungen wurden Protokolle erstellt.

3.3.2.2 Auswertung der Kernbohrungen

Entsprechend unserer ersten Stellungnahme vom 22.02.2013 /L 8/ wurde aufgrund der nicht ausreichenden Datenlage hinsichtlich der Bestimmung des Wassergehalts im Beton der Torushallenwände vom Gutachter eine weitergehende Untersuchung gemäß dem 3. Punkt der Leistungsbeschreibung /L 1/ vorgeschlagen, die eine zusätzliche Beprobung relevanter Bereiche der Torushallenwände beinhaltet.

Die zusätzliche Beprobung der Torushallenwände wurde streng nach der vom Gutachter erstellten Handlungsanweisung /L 7/ durchgeführt. Das betrifft insbesondere die Einbringung der Kernbohrung, die Lagerung und Auswertung der Bohrkerne bzw. der Proben. Dazu wurde ein Begehungsbericht /L 10/ erarbeitet und dem LAGuS zugesandt. Die Rückverfüllung ist im Kapitel 3.3.2.3 im Detail beschrieben.

Die Auswertung der Proben erfolgte hinsichtlich der Bestimmung des Wasser- und des Borgehaltes für die entsprechenden Wandbereiche der Torushalle. Zur Analyse der Proben wurde sowohl bei den Auswerteverfahren als auch den einzubeziehenden Laboratorien auf die bisherigen zurückgegriffen. Die Analyseergebnisse zum Strahlenschutzbeton sind im Gutachten der Firma IBB GmbH /U 46/ angegeben. Im Einzelnen wurden folgende Ergebnisse dargestellt.

Im Gutachten wurde von einer mittleren Rohdichte von $2,27 \text{ g/cm}^3$ ausgegangen. Damit wurden für die 12 Materialproben (je eine äußere und innere Probe pro Bohrkern) Gesamtwassergehalte von $123 - 160 \text{ l/m}^3$ bestimmt, wobei die betrachtete Größe als Volumenanteil oder Volumenpromille bezeichnet werden könnte. Der Gesamtwassergehalt setzt sich entsprechend dem Gutachten /U 46/ aus dem physikalisch gebundenen Wasser und dem Kristallwasser (chemisch gebunden) zusammen. Für die Materialproben wurden Gehalte von physikalisch gebundenem Wasser von $44 - 69 \text{ l/m}^3$ sowie von Kristallwasser von $69 - 104 \text{ l/m}^3$ ermittelt. Mit diesen Ergebnissen zeigt sich, dass der in den vorliegenden Unterlagen geforderte Wert von 120 l/m^3 eingehalten bzw. meist deutlich überschritten ist.

Für die Messergebnisse zum Wassergehalt wurden Häufigkeitsverteilungen erstellt, die in der Abb. 3.10 a-c wiedergegeben sind. Daraus ergeben sich die Mittelwerte und die statistischen Fehler der Mittelwerte für den gesamten Wassergehalt zu einem Vertrauensbereich von 95%.

Für den Gesamtwassergehalt erhält man $(143,7 \pm 6,6) \text{ l/m}^3$ und für den physikalischen Wassergehalt und den Kristallwassergehalt ergeben sich Werte von $(53,4 \pm 4,5) \text{ l/m}^3$ bzw. $(90,3 \pm 5,8) \text{ l/m}^3$. Die beiden Hauptpeaks in jeder Darstellung repräsentieren die Ergebnisse für den „mittleren“ Wassergehalt jeder Größe für den äußeren (links) bzw. inneren (rechts) Teil der Bohrkerns. Aus den Messergebnissen und den Mittelwerten zum Wassergehalt lässt sich direkt erkennen, dass der Kristallwasseranteil wesentlich höher als der Anteil physikalisch gebundenen Wassers im Beton der Torushallenwände ist. Des Weiteren weisen die Messergebnisse darauf hin, dass der Kristallwasseranteil bei den inneren Proben (Wandzentrum) immer ca. 10 - 25% über dem Anteil der äußeren Proben (äußere Wand, oberflächennah) liegt, beim physikalisch gebundenen Wasseranteil (Abb. 3.10 b) gibt es nur minimale Abweichungen zwischen den zugehörigen Messwerten.

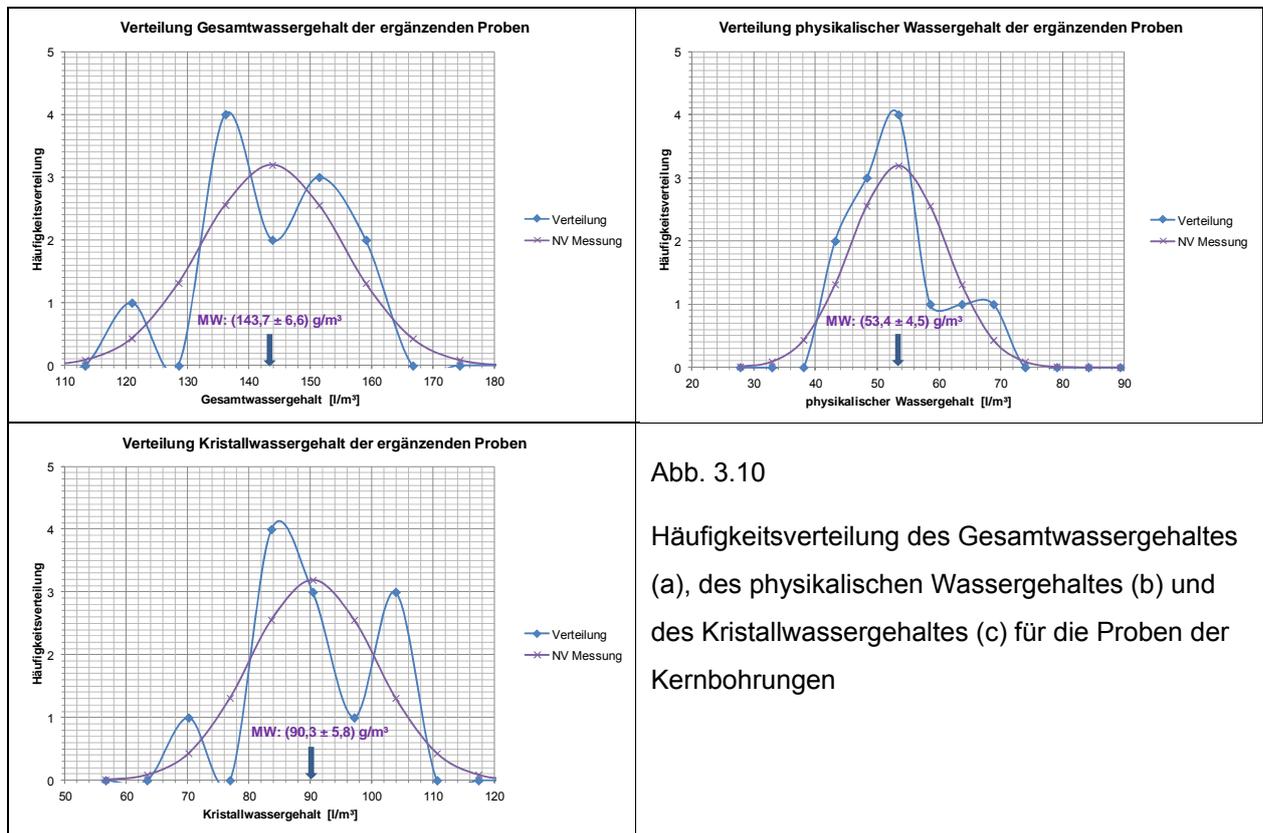
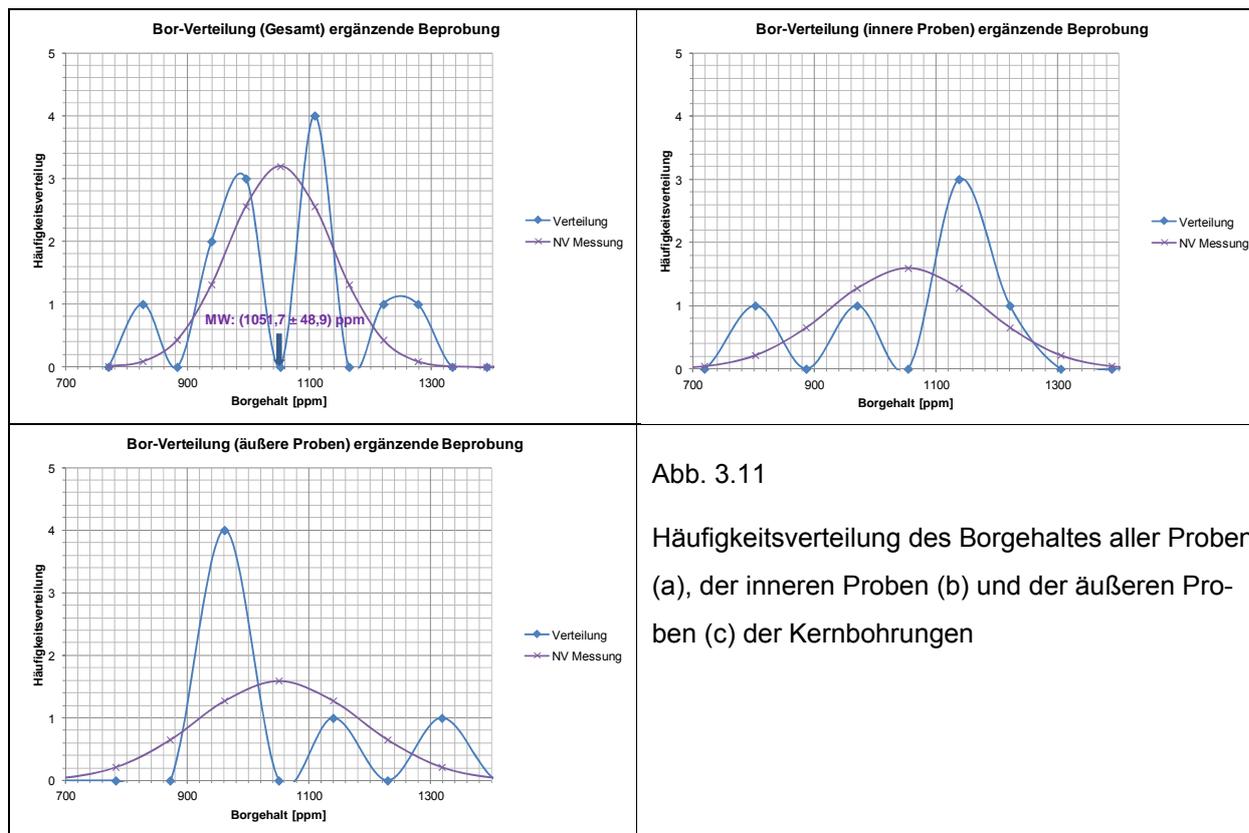


Abb. 3.10
 Häufigkeitsverteilung des Gesamtwassergehaltes (a), des physikalischen Wassergehaltes (b) und des Kristallwassergehaltes (c) für die Proben der Kernbohrungen

Für die Messergebnisse zum Borgehalt wurden Häufigkeitsverteilungen erstellt, die in Abb. 3.11 a-c dargestellt sind. Daraus ergeben sich die Mittelwerte und statistischen Fehler für den Borgehalt (95% Vertrauensbereich). Für den Mittelwert aller Proben erhält man $(1051,7 \pm 48,9) \text{ ppm}$ und für die Mittelwerte der inneren und äußeren Proben ergeben sich $(1053,3 \pm 102,6) \text{ ppm}$ bzw. $(1050 \pm 109,5) \text{ ppm}$.



Bewertungsmaßstäbe

Die Bewertung der Datenlage zu den messtechnisch ermittelten Betonparametern (Dichte, Wasservolumenanteil und Bormassenanteil), die für die Abschirmwirkung der Torushallenwände von Bedeutung sind, erfolgte vorrangig anhand der vorhandenen Proben und deren zweckdienlicher Auswertung sowie über die repräsentative Lage der Stellen für die Probenahme. Um die Zusammensetzung der ausgeführten Betonmischung unmittelbar nach Errichtung bzw. nach einer Standzeit von mehr als 15 Jahren aus der Sicht des Strahlenschutzes zu bewerten, wurden zur Auswertung der zusätzlichen Kernbohrungen /U 46, L 14/ hinsichtlich der geforderten Betonparameter die einschlägigen Normen zur Klassifikation von Abschirmbetonen, wie die DIN 25413 Teil 1 und Teil 2 /R 10/, sowie die allgemeinen Strahlenschutzgrundsätze §§ 4-6 StrlSchV /R 1/ herangezogen.

Wertung

Aus den 12 Materialproben (je eine äußere und innere Probe pro Bohrkern) wurden Bormassenanteile von 840 – 1300 ppm (Masse Bor pro Trockenmasse Beton) bestimmt. Mit diesen Ergebnissen zeigt sich, dass der in den vorliegenden Unterlagen /U 1, U 2/ gefor-

derte Wert von 1000 ppm für nahezu alle Proben eingehalten bzw. meist deutlich überschritten ist. Dies gilt auch für die Mittelwerte einzelner Kernbohrungen.

Bei den Proben, bei denen der Wert von 1000 ppm nicht erreicht wird, bzw. bei der Kernbohrung Nr. 11, bei der sich der Mittelwert von 920 ppm ergibt, verweisen wir auf die Berechnungen zur Abhängigkeit der Abschirmwirkung der Torushallenwände von deren Borgehalt, die in unserem Gutachten im Kapitel 3.3.3 näher dargestellt werden.

3.3.2.3 Rückverfüllung der Bohrlöcher

Entsprechend der vom Gutachter erstellten Handlungsanweisung /L 7/ mussten die Bohrlöcher, die durch die durchgeführte Probenahme von Kernbohrungen im Zeitraum vom 21.03.2013 bis 26.03.2013 für die sechs vom Gutachter ausgewählten Punkte der vier Außenwände der Torushalle in den Bereichen 1. UG bis 2. OG im IPP/Greifswald entstanden sind, wieder rückverfüllt werden. Der Vergussbeton war entsprechend den Qualitätskriterien des Bestandsbetons (Rohdichte, Festigkeitsklasse, w/z-Wert, Mindestborgehalt ≥ 1000 ppm) auszuführen.

Im Zeitraum vom 09.09.2013 bis 12.09.2013 fand im IPP/Greifswald die Rückverfüllung der Bohrlöcher für die sechs vom Gutachter ausgewählten Punkte der vier Torushallenwände in den Bereichen 1. UG bis 2. OG statt.

Es handelt sich dabei um die Bohrlöcher folgender Punkte:

- | | |
|-------------|--|
| 1. Punkt 4 | 1. UG, Flur (keine Labore), Torushallenwand WEST, Höhe: ca. 1,60 m – 1,70 m |
| 2. Punkt 6 | EG, Flur (keine Labore), Torushallenwand NORD, Höhe: ca. 1,60 m – 1,70 m |
| 3. Punkt 7 | EG, peripherer Diagnostikbereich, Torushallenwand OST, Höhe: ca. 1,60 m – 1,70 m |
| 4. Punkt 9 | 1. OG, Flur und Labore, Torushallenwand NORD, Höhe: ca. 1,60 m – 1,70 m |
| 5. Punkt 11 | 1. OG, Leitwarte Magnetsystem, Torushallenwand SÜD, Höhe: ca. 1,60 m – 1,70 m |
| 6. Punkt 14 | 2. OG, Büro Helium-Kälteanlage, Torushallenwand SÜD, Höhe: ca. 1,60 m – 1,70 m |

Der komplette Prozess der Rückverfüllung der einzelnen Bohrlöcher wurde dabei durch den Betreiber IPP fotodokumentarisch erfasst. Für alle rückverfüllten Bohrlöcher wurden detaillierte Protokolle erstellt.

Der Gutachter führte am 12.09.2013 die Endabnahme der rückverfüllten Bohrlöcher durch. Neben der fachgerechten Ausführung der Betonierarbeiten (Betonmixturen, Verfüllungstechnik) wurde insbesondere auf die Einhaltung der vom Gutachter erstellten Handlungsanweisung /L 7/ geachtet.

Bei der Endabnahme hat der Gutachter das Verspachteln der rückverfüllten Bohrlöcher begutachtet und fotodokumentarisch erfasst (siehe Abb. 3.12).



Abb. 3.12 a, b) Bohrloch 9 vor dem Verspachteln (links), Bohrloch 9 nach dem Verspachteln (rechts)

Zusätzlich zu den sechs Bohrlöchern der Torushallenwänden (Proben-Nr. 4-14) wurden die acht Bohrlöcher /U 20/ der Strahlenschutzttore (Montagetor, Personaltor) rückverfüllt. Für die Rückverfüllung dieser Bohrlöcher wurde vom Gutachter eine Endabnahme am 12.09.2013 durchgeführt. Neben der fachgerechten Ausführung der Betonierarbeiten (Betonmixturen, Verfüllungstechnik) wurde insbesondere auf die Einhaltung der vom Gutachter erstellten Handlungsanweisung /L 7/ geachtet.

Bewertungsmaßstäbe

Als Bewertungsmaßstab diente neben der vom Gutachter erstellten Handlungsanweisung /L 7/ die DAfStb-Richtlinie „Herstellung und Verwendung von zementgebundenem Vergussbeton und Vergussmörtel“, Ausgabe 2011 /R 6/ sowie die Empfehlungen des BAW-Merkblattes „Zweitbeton (MZB)“, Ausgabe 2012, Bundesanstalt für Wasserbau /R 5/.

Wertung

Bei der Begutachtung vor Ort konnte festgestellt werden, dass die Rückverfüllung der Bohrlöcher entsprechend der vom Gutachter erstellten Handlungsanweisung /L 7/ fachgerecht ausgeführt wurde. Der Vergussbeton entspricht den Qualitätskriterien des Bestandsbetons (Rohdichte, Festigkeitsklasse, w/z-Wert).

Im Einzelnen wurden die betreffenden Bohrlöcher der Proben-Nr. 4 -14 gemäß den vorliegenden Angaben zum Vergussbeton rückverfüllt. Soweit die Daten aus den handschriftlichen Aufzeichnungen zu interpretieren waren, wurden sie neben den Protokollen /U 47/ in die Auswertung zur Rückverfüllung einbezogen, die Ergebnisse sind in Tab. 3.8 dargestellt.

Proben-Nr.	Ort	Gesamtmasse Anmischung [kg]	Masse für Probewürfel [kg]	Rohdichte nach Protok. [g/cm ³]	Ermittelte Dichte Probe [g/cm ³]	Wassermasse in Beton/Zug [kg]	Wasseranteil minimal *) [l/m ³]	Masse Colemanit [kg]	Anteil (85% Colemanit) [ppm]	Borgehalt gesamt [ppm]
4	West, 1.UG	68,7	7,7	2,60	2,28	4,50	170	0,6	9346	1120
6	Nord, EG	68,7	7,7	2,60	2,28	4,50	170	0,6	9346	1120
7	Ost, EG	68,7	8,2	2,76	2,43	4,50	181	0,6	9346	1120
9	Nord, 1.OG	68,7	7,7	2,60	2,28	4,50	170	0,6	9346	1120
11	Süd, 1.OG	68,7	8,2	2,76	2,43	4,50	181	0,6	9346	1120
14	Süd, 2.OG	68,7	8,2	2,76	2,43	4,50	181	0,6	9346	1120

*) minimaler Wassergehalt ohne den chemischen gebundenen Anteil in den Zuschlagstoffen (z.B. Colemanit)

Tab. 3.8 Angaben zu den Mixturen des Vergussbetons für die Torushallenwände

In der Tab. 3.8 zeigt sich eindrucksvoll, dass die erforderliche Rohdichte des Normalbetons mit Colemanit-Zusatz mit mindestens 2,6 g/cm³ für alle Bohrlöcher deutlich übertroffen wird, was auch mit der Beimischung von zusätzlichem Magnetit zu erklären ist. Diese Beimischung ist aus der Sicht des Strahlenschutzes anforderungsgerecht und trägt zur Erhöhung der Abschirmwirkung der jeweiligen Wandbereiche bei. Ebenso ist der für den Borbeton geforderte Wasservolumenanteil /U 2/ von 120 l/m³ sicher eingehalten und mit 170 ... 181 l/m³ deutlich übertroffen, obwohl bei den Betrachtungen nur der zugemischte Wasseranteil, nicht die in den Komponenten chemisch gebundenen Anteile, berücksichtigt werden konnten. Der festgelegte Mindestborgehalt von 1000 ppm /U 2/ wird im Ergebnis der Rückverfüllung mit ca. 1120 ppm ebenfalls deutlich überschritten.

Bei der Rückverfüllung der Bohrlöcher in den Strahlenschutzturen wurde jeweils im oberen Torbereich Normalbeton und im unteren Torbereich Schwerbeton mit Borcarbid, entsprechend der Bestandszusammensetzung, verwendet. Im Einzelnen wurden die betreffenden Bohrlöcher der Proben-Nr. 1 - 8 gemäß den vorliegenden Angaben zum

Vergussbeton rückverfüllt. Soweit die Daten aus den handschriftlichen Aufzeichnungen zu interpretieren waren, wurden sie neben den Protokollen /U 48/ in die Auswertung zur Rückverfüllung einbezogen, die Ergebnisse sind in Tab. 3.9 dargestellt.

Proben-Nr.	Ort	Gesamtmasse Anmischung [kg]	Masse für Probewürfel [kg]	Rohdichte nach Protok. [g/cm ³]	Ermittelte Dichte Probe [g/cm ³]	Wassermasse in Beton/Zugabe [kg]	Wasseranteil minimal *) [l/m ³]	Masse Borcarbid [kg]	Anteil Borcarbid [ppm]	Borgehalt gesamt [ppm]
1	Montagetor	74,44	11,9	4,02	3,53	3,24	175	1,2	16854	13193
2	Montagetor	111,66	12	4,05	3,56	4,86	176	1,8	16854	13193
3	Montagetor	111,66	12	4,05	3,56	4,86	176	1,8	16854	13193
4	Montagetor	90,3	8,1	2,73	2,40	5,50	166	-	-	-
5	Montagetor	90,3	8,1	2,73	2,40	5,50	166	-	-	-
6	Montagetor	90,3	8,1	2,73	2,40	5,50	166	-	-	-
7	Personaltor	74,44	11,9	4,02	3,53	3,24	175	1,2	16854	13193
8	Personaltor	90,3	8,1	2,73	2,40	5,50	166	-	-	-

*) minimaler Wassergehalt ohne den chemischen gebundenen Anteil in den Zuschlagstoffen (z.B. Sand, Zement)

Tab. 3.9 Angaben zu den Mixturen des Vergussbetons für die Strahlenschutzore

Aus Tab. 3.9 ergibt sich, dass die erforderliche Rohdichte des Normalbetons bzw. des Schwerbetons mit mindestens 2,7 g/cm³ bzw. 4,0 g/cm³ für alle Bohrlöcher deutlich übertroffen wird, was auch mit der Beimischung von zusätzlichem Magnetit zu erklären ist. Diese Beimischung ist aus der Sicht des Strahlenschutzes anforderungsgerecht und trägt zur Erhöhung der Abschirmwirkung der jeweiligen Torbereiche bei. Ebenso ist der für den Normalbeton bzw. Schwerbeton der geforderte Wasservolumenanteil /U 2/ von 120 l/m³ sicher eingehalten und mit 166 ... 176 l/m³ deutlich übertroffen, obwohl bei den Betrachtungen ebenso nur der zugemischte Wasseranteil, nicht die in den Komponenten chemisch gebundenen Anteile, berücksichtigt werden konnten. Der festgelegte Mindestborgehalt von 15300 ppm /U 2/ wird im Ergebnis der Rückverfüllung mit ca. 13200 ppm nicht erreicht. Dieser Boranteil im Schwerbeton für die Rückverfüllung der Bohrlöcher im unteren Torbereich ist dennoch als anforderungsgerecht einzuschätzen, weil:

- der Boranteil für die Abschirmwirkung von Neutronenstrahlung im allgemeinen überschätzt wird /U 21, U 28/,
- die deutlich größere Dichte des Strahlenschutz-Vergussbetons (> 25%) den geringen Bor-Anteil (<14%) bei weitem kompensiert und
- die zusätzliche Polyethylen-Schicht für die erforderliche Moderierung der Neutronen einen großen Effekt liefert und ausreichend ist.

Der komplette Prozess der Rückverfüllung der einzelnen Bohrlöcher wurde fotodokumentarisch erfasst. Für alle rückverfüllten Bohrlöcher wurden detaillierte Protokolle /U 47, 48/ erstellt. Die Rückverfüllung der Bohrlöcher wurde streng entsprechend der vom Gutachter erstellten Handlungsanweisung /L 7/ ausgeführt. Die ausgeführte Rückverfüllung wird



vom Gutachter für alle Bohrlöcher als anforderungsgerecht bewertet und das erreichte Ergebnis wird hinsichtlich der Anforderungen des Strahlenschutzes als abdeckend eingeschätzt.

3.3.3 Systematische Untersuchung der Abhängigkeit der Dosisleistung

Die zur Abschirmung von Neutronen- und Photonenstrahlung wesentlichen Materialparameter (Betondichte, Wasservolumenanteil und Bormassenanteil) der Strahlenschutzwände wurden in den Berichten und Gutachten /U 4 - U 7, U 16 - U 19/ umfangreich diskutiert, und mit den Gutachten /U 15, U 20/ zur messtechnischen Bestimmung dieser Parameter wurden Ergebnisse vorgelegt, die den Nachweis über die anforderungsgerechte Planung und Ausführung der Torushallenwände erbringen sollten.

Entsprechung unserer Bewertung in den Kapiteln (3.1; 3.3.1; 3.3.2) ist dieser Nachweis nur teilweise erfolgt, da zum einen in den Berechnungsunterlagen /U 4 – U 7/ eine klare Systematik zur Abhängigkeit der Dosisleistung hinter der jeweiligen Strahlenschutzwand (d. h. damit zur Abschirmwirkung der entsprechenden Torushallenwand) von Betondichte, Wasservolumenanteil und Bormassenanteil nicht zu erkennen ist und zum anderen bei der Auswertung der Rückstellproben und Bohrkerne nicht alle möglichen und notwendigen Analysen hinsichtlich der betreffenden Parameter durchgeführt wurden.

Bezüglich des ersten Punktes ist zu vermerken, dass in den Jahren 1996 - 1998, in denen Berechnungen zur Abschirmwirkung der Wände durchgeführt und Berichte bzw. Gutachten /U 4 – U 14/ erstellt wurden, die Rechentechnik (Computersysteme, abgesehen von Großrechnern) sowie die Monte-Carlo-Simulations-Software (MC) noch nicht so weit entwickelt war, um bei der Komplexität der Anlage mit akzeptablen Rechenzeiten statistisch signifikante Resultate zu erzielen. Das wird auch dadurch belegt, dass bei den von uns absolvierten Simulationsrechnungen zur Abschirmwirkung der Torushallenwände etwa von 30-50 Tagen Rechenzeit pro Prozessor-Core für jede einzelne Modellrechnung auszugehen ist, um die notwendige Teilchenstatistik in den Testdetektoren zu erzielen und klare Schlussfolgerungen aus den Ergebnissen ziehen zu können. Um die Abhängigkeit der Strahlungsschwächung durch die Torushallenwände von den wesentlichen Materialparametern (Wassergehalt, Borgehalt) zu ermitteln, sind mindestens 15 - 20 Berechnungen erforderlich.

Bei der Erstellung der Berechnungsmodelle sind neben Modellierung des Fusionsexperiments Wendelstein 7-X und der Baustruktur vor allem auch die Betonmixturen (unter Variation des Wasseranteils und Massenanteils für den Colemanit-Zusatzstoff) zu ermitteln, die direkt in die MC-Simulationsrechnung als Nuklid-Massenanteile (oder Isotopen-Massenanteile) eingehen. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die betrachteten Größen nicht unabhängig voneinander sind, denn bei der Variation von Wasser- oder Borgehalt

verändert sich auch die Dichte des Betons bzw. mit Erhöhung des Colemanit-Anteils steigt auch der Wassergehalt im Beton, weil im Colemanit ($2 \text{ CaO} \cdot 3 \text{ B}_2\text{O}_3 \cdot 5 \text{ H}_2\text{O}$) Wasser chemisch gebunden ist. Diese Abhängigkeiten wurden, auch wenn sie gering sind, bei der Modellierung der Betonmixturen mit berücksichtigt.

Zur Modellierung der Betonmixturen wurde ein Drei-Substanzen-Modell erstellt, nach dem die Variation der Parameter Wasservolumenanteil und Bormassenanteil (Trockenmasse) erfolgte und somit die jeweiligen Massenanteile der einzelnen chemischen Elemente der Betonmischung berechnet wurden. Die Verfahrensweise wird im Folgenden im Detail beschrieben.

Der Beton der Torushallenwände besteht aus einem idealisierten Gemisch aus den folgenden drei Substanzen, welches die real ausgeführten Verhältnisse recht genau beschreibt:

- Normaler Beton (im Modell Los Alamos Beton LAC aus dem MCNP-Manual)
- Zusätzliches Wasser
- Colemanit ($2 \text{ CaO} \cdot 3 \text{ B}_2\text{O}_3 \cdot 5 \text{ H}_2\text{O}$) zum Neutroneneinfang im B-10.

Von diesen Stoffen sind die genauen Zusammensetzungen und die Dichten bekannt. Der Wasseranteil der zugemischten Substanzen wird als zusätzliches Wasser mit dem Volumenanteil f_{ZW}^V und Colemanit mit dem Massenanteil f_C^m , auf die Trockenmasse gerechnet, als freie Parameter angesehen. Unter Variation dieser Größen (Wasser 100 ... 150 l/m³ und Colemanitgehalt 300 ... 1000 ppm bzw. bis 10000 ppm) werden die Abschirmwirkungen der Torushallenwände für Neutronen- und Photonenstrahlung ermittelt.

Die für die Monte-Carlo-Simulation mit dem MCNPX-Code bedeutenden Größen sind die Massenanteile der einzelnen chemischen Elemente bzw. Isotope, unter Berücksichtigung der einzelnen Isotope. Die Massenanteile der drei Komponenten (beschrieben mit den Indices für Normalbeton LAC: NB, H₂O: ZW und Colemanit: C) und die Gesamtdichte ρ_T bzw. die Dichte der Feststoffe ρ_S sind die Ausgangsgrößen.

Die Massenanteile der Isotope sind Funktionen der Betondichte $\rho_{NB} = 2,251 \text{ g/cm}^3$, der Dichte von Wasser $\rho_W = 1,0 \text{ g/cm}^3$, der Dichte des Colemanit-Zusatzstoffes (mit ca. 85% Colemanit) $\rho_C = 2,2 \text{ g/cm}^3$, des Volumenanteils von zusätzlichem Wasser f_{ZW}^V und des

Massenanteils f_C^{mD} von Colemanit, auf die Trockenmasse bezogen. Die Definition dieser Größen beschreiben die folgenden Gleichungen.

$$f_{ZW}^V = \frac{V_{ZW}}{V_T} \quad \text{mit } V_T = V_{NB} + V_{ZW} + V_C \quad (1)$$

$$f_C^{mD} = \frac{m_C}{m_{NB} + m_C} \quad (2)$$

Wobei sich die Gesamtdichte (total) aus den totalen Massen und den Volumina ergibt.

$$\rho_T = \frac{m_T}{V_T} = \frac{m_{NB} + m_{ZW} + m_C}{V_{NB} + V_{ZW} + V_C} \quad \text{mit } m_T = m_{NB} + m_{ZW} + m_C \quad (3)$$

$$\rho_T = \rho_S \cdot (1 - f_{ZW}^V) + \rho_W \cdot f_{ZW}^V \quad \text{mit } \rho_S = \frac{m_T - m_{ZW}}{V_T - V_{ZW}} \quad (4)$$

Die exakten Massenanteile der drei einzelnen Substanzen ergeben sich dann aus den Formeln (5-7) und Berücksichtigung von Formel (8):

$$f_{ZW}^m = \frac{m_{ZW}}{m_T} = \frac{1}{1+k} \quad (5)$$

$$f_{NB}^m = \frac{m_{NB}}{m_T} = \frac{(1 - f_C^{mD}) \cdot k}{1+k} \quad (6)$$

$$f_C^m = \frac{m_C}{m_T} = \frac{f_C^{mD} \cdot k}{1+k} \quad (7)$$

$$\text{mit } k = \frac{1 - f_{ZW}^V}{f_{ZW}^V} \cdot \frac{\rho_{NB}}{\rho_W} \cdot \left[1 - f_C^{mD} \cdot \left(1 - \frac{\rho_{NB}}{\rho_C} \right) \right]^{-1}$$

Die Gesamtdichte ρ_T ergibt sich vereinfacht dann mit Formel (8):

$$\rho_T = \rho_S \cdot \frac{1 - f_{ZW}^V}{1 - f_C^{mD}} + \rho_W \cdot f_{ZW}^V \quad (8)$$

mit $\rho_T = \rho_S$ wenn $f_{ZW}^V = 0$ und $f_C^{mD} = 0$ bzw. $\rho_T = \rho_W$ wenn $f_{ZW}^V = 1$

Die Massenanteile der einzelnen chemischen Elemente f_j^E wurden auf folgende Weise berechnet:

$$f_j^E = \sum_{i=1}^3 f_i \frac{c_{ij} \cdot A_j}{M_{Ti}} \quad \text{mit} \quad M_{Ti} = \sum_{k=1}^N c_{ik} \cdot A_k \quad (9)$$

wobei A_j die Atommasse/Molekülmasse des j -ten chemischen Elements in der i -ten chemischen Substanz ($i = 3$, mit NB, ZW und C) mit dem Atomanteil c_{ij} darstellt. Die Größe M_{Ti} beschreibt die gesamte molare Masse der i -ten chemischen Verbindung. Bei den gesamten Massenanteilen der Elemente ist zu berücksichtigen, dass einzelne Elemente, wie z. B. Wasserstoff und Kalzium, in mehreren der drei Substanzen (Normalbeton, zusätzlicher Wasser und Colemanit) vorkommen und Sauerstoff in allen drei Verbindungen enthalten ist.

Mit Hilfe des angegebenen Formalismus (1 - 9) wurden die einzelnen Betonmixturen für die Torushallenwände modelliert. Die ermittelten Isotopenmassenanteile der betrachteten Mixturen sind die Ausgangsgrößen für die Modellierung der Torushallenwände und somit der Abschirmberechnungen mittels MC-Simulation. Die entsprechenden Parameter und die Ergebnisse für die Isotopenmassenanteile sind für die Variation des Wasseranteils bzw. der Boranteils in den Tabellen 3.10, 3.11 und 3.12 angegeben.

Weight Mass Fraction of Concrete Matrix "Concrete with Colemanit and additional Water"		Bulk Density: 2,214 kg/l		BulkDry Den.: 2,184 kg/l																		
		Colemanit: 0,8457 Mas-%		Wasser: 2,9540 Vol-%																		
		Los Alamos Concrete										Colemanit		additional Water								
		SiO ₂		H ₂ O		CaO		Na ₂ O		MgO		Al ₂ O ₃		K ₂ O		Fe ₂ O ₃		2*CaO 3*B ₂ O ₃ 5*H ₂ O + additive		H ₂ O		
BCTSn		0,771000		0,040750		0,061200		0,015700		0,006530		0,067400		0,017300		0,019700		8,344E-03		1,334E-02		
mass fraction		1,870E+00		8,825E-02		1,325E-01		3,400E-02		1,414E-02		1,460E-01		3,747E-02		4,266E-02		1,847E-02		2,954E-02		
mass per 1 [kg]		1,870E+00		8,825E-02		1,325E-01		3,400E-02		1,414E-02		1,460E-01		3,747E-02		4,266E-02		1,847E-02		2,954E-02		
Isotop	%	Isotop	%	Isotop	%	Isotop	%	Isotop	%	Isotop	%	Isotop	%	Isotop	%	Isotop	%	Isotop	%	Isotop	%	
28	92,23	1	200,0	40	96,941	22,99	200,0	24	78,99	27	200,0	39	186,52	54	11,60	11,98008	0,11111	54	11,60	11,98008	0,11111	
Si-		H-		Ca-		Na-		Mg-		Al-		K-		Fe-		B		O		Fe-		
29	4,67	16	100,0	42	0,647	43	0,135	25	10,00	16	300,0	41	13,48	56	183,44	38,94804	1,10984	39	186,52	38,94804	1,10984	
Si-		O-		Ca-43		Ca-43		Mg-		O-		O-		Fe-		Na		100,0	41	13,48	16,01320	2,659E-04
30	3,10	16	200,0	44	2,086	48	0,191	26	11,01	16	100,0	16	100,0	57	4,40	0,04451	1,12020	57	4,40	0,04451	1,12020	
O-		8,889E-01		Ca-		Ca-		Mg-		O-		O-		Fe-		Mg		100,0	57	4,40	1,10984	2,659E-04
				Ca-		O-		O-		16	100,0	16	100,0	58	0,56	1,10984	2,659E-04	100,0	58	0,56	1,10984	2,659E-04
				O-		16	100,0	16	100,0	16	100,0	16	100,0	58	0,56	1,10984	2,659E-04	100,0	58	0,56	1,10984	2,659E-04
				16	100,0	16	100,0	16	100,0	16	100,0	16	100,0	58	0,56	1,10984	2,659E-04	100,0	58	0,56	1,10984	2,659E-04
				16	100,0	16	100,0	16	100,0	16	100,0	16	100,0	58	0,56	1,10984	2,659E-04	100,0	58	0,56	1,10984	2,659E-04
				16	100,0	16	100,0	16	100,0	16	100,0	16	100,0	58	0,56	1,10984	2,659E-04	100,0	58	0,56	1,10984	2,659E-04
				16	100,0	16	100,0	16	100,0	16	100,0	16	100,0	58	0,56	1,10984	2,659E-04	100,0	58	0,56	1,10984	2,659E-04
				16	100,0	16	100,0	16	100,0	16	100,0	16	100,0	58	0,56	1,10984	2,659E-04	100,0	58	0,56	1,10984	2,659E-04
				16	100,0	16	100,0	16	100,0	16	100,0	16	100,0	58	0,56	1,10984	2,659E-04	100,0	58	0,56	1,10984	2,659E-04
				16	100,0	16	100,0	16	100,0	16	100,0	16	100,0	58	0,56	1,10984	2,659E-04	100,0	58	0,56	1,10984	2,659E-04
				16	100,0	16	100,0	16	100,0	16	100,0	16	100,0	58	0,56	1,10984	2,659E-04	100,0	58	0,56	1,10984	2,659E-04
				16	100,0	16	100,0	16	100,0	16	100,0	16	100,0	58	0,56	1,10984	2,659E-04	100,0	58	0,56	1,10984	2,659E-04
				16	100,0	16	100,0	16	100,0	16	100,0	16	100,0	58	0,56	1,10984	2,659E-04	100,0	58	0,56	1,10984	2,659E-04
				16	100,0	16	100,0	16	100,0	16	100,0	16	100,0	58	0,56	1,10984	2,659E-04	100,0	58	0,56	1,10984	2,659E-04
				16	100,0	16	100,0	16	100,0	16	100,0	16	100,0	58	0,56	1,10984	2,659E-04	100,0	58	0,56	1,10984	2,659E-04
				16	100,0	16	100,0	16	100,0	16	100,0	16	100,0	58	0,56	1,10984	2,659E-04	100,0	58	0,56	1,10984	2,659E-04
				16	100,0	16	100,0	16	100,0	16	100,0	16	100,0	58	0,56	1,10984	2,659E-04	100,0	58	0,56	1,10984	2,659E-04
				16	100,0	16	100,0	16	100,0	16	100,0	16	100,0	58	0,56	1,10984	2,659E-04	100,0	58	0,56	1,10984	2,659E-04
				16	100,0	16	100,0	16	100,0	16	100,0	16	100,0	58	0,56	1,10984	2,659E-04	100,0	58	0,56	1,10984	2,659E-04
				16	100,0	16	100,0	16	100,0	16	100,0	16	100,0	58	0,56	1,10984	2,659E-04	100,0	58	0,56	1,10984	2,659E-04
				16	100,0	16	100,0	16	100,0	16	100,0	16	100,0	58	0,56	1,10984	2,659E-04	100,0	58	0,56	1,10984	2,659E-04
				16	100,0	16	100,0	16	100,0	16	100,0	16	100,0	58	0,56	1,10984	2,659E-04	100,0	58	0,56	1,10984	2,659E-04
				16	100,0	16	100,0	16	100,0	16	100,0	16	100,0	58	0,56	1,10984	2,659E-04	100,0	58	0,56	1,10984	2,659E-04
				16	100,0	16	100,0	16	100,0	16	100,0	16	100,0	58	0,56	1,10984	2,659E-04	100,0	58	0,56	1,10984	2,659E-04
				16	100,0	16	100,0	16	100,0	16	100,0	16	100,0	58	0,56	1,10984	2,659E-04	100,0	58	0,56	1,10984	2,659E-04
				16	100,0	16	100,0	16	100,0	16	100,0	16	100,0	58	0,56	1,10984	2,659E-04	100,0	58	0,56	1,10984	2,659E-04
				16	100,0	16	100,0	16	100,0	16	100,0	16	100,0	58	0,56	1,10984	2,659E-04	100,0	58	0,56	1,10984	2,659E-04
				16	100,0	16	100,0	16	100,0	16	100,0	16	100,0	58	0,56	1,10984	2,659E-04	100,0	58	0,56	1,10984	2,659E-04
				16	100,0	16	100,0	16	100,0	16	100,0	16	100,0	58	0,56	1,10984	2,659E-04	100,0	58	0,56	1,10984	2,659E-04
				16	100,0	16	100,0	16	100,0	16	100,0	16	100,0	58	0,56	1,10984	2,659E-04	100,0	58	0,56	1,10984	2,659E-04
				16	100,0	16	100,0	16	100,0	16	100,0	16	100,0	58	0,56	1,10984	2,659E-04	100,0	58	0,56	1,10984	2,659E-04
				16	100,0	16	100,0	16	100,0	16	100,0	16	100,0	58	0,56	1,10984	2,659E-04	100,0	58	0,56	1,10984	2,659E-04
				16	100,0	16	100,0	16	100,0	16	100,0	16	100,0	58	0,56	1,10984	2,659E-04	100,0	58	0,56	1,10984	2,659E-04
				16	100,0	16	100,0	16	100,0	16	100,0	16	100,0	58	0,56	1,10984	2,659E-04	100,0	58	0,56	1,10984	2,659E-04
				16	100,0	16	100,0	16	100,0	16	100,0	16	100,0	58	0,56	1,10984	2,659E-04	100,0	58	0,56	1,10984	2,659E-04
				16	100,0	16	100,0	16	100,0	16	100,0	16	100,0	58	0,56	1,10984	2,659E-04	100,0	58	0,56	1,10984	2,659E-04
				16	100,0	16	100,0	16	100,0	16	100,0	16	100,0	58	0,56	1,10984	2,659E-04	100,0	58	0,56	1,10984	2,659E-04
				16	100,0	16	100,0	16	100,0	16	100,0	16	100,0	58	0,56	1,10984	2,659E-04	100,0	58	0,56	1,10984	2,659E-04
				16	100,0	16	100,0	16	100,0	16	100,0	16	100,0	58	0,56	1,10984	2,659E-04	100,0	58	0,56	1,10984	2,659E-04
				16	100,0	16	100,0	16	100,0	16	100,0	16	100,0	58	0,56	1,10984	2,659E-04	100,0	58	0,56	1,10984	2,659E-04
				16	100,0	16	100,0	16	100,0	16	100,0	16	100,0	58	0,56	1,10984	2,659E-04	100,0	58	0,56	1,10984	2,659E-04
				16	100,0	16	100,0	16	100,0	16	100,0	16	100,0	58	0,56	1,10984	2,659E-04	100,0	58	0,56	1,10984	2,659E-04
				16	100,0	16	100,0	16	100,0	16	100,0	16										

von 2,213 g/cm³, was der geplanten Betonzusammensetzung (BC75n) mit einem Wasservolumenanteil von 120 l/m³ und einem Bormassenanteil von 1000 ppm entspricht.

Betonmatrix mit variablem Wassergehalt	Modell Nummer	BC002n	BC71n	BC72n	BC73n	BC74n	BC75n	BC76n	BC77n	BC78n	BC79n	
	Colemanit-Masse [kg]	18,778	18,700	18,643	18,586	18,528	18,470	18,413	18,355	18,240	18,125	
	Bor-Masse [kg]	2,250	2,240	2,233	2,227	2,220	2,213	2,206	2,199	2,185	2,171	
	Bor-Massenant. [ppm]	1000,010	1000,007	1000,011	1000,035	1000,010	1000,010	1000,007	1000,001	1000,011	1000,011	
	Dichte [g/cm ³]	2,251	2,241	2,234	2,227	2,221	2,214	2,207	2,200	2,186	2,172	
Wasser-Masse [kg]	93,2	100,0	105,0	110,0	115,0	120,0	125,0	130,0	140,0	150,0		
Nuklid	Z	A	Massenant.									
H	1	1,008	0,0045011	0,0048580	0,0051220	0,0053877	0,0056548	0,0059240	0,0061947	0,0064668	0,0070167	0,0075738
B	5	10,81	0,0010000	0,0010000	0,0010000	0,0010000	0,0010000	0,0010000	0,0010000	0,0010000	0,0010000	0,0010000
O	8	16	0,5105387	0,5118019	0,5127367	0,5136773	0,5146229	0,5155761	0,5165344	0,5174978	0,5194446	0,5214169
Na	11	22,99	0,0115584	0,0115194	0,0114906	0,0114615	0,0114323	0,0114029	0,0113733	0,0113435	0,0112834	0,0112225
Mg	12	24,31	0,0040001	0,0039870	0,0039772	0,0039674	0,0039575	0,0039475	0,0039375	0,0039275	0,0039071	0,0038865
Al	13	26,98	0,0354449	0,0353254	0,0352369	0,0351479	0,0350585	0,0349683	0,0348777	0,0347865	0,0346023	0,0344158
Si	14	28,09	0,3579341	0,3567266	0,3558329	0,3549337	0,3540299	0,3531188	0,3522027	0,3512818	0,3494209	0,3475354
S	16	32,06	0,0000093	0,0000093	0,0000093	0,0000093	0,0000093	0,0000093	0,0000093	0,0000093	0,0000093	0,0000093
K	19	39,1	0,0142894	0,0142413	0,0142057	0,0141699	0,0141338	0,0140975	0,0140610	0,0140244	0,0139502	0,0138751
Ca	20	40,08	0,0447400	0,0445935	0,0444851	0,0443760	0,0442663	0,0441557	0,0440446	0,0439328	0,0437070	0,0434782
Fe	26	55,85	0,0137034	0,0136572	0,0136230	0,0135887	0,0135541	0,0135193	0,0134842	0,0134490	0,0133779	0,0133058
As	33	74,92	0,0022070	0,0022070	0,0022070	0,0022070	0,0022070	0,0022070	0,0022070	0,0022070	0,0022070	0,0022070
Sr	38	87,62	0,0000735	0,0000735	0,0000735	0,0000735	0,0000735	0,0000735	0,0000735	0,0000735	0,0000735	0,0000735

*) Mixture BC75n entspricht der erforderlichen Zusammensetzung des Borbetons der Torushallenwände /U 2/

Tab. 3.11 Mixturen für den Borbeton der Torushallenwände /U 2/ zur Variation des Wassergehalts

Die Tabelle 3.11 enthält die erforderlichen Betonmixturen für die Ermittlung der Abschirmwirkung der Torushallenwände unter Variation des Wasservolumenanteils (100 ... 150 l/m³) bei konstantem Bormassenanteil von 1000 ppm. Die Massenanteile der Nuklide gingen entsprechend Tabelle in die ausgewählten Modelle W7XB350 ... W7XB356 sowie bei W7XB35M als Model mit geplanter Zusammensetzung in die MC-Simulationen ein.

Betonmatrix mit variablem Borgehalt	Modell Nummer	BC001n	BC101n	BC102n	BC10n	BC20n	BC30n	BC40n	BC50n	BC60n	BC70n	BC80n	BC90n	BC100n	
	Colemanit-Masse [kg]	0,000	1,846	3,692	7,385	9,232	11,079	12,926	14,774	16,622	20,318	40,668	92,612	185,884	
	Bor-Masse [kg]	0,000	0,221	0,442	0,885	1,106	1,327	1,549	1,770	1,991	2,434	4,872	11,095	22,269	
	Bor-Massenant. [ppm]	0,012	100,009	200,010	400,008	500,006	600,005	700,010	800,001	900,000	1100,001	2200,004	5000,000	10000,002	
	Dichte [g/cm ³]	2,212	2,212	2,212	2,213	2,213	2,213	2,213	2,213	2,213	2,214	2,215	2,220	2,228	
Wasser-Masse [kg]	120,0	120,0	120,0	120,0	120,0	120,0	120,0	120,0	120,0	120,0	120,0	120,0	120,0		
Nuklid	Z	A	Massenant.												
H	1	1,008	0,0060302	0,0060200	0,0060089	0,0059875	0,0059769	0,0059664	0,0059555	0,0059453	0,0059344	0,0059134	0,0057966	0,0054994	0,0049689
B	5	10,81	0,0000000	0,0001000	0,0002000	0,0004000	0,0005000	0,0006000	0,0007000	0,0008000	0,0009000	0,0011000	0,0022000	0,0050000	0,0100000
O	8	16	0,5168700	0,5167422	0,5166109	0,5163517	0,5162222	0,5160935	0,5159630	0,5158352	0,5157048	0,5154466	0,5140236	0,5104009	0,5039330
Na	11	22,99	0,0114879	0,0114794	0,0114709	0,0114539	0,0114454	0,0114369	0,0114284	0,0114199	0,0114114	0,0113944	0,0113008	0,0110626	0,0106373
Mg	12	24,31	0,0038849	0,0038912	0,0038975	0,0039100	0,0039162	0,0039225	0,0039288	0,0039350	0,0039413	0,0039538	0,0040227	0,0041980	0,0045111
Al	13	26,98	0,0351948	0,0351720	0,0351495	0,0351043	0,0350816	0,0350589	0,0350364	0,0350136	0,0349910	0,0349457	0,0346966	0,0340625	0,0329301
Si	14	28,09	0,3556169	0,3553657	0,3551177	0,3546184	0,3543687	0,3541183	0,3538694	0,3536181	0,3533693	0,3528691	0,3501208	0,3431256	0,3306331
S	16	32,06	0,0000000	0,0000009	0,0000019	0,0000037	0,0000047	0,0000056	0,0000065	0,0000075	0,0000084	0,0000103	0,0000206	0,0000467	0,0000935
K	19	39,1	0,0141675	0,0141605	0,0141535	0,0141396	0,0141326	0,0141255	0,0141186	0,0141115	0,0141046	0,0140906	0,0140136	0,0138176	0,0134677
Ca	20	40,08	0,0431525	0,0432527	0,0433532	0,0435539	0,0436542	0,0437545	0,0438549	0,0439550	0,0440555	0,0442560	0,0453595	0,0481684	0,0531842
Fe	26	55,85	0,0135951	0,0135875	0,0135800	0,0135648	0,0135572	0,0135496	0,0135421	0,0135344	0,0135269	0,0135117	0,0134282	0,0132158	0,0128365
As	33	74,92	0,0000000	0,0002207	0,0004414	0,0008828	0,0011035	0,0013242	0,0015449	0,0017656	0,0019863	0,0024277	0,0048554	0,0110350	0,0220700
Sr	38	87,62	0,0000000	0,0000073	0,0000147	0,0000294	0,0000367	0,0000441	0,0000514	0,0000588	0,0000661	0,0000808	0,0001616	0,0003673	0,0007346

Tab. 3.12 Mixturen für den Borbeton der Torushallenwände /U 2

Die Tabelle 3.12 enthält die erforderlichen Betonmixturen für die Ermittlung der Abschirmwirkung der Torushallenwände unter Variation des Bormassenanteils (0 ... 10000 ppm) bei konstantem Wasservolumenanteil von 120 l/m³. Die Massenanteile der Nuklide gingen entsprechend Tabelle in die ausgewählten Modelle W7XB340 ... W7XB34A sowie

bei Modell W7XB34M (analog zu M7XB35M) in die MC-Simulationen ein. Mit diesen Modellen, die sich ausschließlich in der Zusammensetzung des Borbetons der Torushallenwände unterscheiden, ergeben sich die folgenden Abhängigkeiten hinsichtlich der Abschirmwirkung der relevanten Torushallenwände (Nordwand, Ostwand, Decke).

Variation der Wassergehalts

Mit den Mixturen für den Borbeton aus Tabelle 3.11 ergibt sich die Abhängigkeit der Abschirmwirkung vom Wassergehalt im Beton der Torushallenwände, die Berechnungen zur Dosisleistung unmittelbar hinter der jeweiligen Wand (Nord, Ost, Decke) sind in der Abb. 3.13 abgebildet.

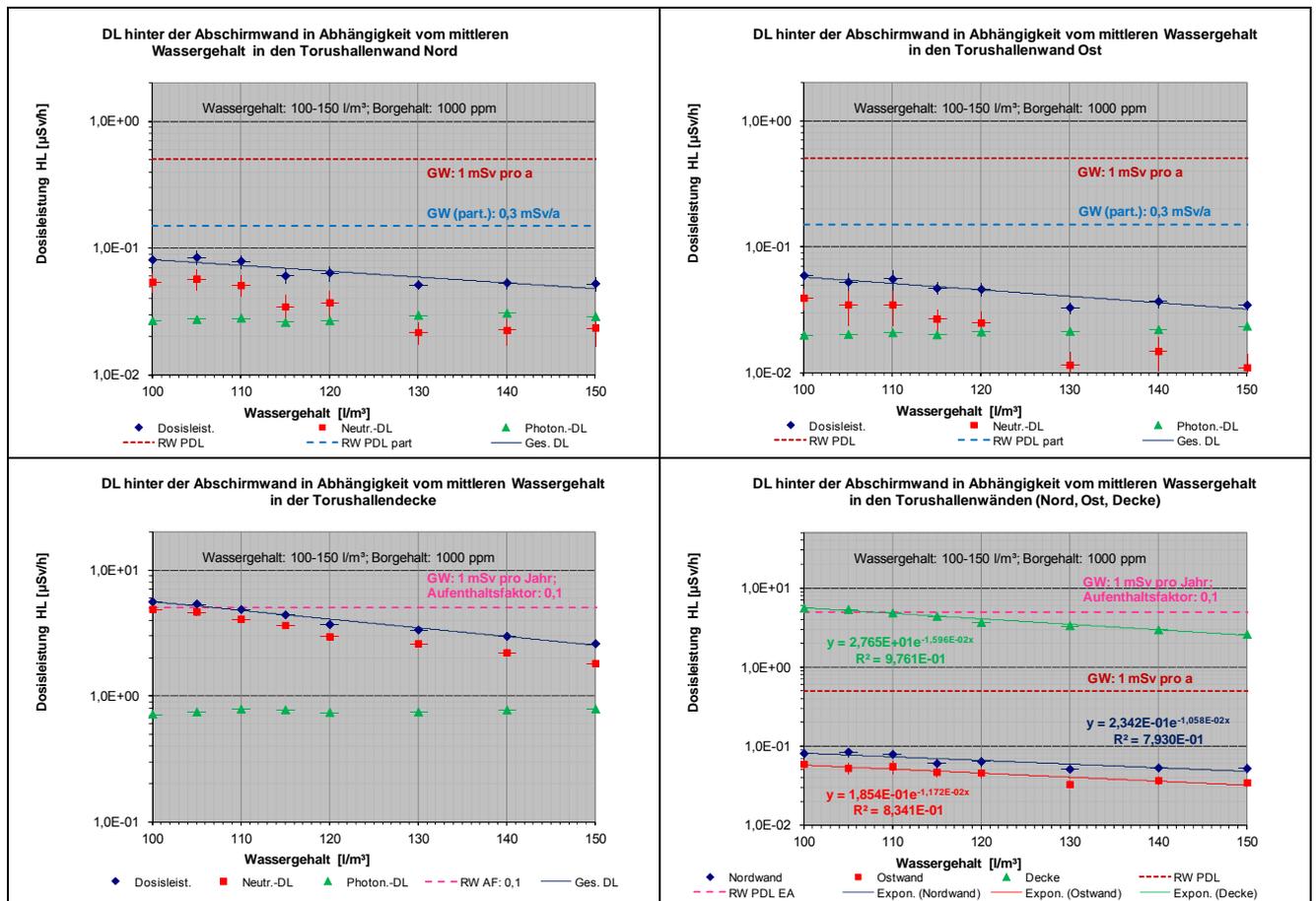


Abb. 3.13 Dosisleistung (Neutronen, Photonen, Gesamt) hinter der jeweiligen Abschirmwand in Abhängigkeit vom Wassergehalt im Borbeton (Borgehalt: 1000 ppm) a) Nordwand (li. oben); b) Ostwand (re. oben); c) Torushallendecke (li. unten) d) Gesamtdosis für alle drei Abschirmwände (re. unten)

Aus den Abbildungen 3.13 a) und b) wird deutlich, dass im gesamten Wertebereich (100 ... 150 l/m³) die ermittelte Dosisleistung in den angrenzenden Räumen hinter der Nordwand bzw. der Ostwand und damit auch der Jahreswert für die effektive Dosis (2000 h

pro Jahr) deutlich unter dem Grenzwert nach § 46 StrlSchV /R 1/ von 1 mSv pro Kalenderjahr für die Bevölkerung liegt. Selbst wenn man nach § 47 StrlSchV Ableitungen radioaktiver Stoffe mit dem Luft- und Wasserpfad konzidieren würde und damit für die effektive Dosis der Direktstrahlung nur einen Wert von 0,3 mSv ansetzt, liegen für die Nord- bzw. Ostwand die Werte der effektiven Dosis deutlich unter dem angenommenen Wert von 0,3 mSv pro Kalenderjahr. Bei der Abhängigkeit der Dosisleistung vom Wassergehalt zeigt sich bei der Nord- bzw. Ostwand, dass im Bereich von ca. 120... 130 l/m³ die Photonenstrahlung gegenüber der Neutronenstrahlung dominierend wird. Dieser Effekt ist auch sehr gut aus den Darstellungen in Abb. 3.14 zu entnehmen, in denen direkt die absoluten bzw. prozentualen Anteile der beiden Strahlungskomponenten an der gesamten Dosisleistung miteinander verglichen werden. Im Wesentlichen ist die Photonen-dosisleistung vom Wassergehalt im Borbeton unabhängig, die Neutronendosisleistung sinkt mit steigendem Wassergehalt (100 ... 150 l/m³) um fast eine Größenordnung.

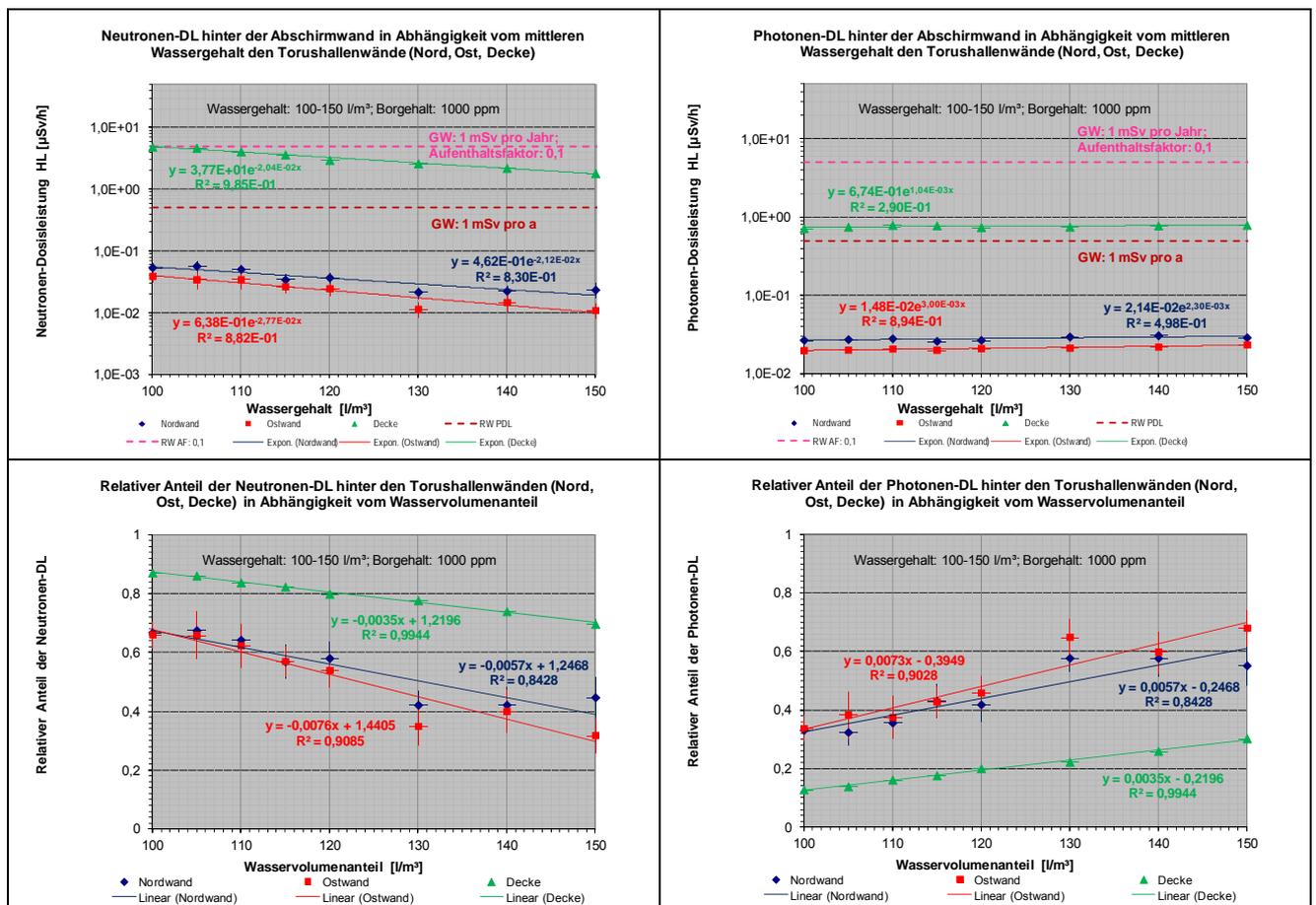
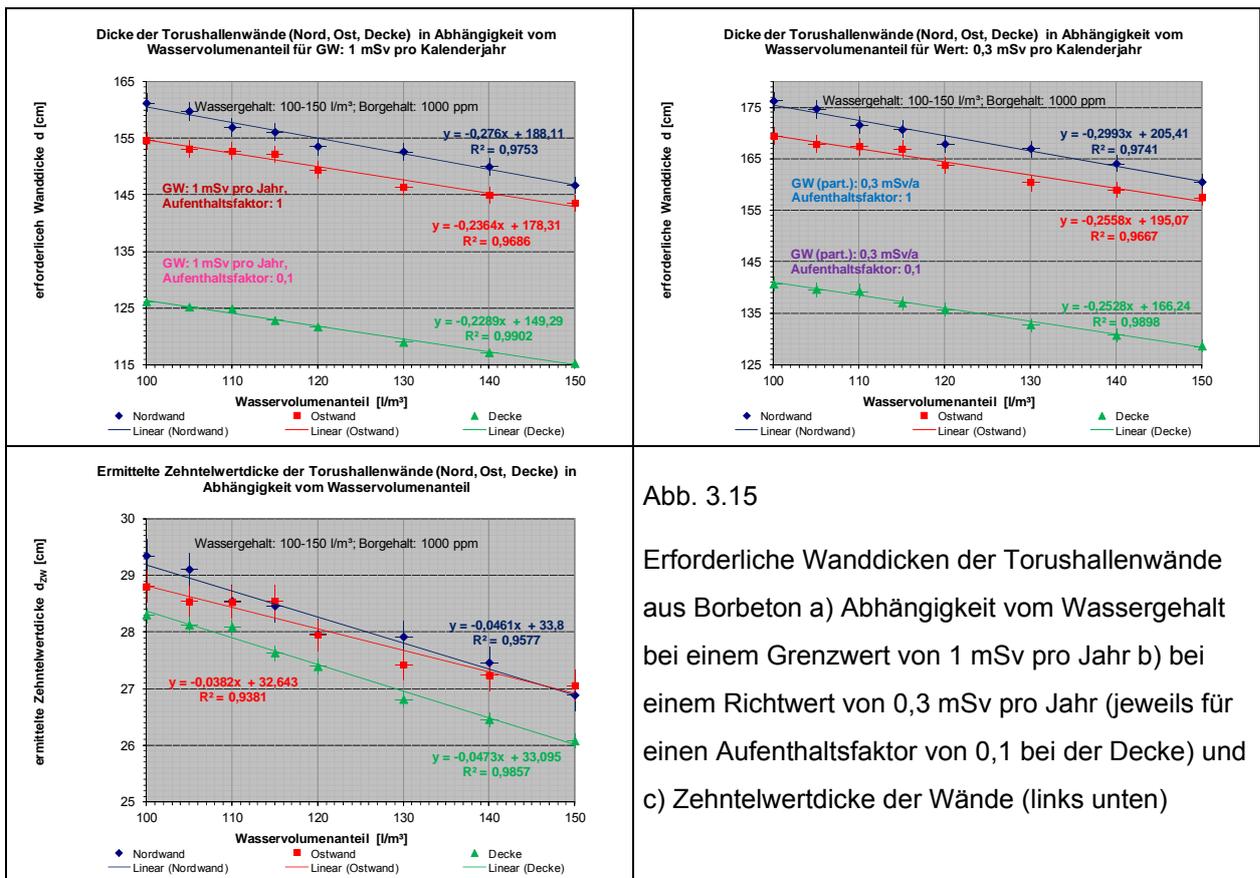


Abb. 3.14 Dosisleistung hinter der jeweiligen Abschirmwand in Abhängigkeit vom Wassergehalt im Borbeton (Borgehalt: 1000 ppm) a) Neutronen-DL (li. oben); b) Photonen-DL (re. oben); c) relativer Anteil der Neutronen-DL (li. unten) d) relativer Anteil der Photonen-DL (re. unten)

Bezüglich der Torushallendecke zeigt sich in den Abb. 3.13 und 3.14, dass die gesamte Dosisleistung, welche von der Neutronendosisleistung deutlich dominiert wird, über einem Wassergehalt im Borbeton von 110 l/m^3 unter dem Grenzwert nach § 46 StrlSchV / R 1/ von 1 mSv pro Kalenderjahr für die Bevölkerung liegt, wenn man einen Aufenthaltsfaktor von $0,1$ (200 h pro Jahr) annimmt. Damit sind bei einem geplanten Wassergehalt von mindestens 120 l/m^3 und einem Borgehalt von 1000 ppm die Torushallenwände und die Decke ausreichend dimensioniert, um der Bevölkerung und der Umwelt ausreichend Schutz vor Strahlenexposition zu geben.

Weil kein kontinuierlicher Betrieb des Stellarators mit einem Deuteriumplasma vorgesehen ist und somit eine mittlere Dosisleistung in der betrachteten Weise nicht zu erwarten ist, empfehlen wir, die Torushallendecke während des Experimentierbetriebs mit einem Deuteriumplasma als abgesperrten Bereich zu deklarieren (E 3.3/1). Das angestrebte Betriebsregime des IPP schließt die Begehung der Hallendecke explizit aus.



Aus den Abb. 3.15 a) und b) lässt sich unmittelbar die für die gewählten Betonparameter (Borgehalt: 1000 ppm und Wasservolumenanteil aufgetragen auf der x-Achse) erforderliche Wanddicke entnehmen, um den gesetzlich vorgeschriebenen Grenzwert nach

StrlSch /R 1/ zu unterschreiten. Diese beiden Darstellungen beziehen sich auf die reale Geometrie, somit ergeben sich aufgrund der unterschiedlichen Abstände der Neutronenquelle im Wendelstein 7-X von der Nord- bzw. Ostwand auch unterschiedliche Abhängigkeiten. Weil die Nordwand der Neutronenquelle im Mittel etwas näher liegt, sind die erforderlichen Wanddicken für die Nordwand größer als für die Ostwand. Die ermittelten Wanddicken in Abb. 3.15 a) beziehen sich auf den Grenzwert von 1 mSv pro Kalenderjahr nach § 46 StrlSchV (bei Aufenthaltsfaktor 1 für die Wände und 0,1 für die Decke), bei Abb. 3.15 b) beziehen sie sich auf den Wert 0,3 mSv nach § 47 StrlSchV, wenn man Ableitungen radioaktiver Stoffen berücksichtigen muss. Aus der linken Abbildung ist zu entnehmen, dass im betrachteten Wertebereich ($100 \dots 150 \text{ l/m}^3$) die erforderliche Wanddicke im Intervall 141-161 cm (Nordwand) und 143-155 cm (Ostwand) liegen muss, um den gesetzlich vorgeschriebenen Grenzwert einzuhalten. Bei der Decke ist eine Betondicke von 115-126 cm erforderlich, um bei einem Aufenthaltsfaktor von 0,1 den Grenzwert nach StrlSchV /R 1/ einzuhalten. Analoge Ergebnisse liefert die Abb. 3.15 b) für den Dosiswert von 0,3 mSv pro Kalenderjahr.

Aus Abb. 3.15 c) kann man die Zehntelwertdicke für die jeweilige Abschirmwand entnehmen, die eine reine Materialgröße ist und keine Abstandsabhängigkeit aufweist. Trotz der geringen Unterschiede, resultierend aus statistischen Unsicherheiten, beschreiben die Kurven für die Nord- und Ostwand den Verlauf recht genau und liefern mit Zehntelwertdicken von 27 ... 29,5 cm (Nord- und Ostwand) bzw. 26 ... 28,3 cm (Decke) sehr plausible Ergebnisse.

Die dargestellten Berechnungsergebnisse reproduzieren die Abhängigkeit der Dosisleistung, der Wanddicken und der Zehntelwertdicke vom Wassergehalt im Borbeton der Torushallenwände sehr gut. Die Neutronendosisleistung sinkt merklich mit steigendem Wassergehalt im Beton, das gilt folglich ebenso für die erforderliche Wanddicke der Torushalle und die Zehntelwertdicke.

Variation der Borgehalts

Mit den Mixturen für den Borbeton aus Tabelle 3.12 ergibt sich die Abhängigkeit der Abschirmwirkung vom Borgehalt im Beton der Torushallenwände. Die Berechnungen zur Dosisleistung unmittelbar hinter der jeweiligen Wand (Nord, Ost, Decke) sind in der Abb. 3.16 abgebildet.

Aus den Abbildungen 3.16 a) und b) wird deutlich, dass im gesamten Wertebereich (0 ... 10000 ppm) die ermittelten Dosisleistungen in den angrenzenden Räumen hinter der Nordwand bzw. der Ostwand und somit auch der Jahreswert für die effektive Dosis (2000 h pro Jahr) deutlich unter dem Grenzwert nach § 46 StrlSchV /R 1/ von 1 mSv pro Kalenderjahr für die Bevölkerung und Umwelt liegt.

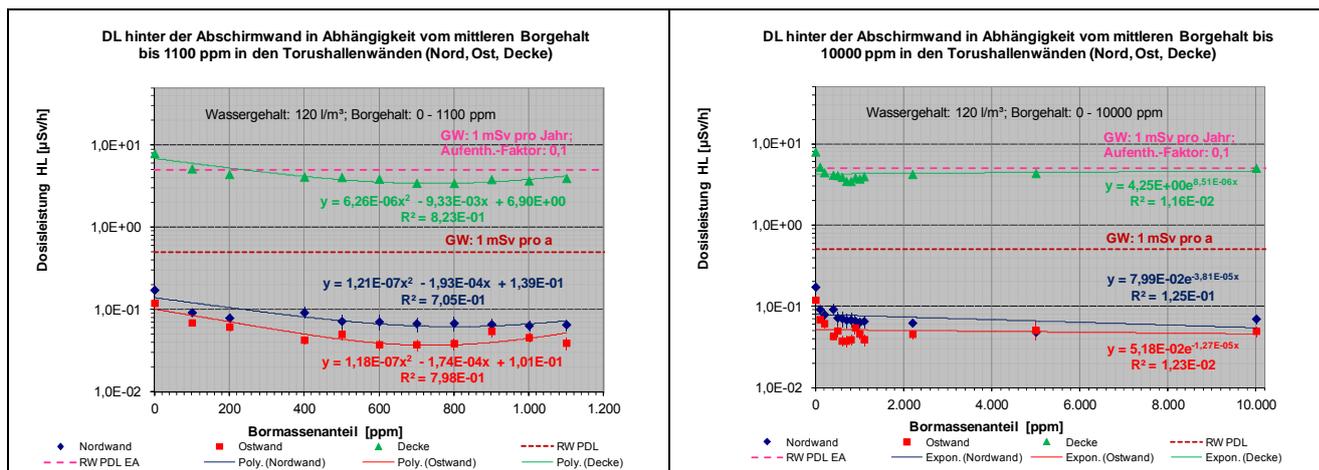


Abb. 3.16 Dosisleistung (Nordwand, Ostwand, Decke) in Abhängigkeit vom Borgehalt im Beton (Wassergehalt: 120 l/m³) a) Borgehalt 0 – 1100 ppm (links); b) Borgehalt bis 10000 ppm (rechts)

Bei der Abhängigkeit der Dosisleistung vom Bormassenanteil zeigt sich bei der Nord- und Ostwand, dass im Bereich von ca. 400... 1100 ppm die Dosisleistung im Rahmen der statistischen Unsicherheit als nahezu konstant, d. h. unabhängig vom Borgehalt im Beton angesehen werden kann. Grundsätzlich kann man diese Einschätzung entsprechend Abb. 3.16 b) auch für den Bereich bis 10000 ppm treffen, obwohl diese für die Torushallenwände nicht relevant ist.

Nach Abb. 3.17 a) ist die Neutronendosisleistung im Wesentlichen unabhängig vom Bormassenanteil im Normalbeton, die Photonendosisleistung sinkt mit steigendem Borgehalt im Wertebereich von 0 400 ppm etwa um den Faktor 5 (Abb. 3.17 b). Bei größeren Borgehalten (> 400 ppm) in den Torushallenwänden ist die Photonendosisleistung konstant und liegt etwa in der gleichen Größenordnung wie die Neutronendosisleistung, was man den Abb. 3.17 c) und d) trotz größerer statistischer Unsicherheiten recht klar entnehmen kann.

Bezüglich der Torushallendecke zeigt sich in den Abb. 3.16 und 3.17, dass die gesamte Dosisleistung, welche geringfügig von der Neutronendosisleistung dominiert wird, bei einem Borgehalt im Normalbeton von mehr als 200 ppm unter dem Grenzwert nach § 46

StrlSchV /R 1/ von 1 mSv pro Kalenderjahr für die Bevölkerung liegt, wenn man einen Aufenthaltsfaktor von 0,1 (200 h pro Jahr) annimmt. Damit sind bei einem geplanten Borgehalt von mindestens 1000 ppm und einem Wassergehalt von 120 l/m³ die Torushallenwände und die Decke ausreichend dimensioniert, um der Bevölkerung und der Umwelt ausreichend Schutz vor Strahlenexposition zu geben.

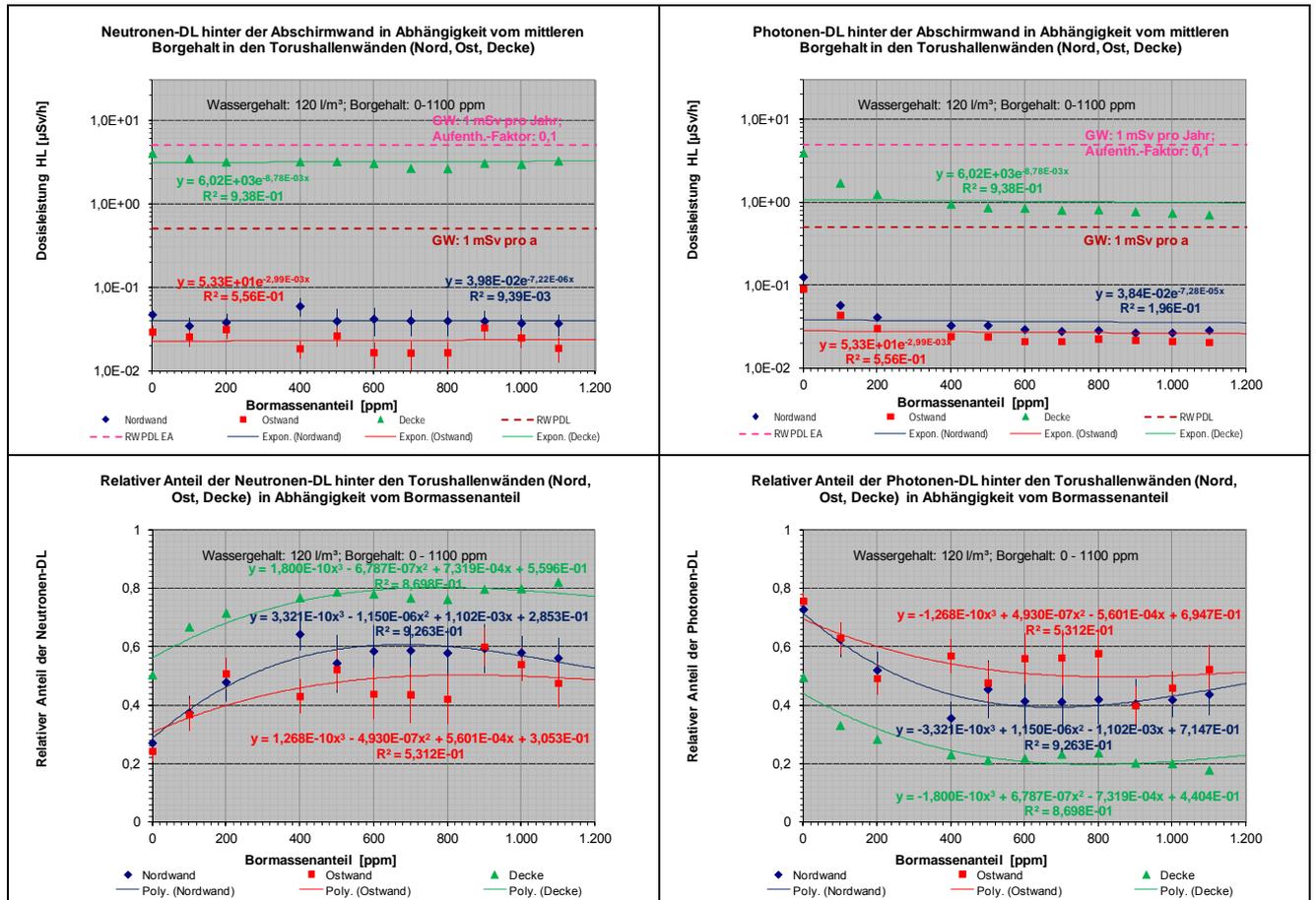


Abb. 3.17 Dosisleistung hinter der jeweiligen Abschirmwand in Abhängigkeit vom Bormassenanteil im Beton (Wassergehalt: 120 l/m³) a) Neutronen-DL (li. oben); b) Photonen-DL (re. oben); c) relativer Anteil der Neutronen-DL (li. unten) d) relativer Anteil der Photonen-DL (re. unten)

Da jedoch kein kontinuierlicher Betrieb des Stellarators mit einem Deuteriumplasma vorgesehen ist und somit keine mittlere Dosisleistung in der betrachteten Weise zu erwarten ist, verweisen wir hier analog auf unsere Empfehlung (E 3.3/1) in Anlage B. Das angestrebte Betriebsregime des IPP schließt die Begehung der Hallendecke explizit aus.

Aus den Abb. 3.18 a) bzw. b) lässt sich unmittelbar die für die gewählten Betonparameter (Wassergehalt: 120 l/m³ und Bormassenanteil aufgetragen auf der x-Achse) die erforderliche Wanddicke entnehmen, um den gesetzlich vorgeschriebenen Grenzwert nach

StrlSchV /R 1/ zu unterschreiten. Diese beiden Darstellungen beziehen sich auf die reale Geometrie, somit ergeben sich aufgrund der unterschiedlichen Abstände von Nord- und Ostwand zur Neutronenquelle im Wendesein 7-X auch unterschiedliche Abhängigkeiten. Weil die Nordwand der Neutronenquelle im Mittel etwas näher liegt, ist ihre erforderliche Wanddicke größer als die der Ostwand.

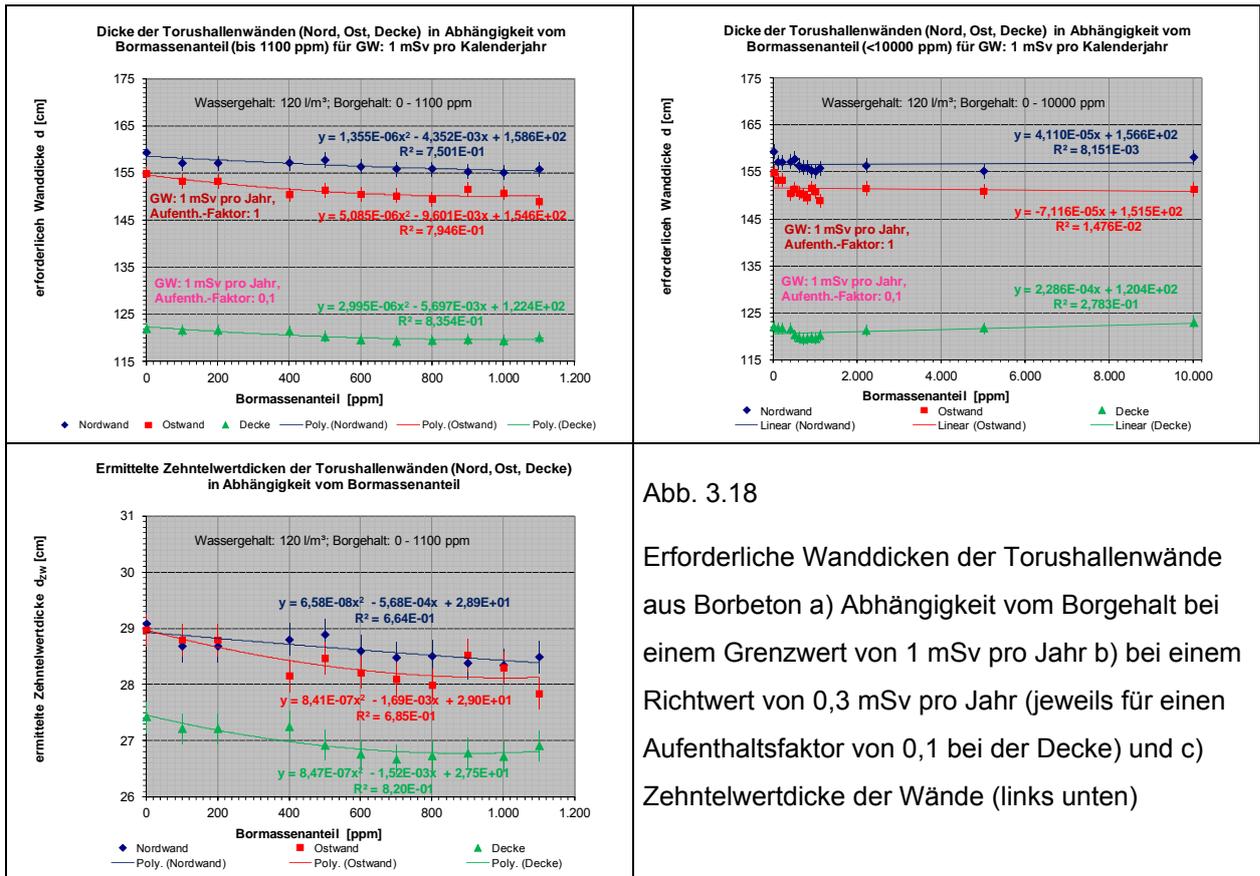


Abb. 3.18

Erforderliche Wanddicken der Torushallenwände aus Borbeton a) Abhängigkeit vom Borgehalt bei einem Grenzwert von 1 mSv pro Jahr b) bei einem Richtwert von 0,3 mSv pro Jahr (jeweils für einen Aufenthaltsfaktor von 0,1 bei der Decke) und c) Zehntelwertdicke der Wände (links unten)

Die ermittelten Wanddicken in Abb. 3.18 a) beziehen sich im Wertebereich 0 ... 1100 ppm auf den Grenzwert von 1 mSv pro Kalenderjahr nach § 46 StrlSchV (bei Aufenthaltsfaktor 1 bzw. 0,1 für die Decke). In Abb. 3.18 b) wurde der Bormassenanteil bis 10000 ppm variiert. Abb. 3.18 a) ist zu entnehmen, dass im betrachteten Wertebereich (0 ... 1100 ppm) die erforderliche Wanddicke im Intervall 155 - 160 cm (Nordwand) und 148 - 155 cm (Ostwand) liegen muss, um den gesetzlich vorgeschriebenen Grenzwert einzuhalten. Bei der Decke ist eine Betondicke von 119 - 120 cm erforderlich, um bei einem Aufenthaltsfaktor von 0,1 den Grenzwert nach StrlSchV /R 1/ einzuhalten. Analoge Ergebnisse liefert die Abb. 3.18 b) für einen Borgehalt bis 10000 ppm, die Wanddicke ist in diesem großen Bereich vom Bormassenanteil unabhängig.

Aus Abb. 3.18 c) kann man die Zehntelwertdicke für die jeweilige Abschirmwand entnehmen, die eine reine Materialgröße ist und keine Abstandsabhängigkeit aufweist. Trotz der geringen Unterschiede, resultierend aus statistischen Unsicherheiten, beschreiben die Kurven für die Nord- und Ostwand den Verlauf recht genau und liefern mit Zehntelwertdicken von 28 ... 29 cm (Nord- und Ostwand) bzw. 26,8 ... 27,4 cm (Decke) sehr plausible Ergebnisse.

Die dargestellten Berechnungsergebnisse reproduzieren die Abhängigkeit der Dosisleistung, der Wanddicken und der Zehntelwertdicke vom Borgehalt im Normalbeton der Torushallenwände sehr gut. Insbesondere in den für die Torushallenwände relevanten Bereichen sind diese Größen unabhängig vom Borgehalt. Damit wurde der Nachweis erbracht, dass bei einem geforderten Wert für den Bormassenanteil von 1000 ppm unerheblich ist, wenn der reale Wert des Borgehaltes im Normalbeton im Bereich von 400 ... 1100 ppm schwankt. Der Borgehalt im Normalbeton der Torushallenwände ist somit kein notwendiges Kriterium bei der Diskussion zum Abschirmverhalten der Strahlenschutzwände, da die Auswertung aller diesbezüglich analysierten Proben gezeigt hat, dass der Bormassenanteil im Beton der Torushallenwände fast immer größer als 1000 ppm, jedoch immer deutlich größer als 700 ppm ist. Der Borgehalt kann in allen Wänden der Torushalle als sicher ausreichend und abdeckend für den Strahlenschutz angesehen werden.

4 Halterungen und Risse

4.1 Halterungen

Zur Begutachtung der Halterungen im Sinne des baulichen Strahlenschutzes fand am 14.02.2013 eine Begehung im Max-Planck-Institut für Plasmaphysik (IPP), Wendelsteinstraße 1 in 17491 Greifswald, zum Projekt Wendelstein 7-X statt. Das Ziel dieser Begehung war es, die Halterungen mit den größten Dimensionen fotodokumentarisch zu erfassen und deren Verbindungen mit den Torushallenwänden aus der Sicht des baulichen Strahlenschutzes zu bewerten. Das Ergebnis der Begehung bezüglich der Halterungen wurde in einem Begehungsbericht /L 6/ aufgezeigt und der Aufsichtsbehörde mit der Stellungnahme /L 8/ vom 22.02.2013 mitgeteilt.

Die Halterungen mit den größten Dimensionen wurden bei der Begehung am Rackregal, am Laufsteg sowie an der Traverse in der Torushalle vorgefunden und fotodokumentarisch erfasst (siehe Abb. 4.1 – Abb. 4.3).



Abb. 4.1 a, b) Laufsteg an Torushallenwand SÜD (li.), Halterung Laufsteg (re.)



Abb. 4.2 a, b) Rackregal an Torushallenwand OST (li.), Halterung Rackregal (re.)



Abb. 4.3 a, b) Halterungen der Traverse (Hilfskonstruktion) an Torushallenwand OST (li./re.)

Bewertungsmaßstäbe

Um die Verbindung der Halterungen mit den Torushallenwänden aus der Sicht des baulichen Strahlenschutzes entsprechend bewerten zu können, wurden neben den allgemeinen Strahlenschutzgrundsätzen §§ 4-6 StrlSchV /R 1/ die DIN EN 1992-1-1 /R 8/ und die DIN EN 1992-1-1/NA /R 9/ herangezogen.

Wertung

Entsprechend der Stellungnahme /L 8/ vom 22.02.2013 wird die Anbringung der Halterungen an die Torushallenwände aus der Sicht des Strahlenschutzes als fachgerecht eingeschätzt. Eine Reduzierung der Abschirmwirkung der Strahlenschutzwände ist auszuschließen. Es wurden keine Mängel festgestellt.

4.2 Risse

Bei der Baubesprechung am 28.07.1998 im Max-Planck-Institut für Plasmaphysik (IPP) wurde laut Besprechungsprotokoll /U 35/ festgestellt, dass sich an der Torusdecke ober- und unterseitig Risse gebildet haben. Mit der Stellungnahme zu den Rissen an der Decke der Torushalle /U 37/ vom 30.07.1998 wurde ausgeführt, dass laut den Planungsvorgaben des Nutzers die Rissweiten $< 0,25$ mm sein sollen. Es wurde ferner festgehalten, dass die Mindestbewehrung an der Torusdecke für eine Rissweite von 0,25 mm ausgelegt wurde. Außerdem wurde das Rissbild dargestellt. Das Rissbild wies dabei drei Arten von Rissen auf:

- Diagonale Trennrisse an den Ecken
- Biegerisse - diagonal von den Ecken zum Mittelpunkt
- Setzrisse

In der Stellungnahme /U 37/ wurde weiterhin festgestellt, dass die diagonalen Trennrisse an den Ecken und die Biegerisse - diagonal von den Ecken zum Mittelpunkt - aus statischer Sicht unbedenklich sind und daher nicht saniert werden müssen. Zu den Setzrissen wurde ausgesagt, dass sie Korrosionen des Betonstahls hervorrufen können und daher saniert werden müssen.

Mit dem Schreiben der ARGE Rohbau IPP Wendelstein /U 36/ vom 08.09.1998 wird die Durchführung der fachgerechten Sanierung der Setzrisse auf der Deckenoberseite bestätigt.

Zur Begutachtung der Risse im Sinne des baulichen Strahlenschutzes fand am 14.02.2013 eine Begehung im Max-Planck-Institut für Plasmaphysik (IPP) statt. Das Ziel dieser Begehung war es, die Risse an der Deckenunterseite fotodokumentarisch zu erfassen und aus der Sicht des baulichen Strahlenschutzes zu bewerten. Das Ergebnis der Begehung bezüglich der Risse wurde in einem Begehungsbericht /L 6/ aufgezeigt und der Aufsichtsbehörde mit der Stellungnahme /L 8/ vom 22.02.2013 mitgeteilt.

In Abb. 4.4 ist die Deckenunterseite der Torushalle, Ecke SÜD-/OST-Wand und Ecke NORD-/WEST-Wand, dargestellt.



Abb. 4.4 a, b) Torushalle, Ecke SÜD-/OST-Wand, sanierter Riss an Decke in Richtung Torusmitte (li.), Torushalle Ecke NORD-/WEST-Wand, Rissfreiheit der Toruswand WEST in Richtung Torusmitte (re.)

Bewertungsmaßstäbe

Als Bewertungsmaßstab wurde die Stellungnahme zu den Rissen an der Decke der Torushalle /U 37/ vom 30.07.1998 und die darin enthaltene Aussage, dass laut den Vorgaben des Nutzers für die Planung die Rissweiten $< 0,25$ mm sein sollen, herangezogen.

Wertung

Bei der Begehung mit Begehungsbericht /L 6/ vom 14.02.2013 wurden keine Risse vorgefunden. Entsprechend der Stellungnahme /L 8/ vom 22.02.2013 wird die durchgeführte Sanierung der Risse aus der Sicht des Strahlenschutzes als fachgerecht eingeschätzt.

5 Wandsdurchbrüche

Das IPP beschrieb und bewertete alle Wandsdurchbrüche in einer Zusammenstellung vom 18.12.2012 /U 32/. Neben den großen Wandsdurchbrüchen, welche ECRH-, ICRH-, Kryo- und Kabelkanal sind, gibt es Bohrungen, um speziellen Diagnostiken, die sich außerhalb der Torushalle befinden, einen Zugang zum Wendelstein 7-X-Experiment zu ermöglichen. Ziel ist es, für diese Wandsdurchbrüche geeignete Abschirmmaßnahmen oder organisatorische Lösungen zu finden, um die Einhaltung des Grenzwertes von 1 mSv pro Kalenderjahr für die Bevölkerung nach § 46 StrlSchV /R 1/ zu gewährleisten.

In den Abbildungen 5.1 – 5.4 sind alle Wandsdurchbrüche der Torushalle vom 2.UG bis zum 2. OG dargestellt. Die einzelnen Bilder wurden dabei der Zusammenstellung des IPP vom 18.12.2012 /U 32/ entnommen.

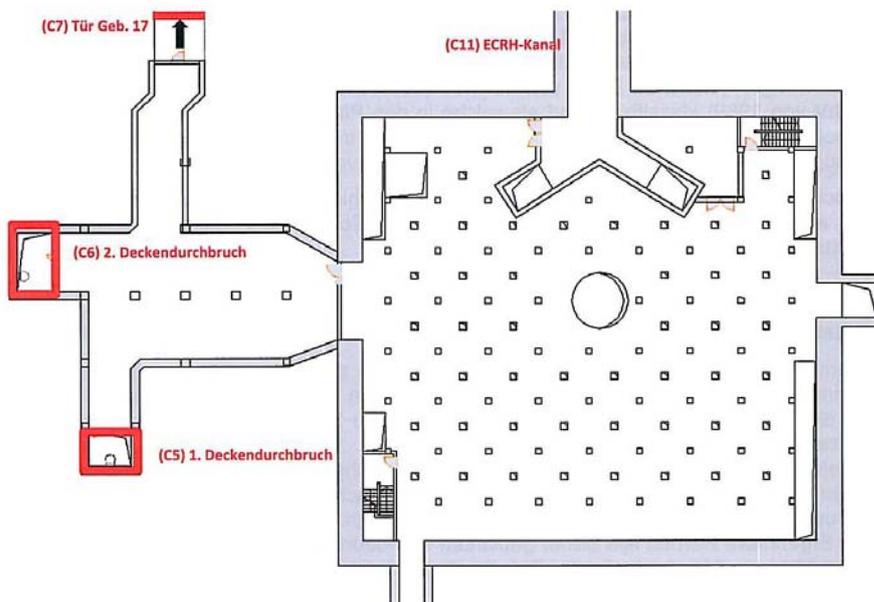


Abb. 5.1 Torushalle 2. UG mit Wandsdurchbrüchen

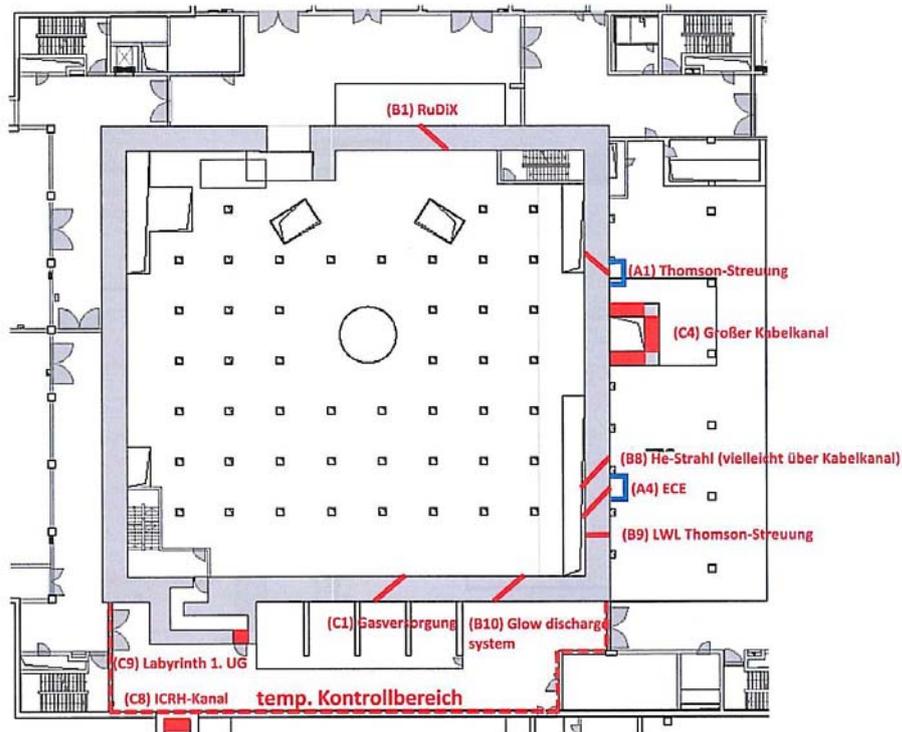


Abb. 5.2 Torushalle 1. UG mit Wanddurchbrüchen

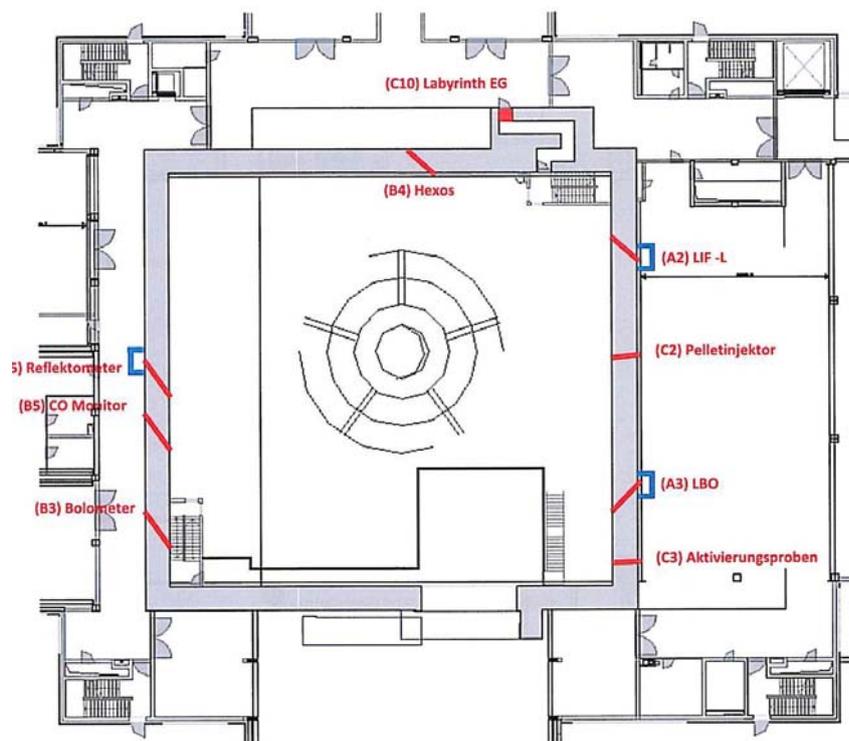


Abb. 5.3 Torushalle EG mit Wanddurchbrüchen

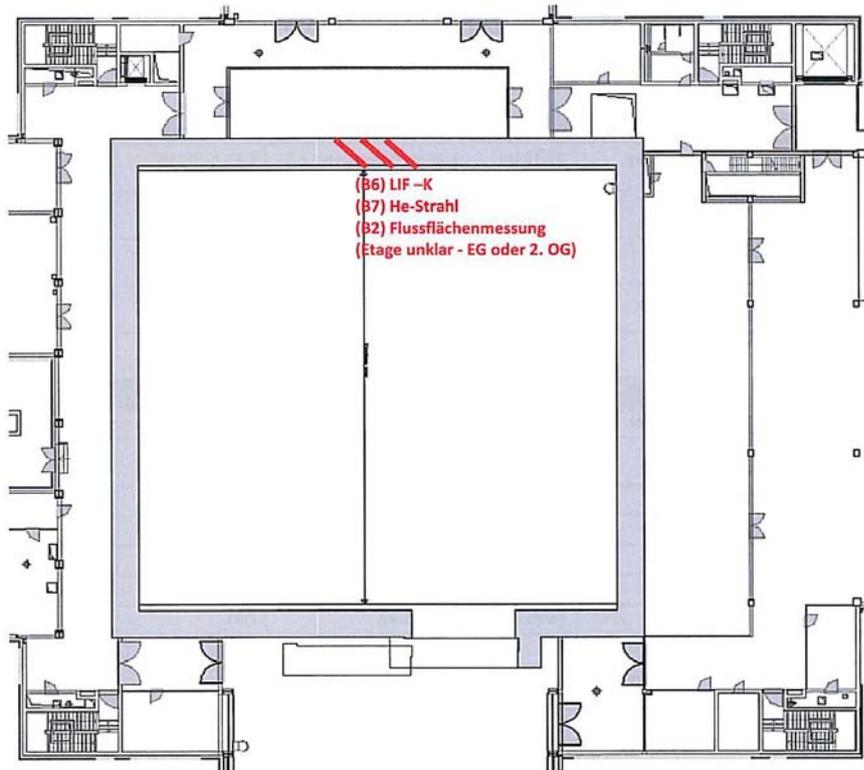


Abb. 5.4 Torushalle 2. OG mit Wanddurchbrüchen

Die hier dargestellten Wanddurchbrüche werden nach /U 32/ in drei Arten eingeteilt:

- Wanddurchbrüche für optische Strahlführung (A1-A5)
- Wanddurchbrüche für Kabelführungen (B1-B10)
- Weitere Wanddurchbrüche (C1-C11)

Wanddurchbrüche für optische Strahlführung:

In der Zusammenstellung des IPP vom 18.12.2012 /U 32/ wird in Tab. 2-1 dargelegt, dass die Durchbrüche A1 und A2 schon vorhanden sind. Die Durchbrüche A3 bis A5 sind noch nicht vorhanden. Die Durchbrüche haben einen Durchmesser von 10 cm bis 15 cm. Als Abschirmmaßnahme dienen Burgen aus 30 cm Normalbeton + 5 cm PE (innenliegend). Nach /U 32/ werden die Durchbrüche in einem großen Winkel (z.B. 45°) zum Wandverlauf, vom Torus wegschauend, errichtet.

Wanddurchbrüche für Kabelführungen:

In der Zusammenstellung des IPP vom 18.12.2012 /U 32/ wird in Tab. 2-1 dargelegt, dass der Durchbruch B1 schon vorhanden ist. Die Durchbrüche B2 bis B10 sind noch nicht vorhanden. Die Durchbrüche B1 bis B9 haben einen Durchmesser von 10 cm. Der Durchbruch B10 hat einen Durchmesser von 6 cm. Nach /U 32/ dienen die Kabel selbst bzw. der Wasserstoffanteil im Isoliermaterial als Abschirmmaterial. Die Belegungsichte muss dabei 60 % betragen. Liegt die Belegungsichte unter 60 %, so wird die Bohrung mit Stäben aus Polyethylen aufgefüllt, um eine Abschirmung zu gewährleisten.

Weitere Wanddurchbrüche:

In der Zusammenstellung des IPP vom 18.12.2012 /U 32/ wird in Tab. 2-1 dargelegt, dass die Durchbrüche C1, C4 bis C11 schon vorhanden sind. Die Durchbrüche C2 und C3 sind noch nicht vorhanden. Die Wanddurchbrüche mit den größten Durchmessern sind der ECRH-Kanal (C11), der ICRH-Kanal (C8), der Kryo-Kanal (C5 bis C7) und der Große Kabelkanal (C4).

Um Abschirmmaßnahmen für die Wanddurchbrüche Kryo-Kanal (C5 bis C6), Labyrinth 1. UG (C9), Labyrinth EG (C10) und ECRH-Kanal (C11) festlegen zu können, sind nach der Zusammenstellung des IPP vom 18.12.2012 /U 32/ weitere MCNP-Berechnungen nötig.

Für den Kryokanal (C7) ist als Abschirmmaßnahme eine zusätzliche Tür mit Interlock geplant, um einen Zutritt zum Kryokanal bei Deuterium-Betrieb zu unterbinden/U 32/.

Für den ICRH-Kanal (C8) werden aufgrund der durchgeführten MCNP Simulationen entsprechend dem Bericht vom 07.01.2009 /U 28/ keine Abschirmungen benötigt, da die Gesamtdosisleistung unter 1 mSv pro Kalenderjahr liegt und damit der Grenzwert der effektiven Dosis von 1 mSv für die Bevölkerung nach § 46 StrlSchV /R 1/ eingehalten wird.

Für die Zentrale Gasversorgung (C1) plant der Betreiber nach /U 32/, vorzugsweise einen temporären Kontrollbereich einzurichten. Wäre die Einrichtung eines solchen Kontrollbereiches nicht möglich, so müsste die Bohrung der Zentralen Gasversorgung (C1) verfüllt werden.

Nach Bericht vom 26.09.2003 /U 25/, in dem durchgeführte MCNP Simulationen beschrieben werden, wird als Abschirmmaßnahme des H-Pelletinjektors (C2) eine Verfüllung des Freiraumes zwischen Bohrungswand und Einschussrohr mit Plastikgranulat (PE-Kugeln) vorgeschlagen. Der Füllgrad soll dabei 70% betragen.

Nach dem Bericht /U 32/ kann zu dem noch nicht vorhandenen Durchbruch für Aktivierungsproben (C3) erst nach 2014 eine Aussage bezüglich Ausführung und Abschirmmaßnahmen getroffen werden.

Nach /U 32/ ist für den Großen Kabelkanal (C4) als Abschirmmaßnahme eine Verfüllung mit Bausteinen aus Normalbeton vorgesehen.

Zur Begutachtung der Wanddurchbrüche im Sinne des baulichen Strahlenschutzes fand am 12.02.2013 eine Begehung im Max-Planck-Institut für Plasmaphysik (IPP) statt. Das Ziel dieser Begehung bestand darin, alle direkten Wanddurchbrüche, d.h. Großer Kabelkanal, ECRH-Kanal, Kryokanal, die sechs Bohrungen ins Rudix-Labor in der Nordwand (1. UG) sowie den Durchbruch zur Gasversorgung in der Südwand (1. UG) fotodokumentarisch zu erfassen und diese aus der Sicht des baulichen Strahlenschutzes zu bewerten. Das Ergebnis der Begehung bezüglich der Wanddurchbrüche wurde in einem Begehungsbereicht /L 4/ aufgezeigt und der Aufsichtsbehörde mit der Stellungnahme /L 8/ vom 22.02.2013 mitgeteilt.

Bewertungsmaßstäbe

Um die vorhandenen Wanddurchbrüche aus der Sicht des baulichen Strahlenschutzes entsprechend bewerten zu können, wurden neben den allgemeinen Strahlenschutzgrundsätzen §§ 4-6 StrlSchV /R 1/ noch die Errichtungsgenehmigung MGS 97401 vom 18.12.1997 /U 1/, die nach der StrlSchV in der gültigen Fassung vom 30.06.1989 /R 1/ erstellt wurde, herangezogen.

Wertung

Entsprechend der Stellungnahme /L 8/ vom 22.02.2013 wurden alle direkten Wanddurchbrüche, d.h. Großer Kabelkanal, ECRH-Kanal, Kryokanal, die sechs Bohrungen ins Rudix-Labor in der Nordwand (1. UG) sowie der Durchbruch zur Gasversorgung in der Südwand (1. UG) am 12.02.2013 begangen und fotodokumentarisch erfasst.



Im Bereich der Zentralen Gasversorgung (C1) empfiehlt der Gutachter während des Experimentierbetriebs mit einem Deuteriumplasma die Einrichtung eines temporär abgesperrten Bereiches (E 5/1).

Zusammenfassend bestehen aus der Sicht des Gutachters keine Einwände gegen die in der Zusammenstellung des IPP vom 18.12.2012 /U 32/ beschriebene Vorgehensweise, für die Wanddurchbrüche geeignete Abschirmmaßnahmen oder organisatorische Lösungen zu finden, um die Einhaltung des Grenzwertes der effektiven Dosis von 1 mSv pro Kalenderjahr für die Bevölkerung nach § 46 StrlSchV /R 1/ zu gewährleisten.

6 Weitere Strahlenschutzberechnungen (*erweiterte Untersuchungen*)

6.1 Konkurrenzreaktionen (DT-Reaktion)

Bei den weiterführenden Betrachtungen und Berechnungen sollen im Gutachten neben der Neutronenquelle mit quasimonoenergetischen Neutronen aus der DD-Reaktion (1) mit einer Energie von 2,45 MeV auch die Neutronen aus der DT-Reaktion (2b), die mit einer maximalen Energie von $E_n = 14,1$ MeV erzeugt werden, betrachtet werden. Mit diesen Vergleichsberechnungen ist nachzuweisen, ob die in den Konkurrenzreaktionen (2a, 2b) generierte Neutronenrate von ca. $2,9 \cdot 10^{13} \text{ s}^{-1}$ (etwa 1/200 der Neutronenrate aus der DD-Reaktion) und die daraus resultierende zusätzliche Dosisleistung wirklich vernachlässigbar ist. Somit könnten bei der Dimensionierung der Abschirmungen - gegen die beim Fusionsexperiment entstehende Neutronen- und Photonenstrahlung als Primär- oder Quellteilchen - ausschließlich die Neutronen ($E_n = 2,45$ MeV, $3 \cdot 10^{19}$ Neutronen pro Jahr) der DD-Reaktion betrachtet werden.

Bei den durchgeführten Untersuchungen zum Einfluss der DT-Reaktion auf die Neutronen- bzw. Photonendosisleistung wurde das selbe Zeitverhalten der vorgesehenen Experimente mit einem Deuterium-Plasma betrachtet. Dabei geht man von ca. 500 Pulsen pro Jahr mit einer Dauer von 10 s aus. Aus der DD-Reaktion (1) bzw. der DT-Reaktion (2b) sind Neutronenraten von $6 \cdot 10^{15} \text{ s}^{-1}$ bzw. $3 \cdot 10^{13} \text{ s}^{-1}$ zu erwarten, was zu einer Neutronenzahl von ca. $6,03 \cdot 10^{16}$ pro Puls bzw. zu einer jährlichen Neutronenzahl von $3,01 \cdot 10^{19}$ führt. Diese Neutronenrate wird in etwa 5000 s, was ca. 1,4 h entspricht, pro Jahr erzeugt. Bei einer jährlichen Arbeitszeit des Personals von 2000 h führt die in maximal 500 Impulsen pro Jahr emittierte Neutronenzahl zu einer mittleren Neutronenrate von $4,17 \cdot 10^{12} \text{ s}^{-1}$ bei 2,45 MeV Neutronen sowie von etwa $2,1 \cdot 10^{10} \text{ s}^{-1}$ bei 14 MeV Neutronen, wenn man eine kontinuierliche Strahlenexposition über 2000 h pro Jahr annimmt.

Bewertungsmaßstäbe

Die grundsätzlichen Anforderungen an die Neutronenquelle hinsichtlich Reaktionen und Neutronenraten werden in den Unterlagen zum Fusionsexperiment Wendelstein 7-X formuliert, des Weiteren wurden bekannte Lehrbücher der Kern- und Strahlenschutzphysik /L 15, L 16/ sowie die allgemeinen Strahlenschutzgrundsätze §§ 4-6 StrlSchV /R 1/ herangezogen.

Wertung

Eine weitere wesentliche Voraussetzung für die Planung der Abschirmungen und somit der Dimensionierung der Torushallenwände sind die Betrachtungen zu den möglichen Kernreaktionen (1-3). Entsprechend den Antragsunterlagen /U 2/ tritt neben der DD-Reaktion (1) die Konkurrenzreaktion (2a) mit einer Reaktionswahrscheinlichkeit von 50% auf /L 15/. Die damit erzeugte geringe Menge Tritium im Plasma (Tritiumrate: ca. $6 \cdot 10^{15} \text{ s}^{-1}$) führt dazu, dass aus der DT-Reaktion (2b) monoenergetische Neutronen einer Energie von $E_n = 14,1 \text{ MeV}$ erzeugt werden. Gemäß den Antragsunterlagen /U 2/ soll die, aus der Kernreaktion (2b), resultierende Neutronenrate ca. $2,9 \cdot 10^{13} \text{ s}^{-1}$, was etwa 1/200 der Neutronenrate aus der DD-Reaktion (1) entspricht, vernachlässigbar sein. Zu dieser Feststellung wurde in den Antragsunterlagen kein Nachweis erbracht. Ob oder unter welchen Umständen die Neutronenrate aus der DT-Reaktion (2b) vernachlässigbar ist, wird im Gutachten dargelegt.

Die Geometrie der Strahlungsquelle entspricht annähernd einer kreisförmigen Linienquelle (Kreisumfang des großen Torus-Radius), wobei in jedem Linienelement der Linienquelle eine isotrope Neutronenverteilung angenommen wurde. Bei den Berechnungen in dem Modell W7XB302 wurde von einer toroidalen Volumenquelle mit dem großen Radius des Torus des Wendelsteinexperiments und einem kleinen Torus-Radius von 12,5 cm (siehe Abb. 3.1 a-c oben) ausgegangen.

Die Vergleichsberechnungen zum Einfluss der DT-Reaktion wurden mit einer einfachen Energieverteilung durchgeführt. Dabei wurde je eine Normalverteilung bei den Neutronenenergiewerten 2,45 MeV und 14,1 MeV mit einer Halbwertsbreite von 1%, analog zu der in Anlage C (s. Abb. C01) aufgezeigten grundsätzlichen Herangehensweise, für die Simulationsberechnungen angenommen. Dieses Spektrum der Quellneutronen aus der DD-Reaktion (99,5%) und der DT-Reaktion (0,5%) ist in Abb. 6.1 a dargestellt. Daraus resultieren, bedingt durch Wechselwirkungen mit dem Plasma und den anderen Strukturkomponenten (Plasmakammer, Divertoren, supraleitende Spulen, Kryostat u.a.), die in Abb. 6.1 b) und c) dargestellten Neutronen-Flussdichten sowie die Photonen-Flussverteilung gemäß Abb. 6.1 d) aus den entsprechenden Anlagenkomponenten. Das Modell W7XB302 beschreibt die realen Strahlungskomponenten und die Flussdichten aus der Fusionsanlage zutreffend. Insbesondere bei der Neutronenflussdichte über alle Anlagenkomponenten wird im Unterschied zu den einfacheren Modellen (W7XB34M u.a.) im Energiebereich $> 3 \text{ MeV}$ der 14-MeV-Neutronenpeak recht gut abgebildet.

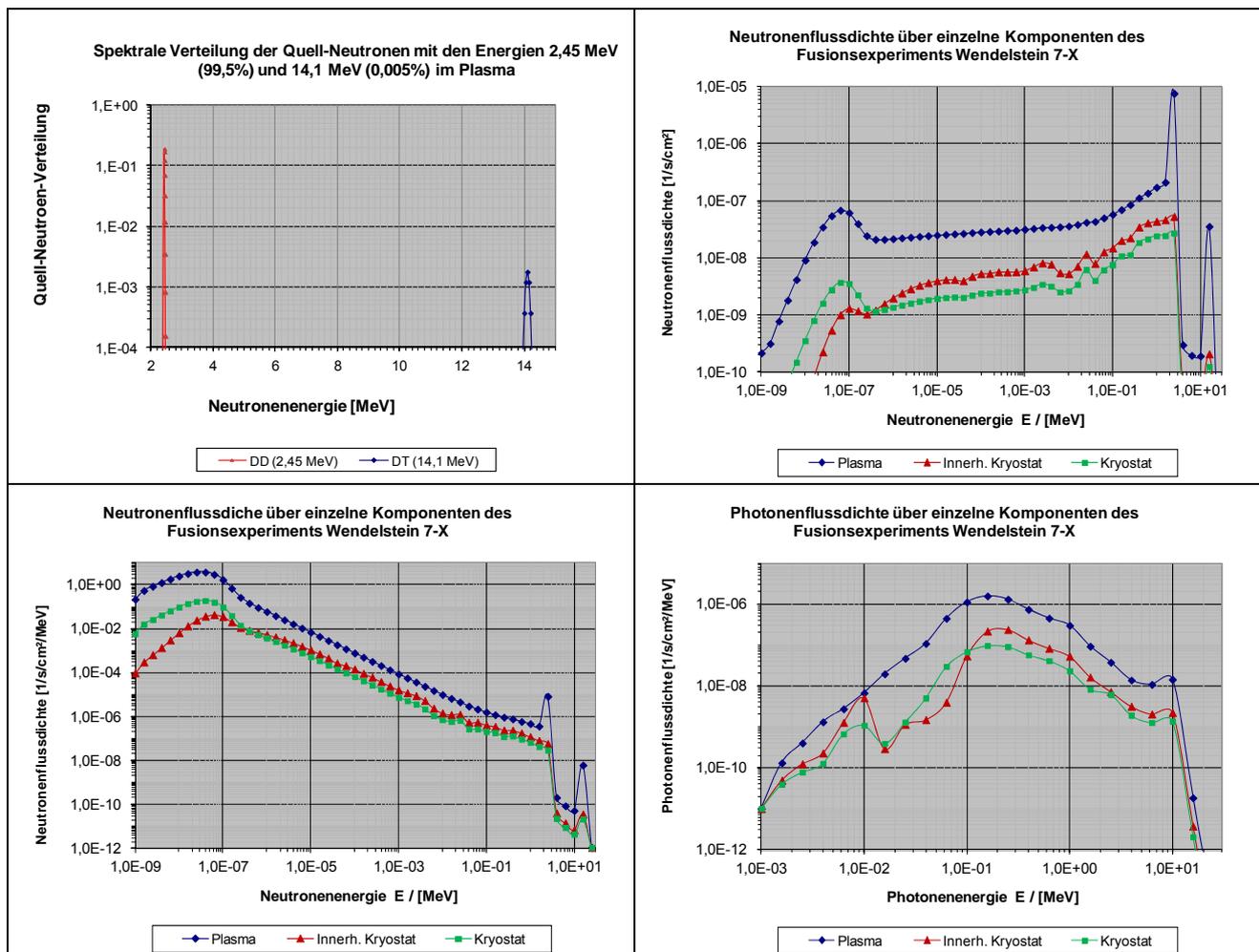


Abb. 6.1 a-d Spektrale Verteilung der Quell-Neutronen (li., ob.) und spektrale Flussdichte der Neutronen (re., ob.), spektrale Flussdichte der Neutronen pro Energieintervall (li., unt.) und der erzeugten Photonen (re., unt.) pro Energieintervall über einzelne Komponenten (Plasma, innerhalb Kryostat, über Kryostatoberfläche) bei der Monte-Carlo-Simulationen mit MCNPX für das Modell: W7XB302 (Konkurrenzreaktionen)

Die Testdetektoren werden analog zum Modell W7XB34M (s. Abb.3.2 oben) verwendet, insbesondere sind die zur Auswertung der Neutronen- und Photonenflussdichte relevanten Testdetektoren (915 und 916) in Form von Kugeldetektoren auf der x-Achse dargestellt. Die Verifikationsergebnisse sind in den folgenden Abbildungen 6.2 a-d und 6.3 a, b wiedergegeben. Aus dem Vergleich der berechneten spektralen Verteilungen der Neutronenflussdichte in den Testdetektoren, die in der Torushalle (Detektor 915 bei $x=-1150$ m und 916 bei $x=1150$ m) positioniert wurden, ergibt sich nur ein wesentlicher Unterschied bei der spektralen Neutronenenergiedichte beider Modelle (W7XB302 und W7XB34M) im Bereich des 14-MeV-Neutronenpeaks (>3 MeV). Der Unterschied in der Peakhöhe beträgt nahezu drei Größenordnungen. Ansonsten sind die beiden Modelle zum Vergleich der Konkurrenz-Reaktionen in sehr guter Übereinstimmung, denn sowohl

die spektralen Neutronenenergiedichten als auch die Photonenergiedichten in Abb. 6.2 sind für Energien kleiner 3 MeV völlig identisch.

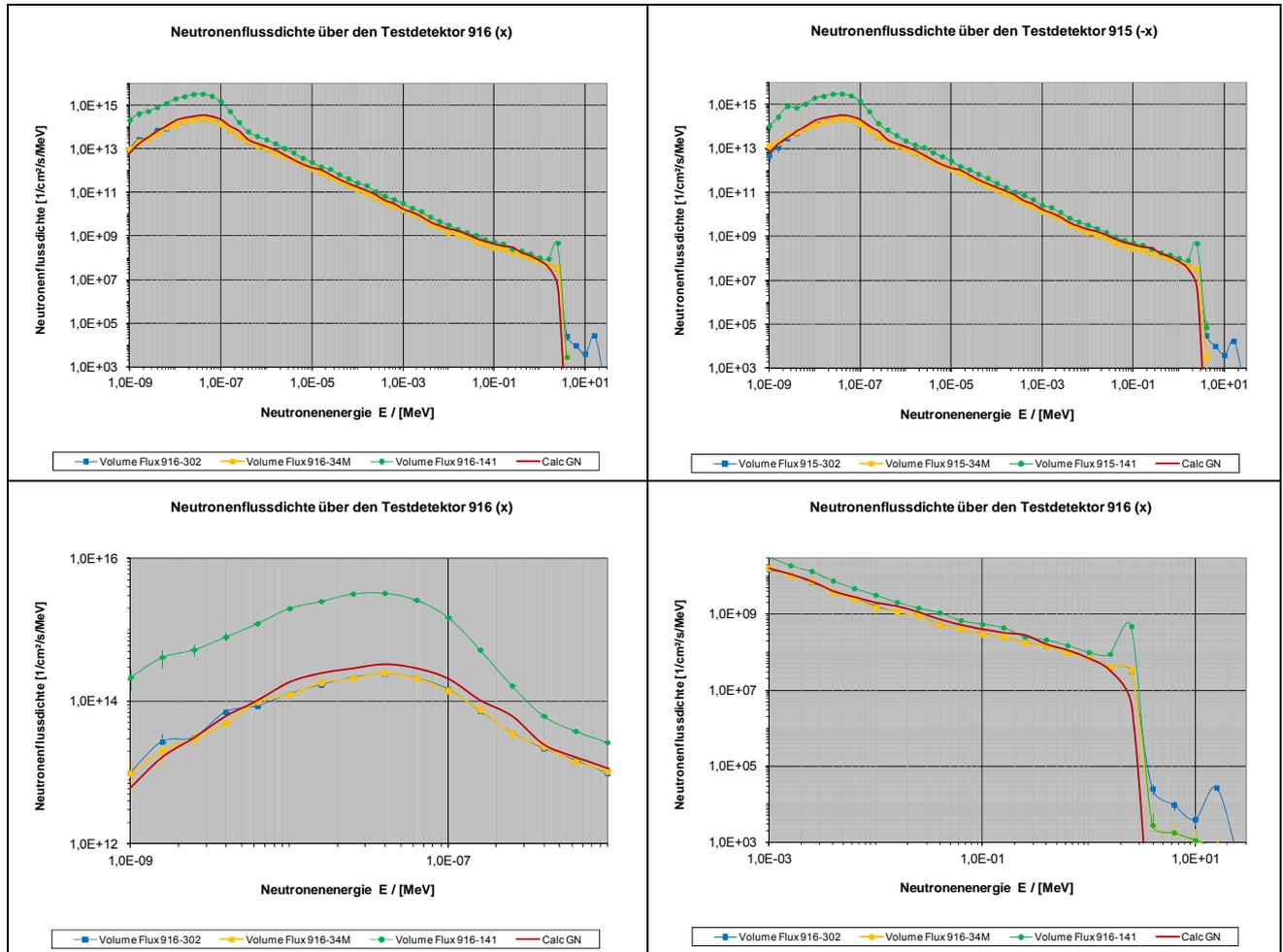


Abb. 6.2 Neutronenflussdichte in den Testdetektoren 915 und 916 auf der x-Achse der Modelle W7XB141 (DD-Neutronenquelle ohne Strukturmaterialien des Fusionsreaktors, Normalbeton LAC), W7XB302 (wie Fusionsreaktor-Modell W7XB34M komplett, DD- und DT-Reaktion) und W7XB34M (Fusionsreaktor-Modell komplett, Normalbeton mit Wassergehalt 120 l/m³ und 1000 ppm Bor), Vergleichsspektrum aus den Berechnungen zum baulichen Strahlenschutz /U 28/ für Beton mit einem Borgehalt von 2200 ppm (oben), Neutronenflussdichte im Energiebereich der thermischen Neutronen (links unten) und der schnellen Neutronen (rechts, unten)

Ausgangspunkt für die vergleichenden Betrachtungen ist die Verteilung für das Modell W7XB141, bei dem ausschließlich die entsprechende DD-Neutronenquelle in der Geometrie des Fusionsreaktors (ohne jegliche Strukturmaterialien) und die Torushallenwände (inklusive Decken) aus dem Standard Los-Alamos-Beton /L 11/ enthalten sind (grüne Kurven). Das Modell W7XB34M (gelbe Kurven), mit dem sowohl das Fusionsexperiment als auch die Torushallenwände möglichst real modelliert wurden, befindet sich hinsichtlich der berechneten spektralen Verteilung der Neutronenflussdichte in den Testdetekto-

ren (915 und 916) in recht guter Übereinstimmung mit den Ergebnissen der Begutachtungsunterlagen /U 28/ (rote Kurven).

Gleiches gilt ebenso für die Photonenflussdichten in Abb. 6.3, wobei diese bei beiden Modellen um einige Größenordnungen unter den Neutronenflussdichten liegen. Im Bereich von Photonenenergien < 0,01 MeV unterscheiden sich die spektralen Verteilungen etwas, was auch in der schlechteren Berechnungsstatistik begründet ist. Wie gezeigt wurde, können die zur Begutachtung und zur Verifikation der Abschirmberechnungen entwickelten Modelle W7XB34M und W7XB302 zur Untersuchung hinsichtlich des Einflusses der DT-Reaktion auf die Abschirmwirkung Torushallenwände und der Bewertung herangezogen werden.

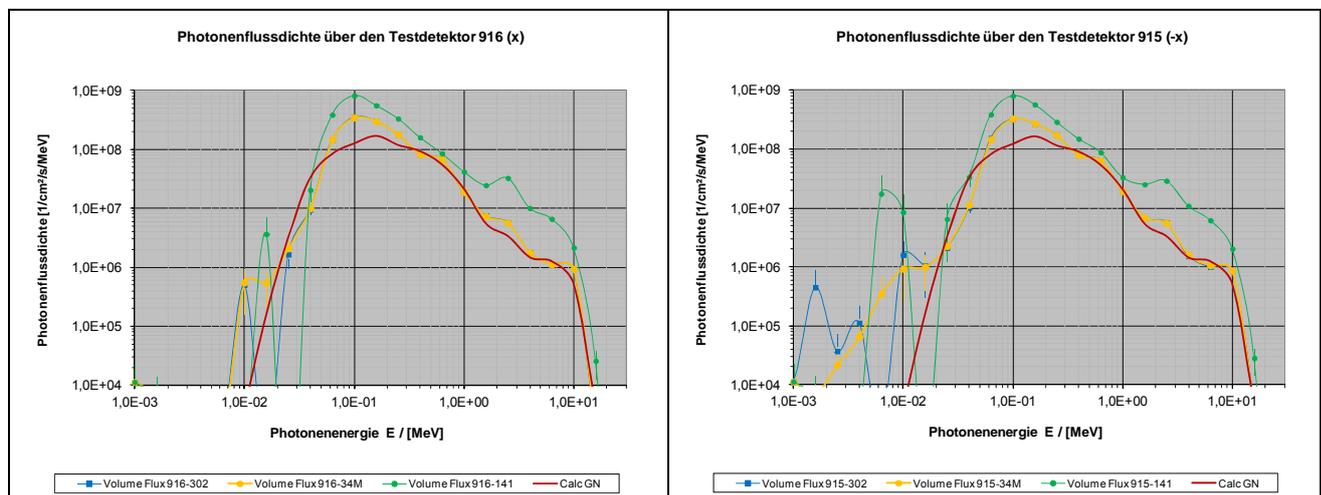


Abb. 6.3 Photonenflussdichte in den Testdetektoren 915 und 916 auf der x-Achse der Modelle W7XB141 (DD-Neutronenquelle ohne Strukturmaterialien des Fusionsreaktors, Normalbeton LAC), W7XB31 (Fusionsreaktor-Modell komplett, Normalbeton mit Wassergehalt von 120 l/m³) und W7XB34M (Fusionsreaktor-Modell komplett, Normalbeton mit Wassergehalt 120 l/m³ und 1000 ppm Bor), Vergleichsspektrum aus den Berechnungen zum baulichen Strahlenschutz /U 28/ für Beton mit einem Borgehalt von 2200 ppm

Mit den getroffenen Annahmen zur Neutronenquelle (Geometrie bzw. Energieverteilung) und der modellierten Geometrie des Fusionsexperiments sowie der Geometrie der Torushalle wurden als erstes MC-Simulationen mit der geplanten Betonzusammensetzung (Rohdichte: 2,213 g/cm³ ; Wassergehalt: 120 l/m³ Beton; Borgehalt: 1000 ppm) zum Vergleich der DD-Reaktion (1) mit dem Modell W7XB35M und dem zusätzlichen Anteil der resultierenden Neutronenrate ca. $2,9 \cdot 10^{13} \text{ s}^{-1}$ aus der Konkurrenzreaktion (2a) und der DT-Reaktion (2b) von Neutronen mit einer maximalen Energie von $E_n = 14,1 \text{ MeV}$ im Modell W7XB302 durchgeführt. Die ermittelten spektralen Verteilungen der Neutronen- bzw. der Photonendosisleistung für die beiden Simulationsrechnungen sind am Beispiel der Nordwand der Torushalle in verschiedenen Wandschichten (Oberfläche, 80 cm und 160 cm Tiefe) in Abb. 6.4 dargestellt.

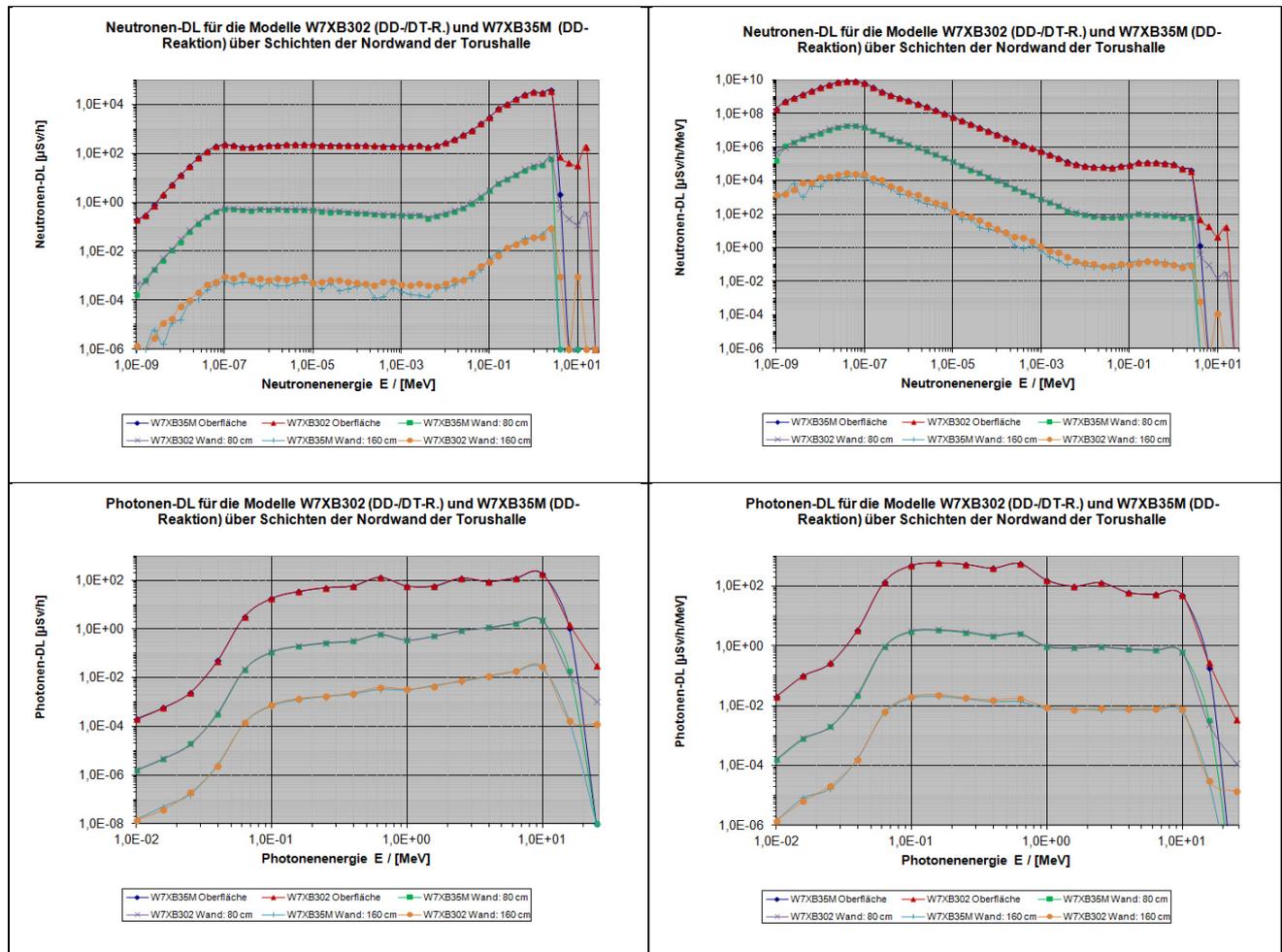


Abb. 6.4 Neutronen- bzw. Photonendosisleistung (oben/unt.) in den Testdetektoren der verschiedenen Schichten der Nordwand der Torushalle für die Modelle W7XB302 (DD-/DT-Reaktion) und W7XB35M (DD-Reaktion), jeweils mit dem geplanten Borbeton mit einem Wassergehalt von 120 l/m^3 und 1000 ppm Bor

Bei den Darstellungen der Neutronendosisleistung wird im Vergleich beider Modelle der Peak der 14 MeV-Neutronen der DT-Reaktion deutlich. Die 14 MeV-Neutronen werden in den verschiedenen Schichten fast ebenso wie die 2,5 MeV-Neutronen geschwächt. Wie erwartet, ist durch zusätzliche 14 MeV-Neutronen keine Erhöhung der Neutronendosisleistung in anderen Energiebereichen zu registrieren. Dort stimmen die spektralen Verteilungen beider Modelle für alle Schichten (Oberfläche, 20 – 160 cm) sehr gut überein, wenn man von den Effekten der Berechnungsstatistik bei großen Abschirmdicken (160 cm) absieht. Gleiches gilt für die Spektren der Photonendosisleistung, die nur im Bereich $> 2,5 \text{ MeV}$ voneinander abweichen. Die Berechnungsergebnisse der beiden Simulationsrechnungen sind in der Tabelle 6.1 zusammengefasst, die grafischen Darstellungen zur Ermittlung der relevanten Parameter (erforderliche Wanddicke bzw. Zehntelwertdicke) für die jeweilige Wandgeometrie (Nordwand, Ostwand, Decke) zu den beiden Modellen sind in den Abb. 6.5 a-c aufgeführt.

Modell Hallenwände / Größen	W7XB302 (DD-/DT-Reak.)	W7XB35M (DD-Reak.)	Differenz der Ergebnisse	proz. Abweich. der Ergebnisse	Bemerkungen
Nordwand					
Dicke [cm] bei 1 mSv/a:	156,4	155,2	1,29	0,83	< 1% Abweichung
Dicke [cm] bei 0,3 mSv/a:	171,1	169,7	1,34	0,79	< 1% Abweichung
ZW-Dicke x_{ZW} [cm]:	28,5	28,3	0,11	0,40	
Ostwand					
Dicke [cm] bei 1 mSv/a:	152,4	150,8	1,56	1,03	etwa 1 % Abweichung
Dicke [cm] bei 0,3 mSv/a:	167,0	165,4	1,66	1,00	etwa 1 % Abweichung
ZW-Dicke x_{ZW} [cm]:	28,5	28,3	0,20	0,69	
Decke *)					
Dicke [cm] bei 1 mSv/a:	121,9	119,6	2,33	1,95	etwa 2 % Abweichung
Dicke [cm] bei 0,3 mSv/a:	136,0	133,3	2,64	1,98	etwa 2 % Abweichung
ZW-Dicke x_{ZW} [cm]:	27,3	26,7	0,61	2,28	

*) Für Aufenthaltsfaktor 0,1 (maximal)

Tab. 6.1 Vergleich der ermittelten erforderlichen Wanddicken zu den beiden Berechnungsmodellen W7XB302 (DD-Reaktion und Anteil der DT-Reaktion mit 0,5%) und W7XB35M (DD-Reaktion) bei den geplanten Parametern für die Torushallenwände /U 2/

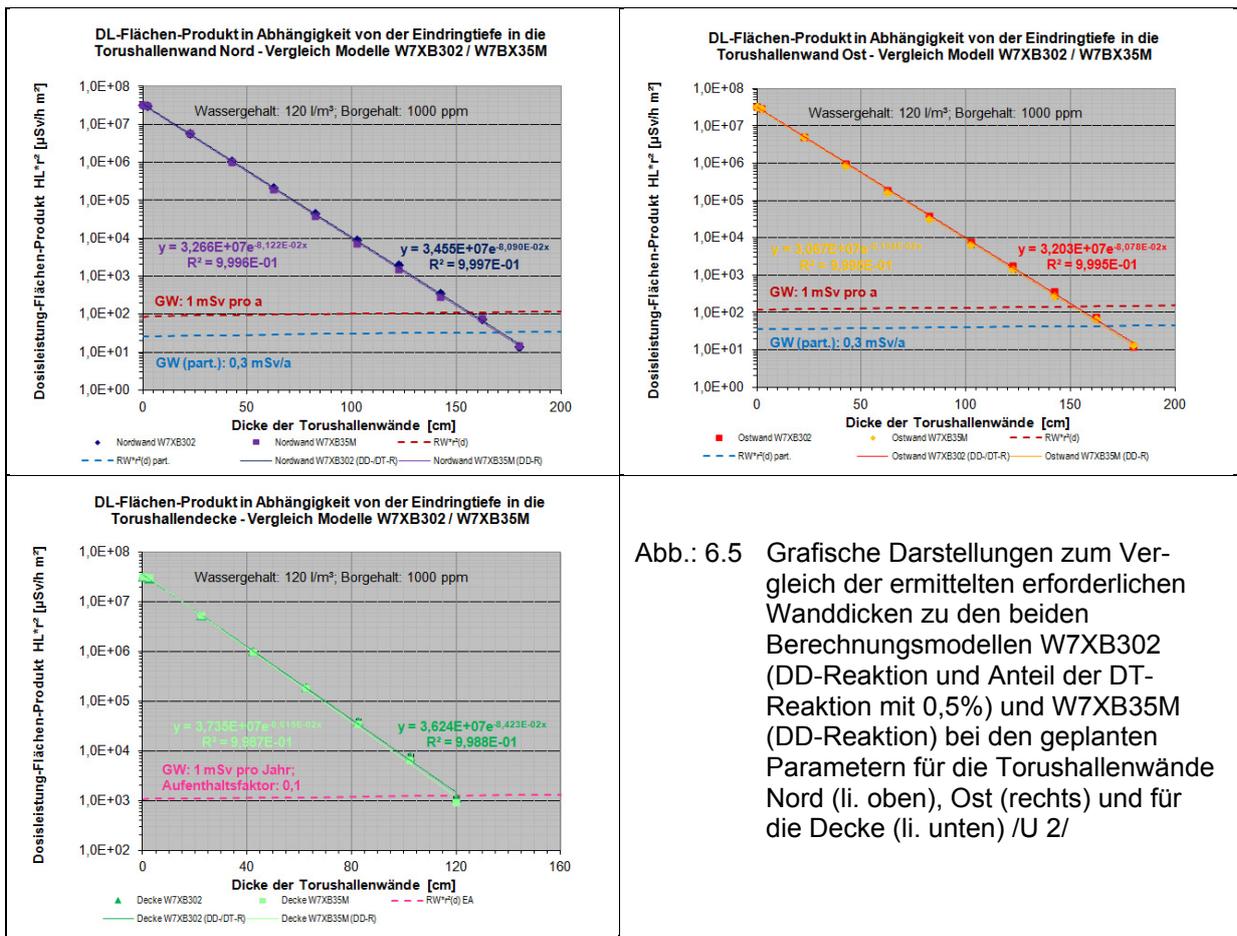


Abb.: 6.5 Grafische Darstellungen zum Vergleich der ermittelten erforderlichen Wanddicken zu den beiden Berechnungsmodellen W7XB302 (DD-Reaktion und Anteil der DT-Reaktion mit 0,5%) und W7XB35M (DD-Reaktion) bei den geplanten Parametern für die Torushallenwände Nord (li. oben), Ost (rechts) und für die Decke (li. unten) /U 2/

Im Vergleich der beiden Simulationsrechnungen ergibt sich aus Tabelle 6.1 und den Abbildungen 6.5 a-c, dass die Neutronen aus der DT-Reaktion (2b) bei den Berechnungen zum baulichen Strahlenschutz der Torushallenwände vernachlässigbar sind, wie es bereits in den Antragsunterlagen /U 2/ vorausgesagt wurde. Während der Anteil der 14 MeV-Neutronen aus der DT-Reaktion etwa 1/200 (ca. 0,5%) beträgt, ergibt sich durch die Vergleichsberechnungen, dass abhängig von der Dicke der Betonabschirmung eine Erhöhung der erforderlichen Wanddicke von etwa 1-2% zu erwarten ist. Bei den ausgeführten Dicken von 180 cm bei den Torushallenwände und 120 cm für die Decke entspricht das einer zusätzlich Wanddicke von ca. 2 - 2,5 cm, welche bei den Sicherheiten in den Berechnungen zur Abschirmwirkung abdeckend enthalten ist. Diese Feststellungen werden auch durch den Vergleich der Verteilung von Neutronen- bzw. Photonen-Dosisleistung zu beiden Modellen in den folgenden Darstellungen bestätigt (Abb. 6.6 bzw. 6.7).

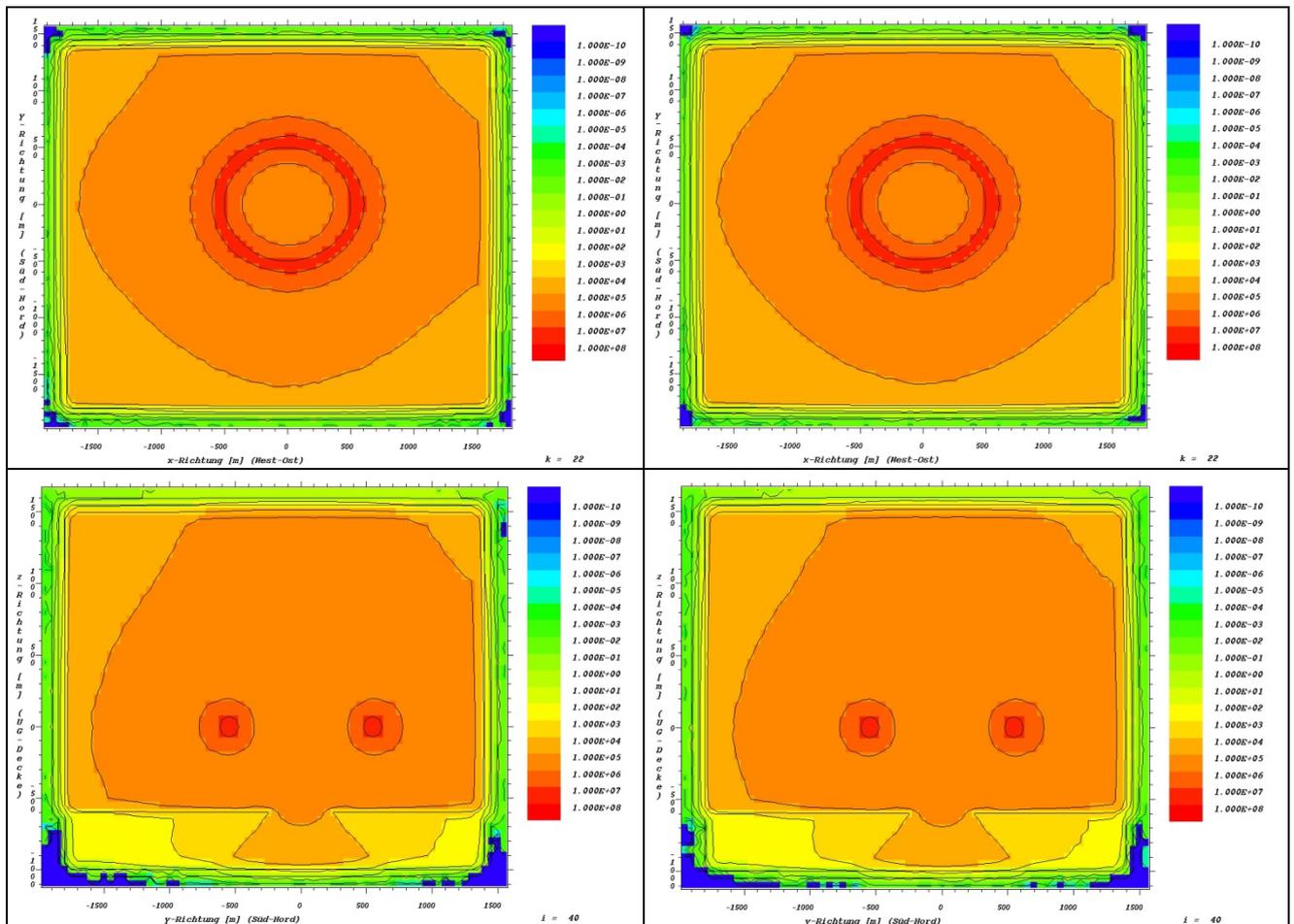


Abb. 6.6 a-d Verteilung der Neutronen-Dosisleistung [$\mu\text{Sv/h}$] für das Modell W7XB35M in der xy-Ebene (links, oben) und in der xz-Ebene (links, unten) bzw. analog für das Modell W7XB302 (rechts)

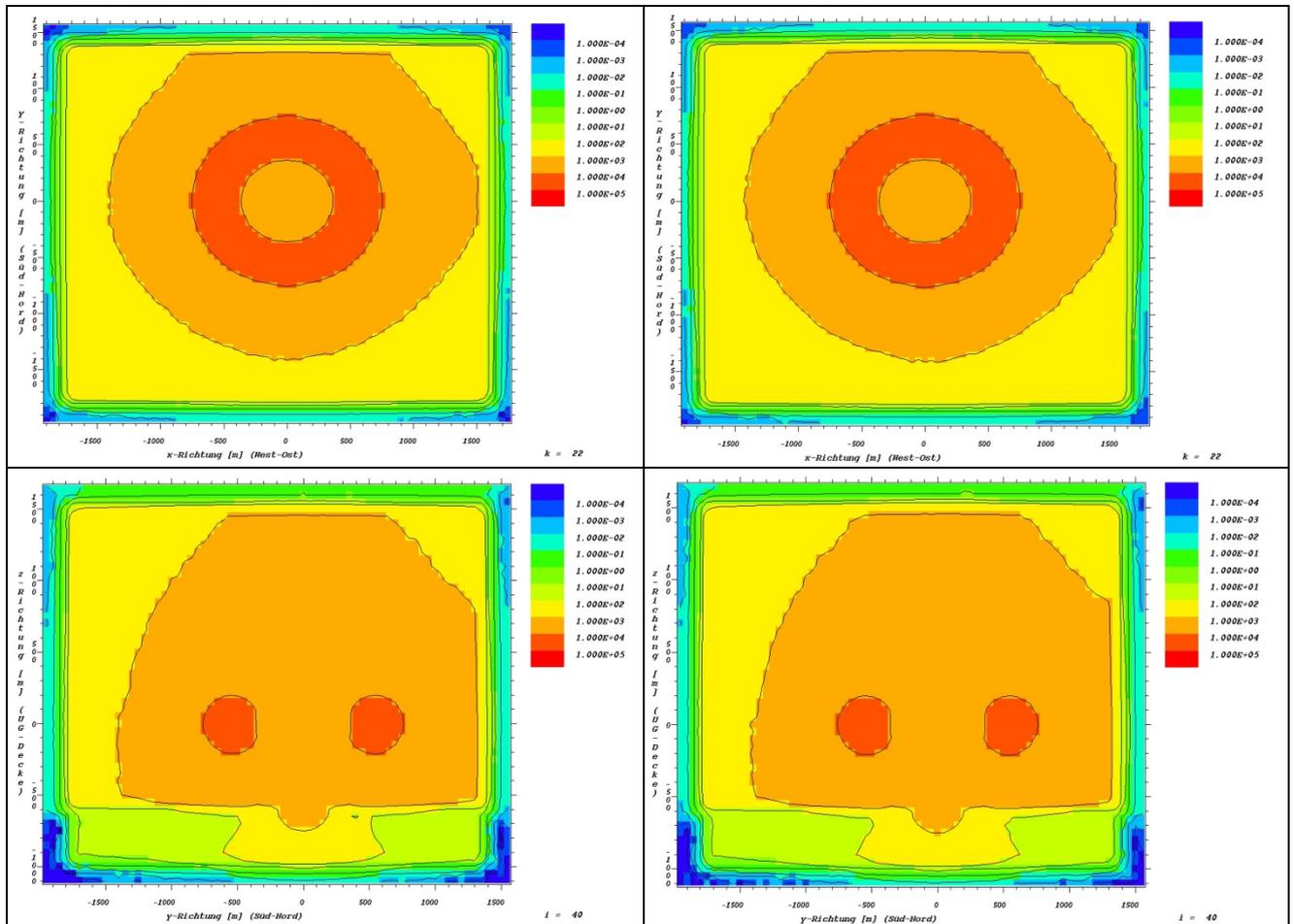


Abb. 6.7 a-d Verteilung der Photonen-Dosisleistung [$\mu\text{Sv/h}$] für das Modell W7XB35M in der xy-Ebene (links, oben) und in der xz-Ebene (links, unten) bzw. analog für das Modell W7XB302 (rechts)

6.2 Vergleich der Flussdichte-Dosisleistungs-Beziehungen

Mit Hilfe der Fluss-Dosisleistung-Beziehung (Flux-to-Dose Rate Conversion Factors), einer energieabhängigen Funktion $f(p, E)$ für die jeweiligen Nuklearteilchen, wird die Abhängigkeit zwischen der Flussdichte und der Dosisleistung zu den entsprechenden Nuklearteilchen nach Formel (6.1) abgebildet. Der exakte Berechnungsformalismus ist in Anlage C beschrieben.

$$\dot{H}_p = \int f(p, E_p) \cdot \Phi(p, E_p) \cdot n_n dE_p \quad (6.1)$$

mit: \dot{H}_p – mittlere Dosisleistung [mSv/h] pro MC-Zelle,
 $f(p, E)$ – Konversionsfaktor [mSv/h*cm²*s], n_n – Neutronenquellrate [1/s],
 Φ – mittlere Neutronen-/Photonen-Fluenz [1/cm²]

Die Funktion $f(p, E)$ wird für die jeweiligen Nuklearteilchen von der ICRP ermittelt und publiziert. So wurden in den letzten Jahren einige Berichte zu den Fluss-Dosisleistung-Funktionen veröffentlicht, die jeweils dem aktuellen Stand der Wissenschaft entsprechen und die jeweilige Beziehung möglichst gut abbilden. Die letzten dazu wesentlichen ICRP-Veröffentlichungen waren die ICRP74 /L 12/ von 1996 und die ICRP119 /L 13/ von 2012. Vorher wurde die in der ICRP21 von 1974 ausgegebene Beziehung, die auch in den ersten Monte-Carlo-Codes (ANS/ANSI-1977) implementiert war, genutzt.

Da in den vorgelegten Berichten /ab U 8/ zur Berechnung der Abschirmwirkung die Simulationen grundsätzlich mit der Funktion $f(p, E)$ für Neutronen und Photonen aus der Veröffentlichung ICRP74 /L 12/ durchgeführt wurden, wurde bei den Berechnungen des Gutachtens auch von diesen Beziehungen ausgegangen. Damit sind die Berechnungsergebnisse aller durchgeführten Monte-Carlo-Simulationen direkt miteinander vergleichbar.

Bewertungsmaßstäbe

Die grundsätzlichen Anforderungen an die Fluss-Dosisleistung-Funktion zu den relevanten Nuklearteilchen sind in den Veröffentlichungen der ICRP /L 12, L 13/ angegeben. Des Weiteren wurden bekannte Lehrbücher der Kern- und Strahlenschutzphysik /L 15, L 16/ sowie die allgemeinen Strahlenschutzgrundsätze §§ 4-6 StrlSchV /R 1/ herangezogen.

Wertung

Diese Herangehensweise ist deshalb plausibel, weil nur unter Verwendung der gleichen Fluss-Dosisleistung-Beziehung die Ergebnisse direkt miteinander verglichen werden können und komplexe Umrechnungen, wenn sie überhaupt möglich bzw. sinnvoll sein sollten, vermieden werden.

Die Herangehensweise, zur Ermittlung vergleichbarer Dosisleistungswerte mit der Funktion der ICRP74 zu arbeiten, ist deshalb vernünftig und aus der Sicht des Strahlenschutzes gerechtfertigt, weil die ausgeführten Berechnungen mit der ICRP74 /L 12/ von 1996 stets konservative Ergebnisse im Vergleich zu Berechnungen mit der ICRP119 von 2012 erbringen. Die aktuellen funktionalen Zusammenhänge für die Neutronen- bzw. Photonendosisleistung, wie sie in der ICRP119 angegeben sind, führen also für analoge Teilchenflussdichten zu geringeren Dosisleistungen. Die bei den Simulationen verwendeten Abhängigkeiten zwischen Teilchenflussdichte und Dosisleistung für Neutronen- bzw. Photonenstrahlung entsprechen dem Stand von Wissenschaft und Technik.

Vergleichsrechnungen zu den unterschiedlichen Fluss-Dosisleistung-Beziehungen (ICRP74 und ICRP119) wurden bei den MC-Simulationen zum Gutachten in allen Berechnungsmodellen durchgeführt und bestätigen die konservativen Ergebnisse für die Dosisleistung. Zusätzlich wurde dabei eine weitere konservative Annahme gemacht, denn die Berechnungen, die mit der Funktion der ICRP119 absolviert wurden, erfolgten ausschließlich mit dem Modellansatz AP (anterior-posterior), d.h. die Strahlungsquelle ist immer direkt vor dem Körper und strahlt direkt auf das Personendosimeter (s. Abb. C04 und C05 sowie Tab. C01 und C02 in Anlage C). Alle anderen, weit realistischeren Ansätze, wie ROT oder ISO gehen von mehreren Raumrichtungen bei der Exposition des Körpers des beruflich strahlenexponierten Personals aus. Der Modellansatz AP (anterior-posterior) liefert die größten Werte für die Dosisleistung im Vergleich zu den anderen (s. Anlage C).

Der Nachweis, dass die im Gutachten mittels Einsatz der Flussdichte-Dosisleistungs-Beziehung der ICRP74 durchgeführten Berechnungen konservative Ergebnisse liefert, wird am Beispiel der zentralen Berechnungsmodells W7XB35M mit der geplanten Betonzusammensetzung (Rohdichte: 2,213 g/cm³; Wassergehalt: 120 l/m³; Borgehalt: 1000 ppm) erbracht. Bei Vergleichsrechnungen wurde eine Simulation mit unterschiedlichen Ausgabekarten der Ergebnisse durchgeführt, damit ist ausgeschlossen, dass es sonstige Unterschiede im Berechnungsmodell (Geometrie, Energieverteilung o.a.) geben kann.

Die beiden Ergebnisse der Berechnungsverfahren zur Dosisleistung bei den Simulationsrechnungen für das Modell W7XB35M sind in der Tabelle 6.2 zusammengefasst, die grafischen Darstellungen zur Ermittlung der relevanten Parameter (erforderliche Wanddicke bzw. Zehntelwertdicke) für die jeweilige Wandgeometrie (Nordwand, Ostwand, Decke) zu den beiden Modellen sind in den Abb. 6.6 a-c aufgeführt.

Modell Hallenwände / Größen	W7XB35M-2 ICRP119 - AP	W7XB35M ICRP74	Differenz der Ergebnisse	proz. Abweich. der Ergebnisse	Bemerkungen
Nordwand					
Dicke [cm] bei 1 mSv/a:	153,2	155,2	-1,96	-1,26	≈ -2 cm Abweichung
Dicke [cm] bei 0,3 mSv/a:	167,9	169,7	-1,82	-1,07	> -1% Abweichung
ZW-Dicke x_{ZW} [cm]:	28,6	28,3	0,27	0,97	
Ostwand					
Dicke [cm] bei 1 mSv/a:	149,1	150,8	-1,76	-1,17	> -1% Abweichung
Dicke [cm] bei 0,3 mSv/a:	163,8	165,4	-1,59	-0,96	etwa -1 % Abweichung
ZW-Dicke x_{ZW} [cm]:	28,6	28,3	0,34	1,21	
Decke *)					
Dicke [cm] bei 1 mSv/a:	117,7	119,6	-1,90	-1,59	≈ -2 cm Abweichung
Dicke [cm] bei 0,3 mSv/a:	131,6	133,3	-1,74	-1,30	> -1% Abweichung
ZW-Dicke x_{ZW} [cm]:	27,0	26,7	0,32	1,20	

*) Für Aufenthaltsfaktor 0,1 (maximal)

Tab. 6.2 Vergleich der bestimmten erforderlichen Wanddicken des Berechnungsmodells W7XB35M unter Berücksichtigung unterschiedlicher Flussdichte-Dosisleistungs-Beziehungen (ICRP74 bzw. ICRP119) bei den geplanten Parametern für die Torushallenwände /U 2/

Im Vergleich der beiden Auswertungen zur Simulationsrechnung ergibt sich aus Tabelle 6.2 und den Abbildungen 6.8 a-c, dass die Berechnungen der Dosisleistung mittels der ICRP119 (Modellansatz AP) für alle Torushallenwände zu geringeren erforderlichen Wanddicken führen als die Berechnungen mittels der ICRP74, deren Berechnungsformalismus damit als konservativ bewertet werden kann. Ein ähnliches Ergebnis liefert die Bestimmung der Zehntelwertdicken, nach der ICRP119 werden größere Zehntelwertdicken berechnet, d.h. die Abschirmwirkung der so ermittelten Wand wäre kleiner.

Die Ergebnisse der Tab. 6.2 zeigen, dass bei der Berechnung der Gesamtdosisleistung zum Modell W7XB35M mittels der aktuell gültigen ICRP119, die dem Stand von Wissenschaft und Technik aus dem Jahr 2012 entspricht, die erforderlichen Wanddicken der Torushalle um ca. 1-2 cm (ca. 1%) geringer ermittelt werden als mit dem im Gutachten ausschließlich verwendeten Berechnungsformalismus für die Dosisleistung (ICRP74).

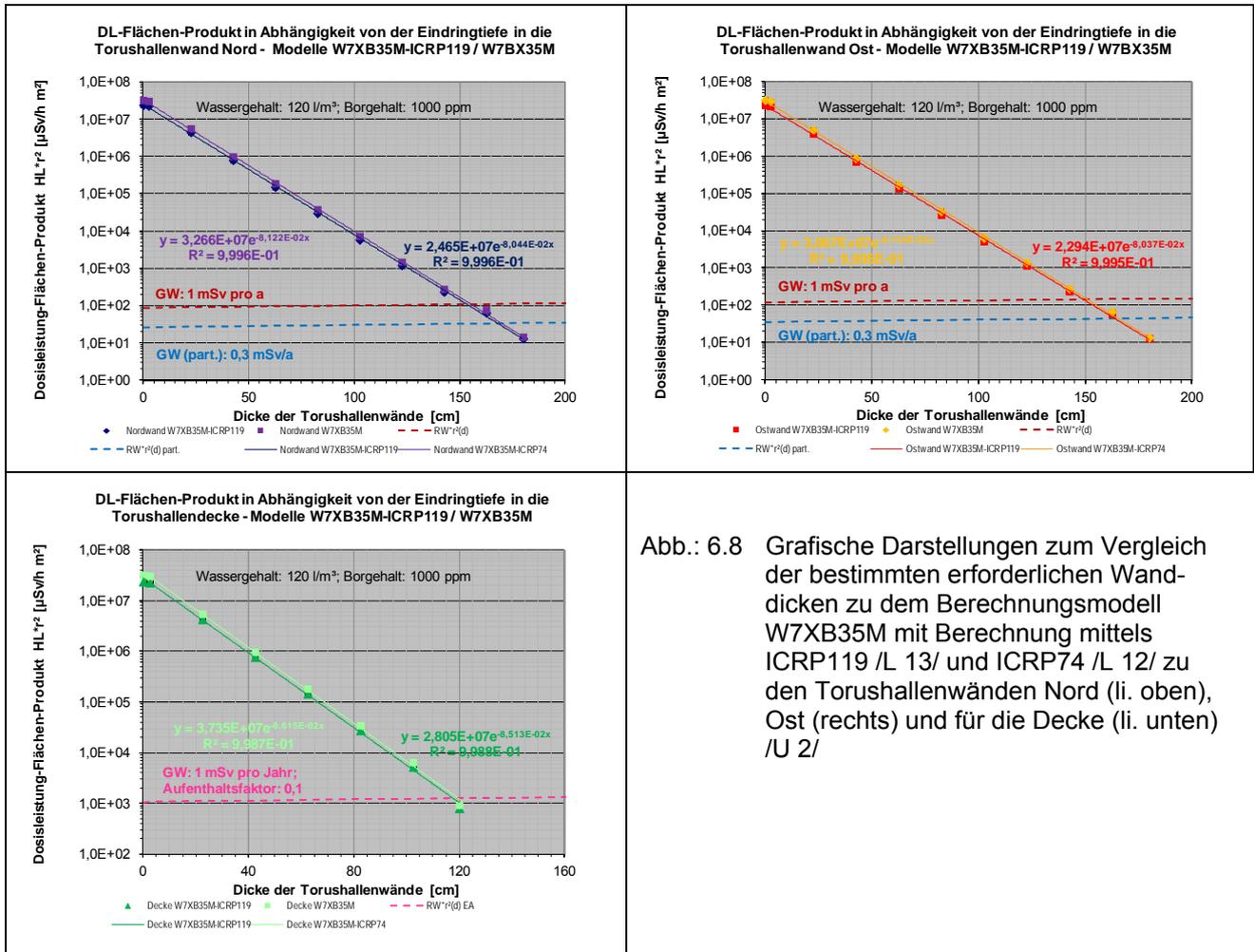


Abb.: 6.8 Grafische Darstellungen zum Vergleich der bestimmten erforderlichen Wanddicken zu dem Berechnungsmodell W7XB35M mit Berechnung mittels ICRP119 /L 13/ und ICRP74 /L 12/ zu den Torushallenwänden Nord (li. oben), Ost (rechts) und für die Decke (li. unten) /U 2/

Die mit dem Gutachten vorgelegten Berechnungen zur Abschirmwirkung der Torushallenwände sind als konservativ zu bewerten. Die Sicherheiten der Torushallenwände sind also noch größer als bei allen bisher durchgeführten Berechnungen zum baulichen Strahlenschutz und der Abschirmwirkung der Torushallenwände. Es ist davon auszugehen, dass dem Minimierungsgebot nach § 6 StrlSchV /R 1/ noch besser entsprochen wird, als in den vorgelegte Unterlagen durch Interpretation der Berechnungsergebnisse dargelegt wurde.

7 Zusammenfassung

Das Max-Planck-Institut für Plasmaphysik (IPP) mit Hauptsitz in Garching plant, am Standort des IPP-Teilinstituts Greifswald das Fusionsexperiment Wendelstein 7-X zu betreiben, das sich gegenwärtig in der Endphase der Errichtung befindet /U 1, U 2, U 3/.

Durch das Schreiben /L 3/ wurde die TÜV SÜD Industrie Service GmbH beauftragt, im Rahmen der Sachverständigentätigkeit nach § 20 AtG die Begutachtung der Einhaltung der Strahlenschutzverordnung im Forschungsexperiment Wendelstein 7-X im Hinblick auf die Schutzwirkungen der Torushalle durchzuführen sowie ggf. Vorschläge für weitere Maßnahmen zu unterbreiten. Der Auftrag umfasst auch die Prüfung der Einhaltung der Auflagen aus der Errichtungsgenehmigung /U 1/ zur Ausführung der Schutzhülle (Torushalle) und Bewertung deren Abschirmeigenschaften hinsichtlich der Erfüllung des Schutzzieles. Details zum Auftragsumfang haben wir in Kapitel 1 dargelegt.

Die Ergebnisse unserer Überprüfungen lassen sich folgendermaßen zusammenfassen:

1. Zur Erfüllung des Prüfauftrages wurde dem Gutachter ein umfangreicher Teil der vorhandenen Unterlagen (Akten, Gutachten, Berechnungen, Pläne u.a.) vorgelegt. Dabei handelt es sich um die Unterlagen, die zur Absolvierung des Prüfumfanges notwendig sind. Nur vereinzelte Berichte (Darstellungen der Komponenten der Fusionsanlage Wendelstein 7-X, bemaßte Darstellungen der Torushalle) mussten vom Gutachter nachgefordert werden. Es ist festzustellen, dass beim Gutachter alle Unterlagen zur Verfügung standen, um belastbare Ergebnisse hinsichtlich der Erfüllung des Prüfauftrages (Begutachtung, erweiterte Untersuchungen, eigenständige Untersuchungen) zu erzielen.
2. Die Prüfung der vorgelegten Unterlagen (s. Anlagen A1 und A3) hat ergeben, dass alle wesentlichen Aussagen zu den baulichen Strahlenschutzmaßnahmen, insbesondere zur Dimensionierung der Torushallenwände und der Strahlenschutzttore, zur Auswahl der Materialien für die Strahlenschutzwände und zur Ausführung der Errichtung der Torushalle sowie der bisher realisierten Medien-Durchführung vorliegen. Mit dem errichteten Baukörper werden die zu stellenden Anforderungen entsprechend dem Stand von Wissenschaft und Technik erfüllt, wodurch nach § 18 Abs. 3 und 4 StrlSchV – alt /R 1/ bzw. nach § 13 Abs. 3 und 4 StrlSchV /R 1/ gewährleistet ist, dass die Schutzvorschriften eingehalten werden. In keinem Fall haben wir bei der Überprüfung der Dimensionierung der Abschirmwände Bereiche

identifiziert, für die der bauliche Strahlenschutz nicht ausreichend berücksichtigt wurde.

Bezüglich zweier Wandbereiche der Torushalle wird es entsprechend unserer Empfehlungen (E3.3/1, E 5/1) erforderlich werden, durch organisatorische Strahlenschutzmaßnahmen den Aufenthalt hinter diesen Wandbereichen für das im IPP tätige Personal zu beschränken, um den gesetzlichen Forderungen hinsichtlich des Minimierungsgebots nach § 6 StrlSchV /R 1/ nachzukommen. Die empfohlenen Aufenthalts- oder Zutrittsbeschränkungen als organisatorische Strahlenschutzmaßnahmen betreffen das Dach der Torushalle und die zentrale Gasversorgung, die entsprechend Planung des Betriebsregimes durch das IPP schon als „abgesperrte Bereiche“ vorgesehen sind. Der Gutachter verwendet explizit nicht den Begriff „Sperrbereich“ nach § 3 Abs. 2 Punkt 33 StrlSchV /R 1/, da es sich bei den besagten Bereichen um Kontrollbereiche und nicht speziell um einen Sperrbereich im Sinne des § 36 Abs. 1 Nr. 3 StrlSchV /R 1/, in dem Dosisleistungen $> 3 \text{ mSv pro Stunde}$ auftreten können, handelt. Bei der vorgesehenen Einstufung der Bereiche und der Umsetzung der Aufenthalts- und Zutrittsrestriktionen können sie als unkritisch für das Personal des IPP eingestuft werden. Die organisatorischen Strahlenschutzmaßnahmen bezüglich Reduzierung der Exposition durch Direktstrahlung dienen ausschließlich der Sicherung des Strahlenschutzes für das Personal des IPP (Aufenthalt im Nahbereich unmittelbar hinter den Torushallenwänden), sie haben keinerlei Auswirkungen auf den Strahlenschutz für die Bevölkerung außerhalb des Gebäudes bzw. des Betriebsgeländes oder auf die Umwelt (Fernbereich).

3. Sowohl mit den vorliegenden Unterlagen als auch durch zusätzliche Untersuchungen, die der Gutachter empfohlen hat (ergänzende Beprobung mittels Kernbohrungen) bzw. die vom Gutachter selbstständig ausgeführt wurden (zusätzliche Berechnungen zur Verifikation der Datenlage, Bewertung von Einflussgrößen), konnte der Nachweis erbracht werden, dass die Grenzwerte für die effektive Dosis nach StrlSchV /R 1/ eingehalten werden. Das gilt sowohl für das Personal des IPP, das während des Betriebes des Fusionsexperiments in unmittelbarer Nähe zur Torushalle tätig wird, als auch für die Bevölkerung in der Umgebung der Torushalle und für die Umwelt.

Der Nachweis dazu wurde - neben der Auswertung der zahlreichen Berichte und Gutachten /U 4- U 9, U 18, U 19, U 21, U 24 - U 31/ - vor allem mit der Ausführung eigener Monte-Carlo-Simulationsrechnungen zum geplanten Fusionsexperiment mit der vorgesehenen Abschirmgeometrie der Torushalle (ausgeführte Wanddicken und geplante Betonparameter - Dichte, Bormassenanteil, Wasservolumenanteil der Strahlenschutzwände) in den Kapiteln 3.1 und 3.2 geführt. Die Methode wird in Anlage C detailliert beschrieben.

4. Zur Begutachtung der Risse im Sinne des baulichen Strahlenschutzes führte der Gutachter eine Begehung im Max-Planck-Institut für Plasmaphysik Greifswald (IPP) durch, deren Ziel es war, Risse an der Deckenunterseite fotodokumentarisch zu erfassen und aus der Sicht des baulichen Strahlenschutzes zu bewerten. Bei der Begehung wurden entsprechend Begehungsbericht /L 6/ keine Risse vorgefunden. Entsprechend der gutachterlichen Stellungnahme /L 8/ erfolgte die durchgeführte Sanierung der Risse aus der Sicht des Strahlenschutzes fachgerecht. Die Anforderungen an den Baukörper der Torushalle hinsichtlich der notwendigen Abschirmwirkung gegen Neutronen- bzw. Photonenstrahlung und somit bezüglich der Einhaltung der Grenzwerte für die effektive Dosis nach StrlSchV /R 1/ werden nicht durch Rissbildung im Baukörper beeinträchtigt.

In der Stellungnahme /L 8/ wurde des Weiteren vom Gutachter die Anbringung der Halterungen an die Torushallenwände aus der Sicht des Strahlenschutzes als fachgerecht eingeschätzt (Kap. 4.1). Eine Reduzierung der Abschirmwirkung der Strahlenschutzwände ist auszuschließen. Es wurden keine Mängel identifiziert.

5. Mit der gutachterlichen Stellungnahme /L 8/ wurde dargelegt, dass alle direkten Wanddurchbrüche, d.h. Großer Kabelkanal, ECRH-Kanal, Kryokanal, die sechs Bohrungen ins Rudix-Labor in der Nordwand (1. UG) sowie der Durchbruch zur Gasversorgung in der Südwand (1. UG) in einer Begehung vor Ort begutachtet und fotodokumentarisch erfasst wurden. Im Bereich der Zentralen Gasversorgung (C1) empfiehlt der Gutachter für die Dauer des Experimentes die Einrichtung eines temporär abgesperrten Bereiches (siehe Punkt 1. des Kapitels). Zusammenfassend bestehen aus der Sicht des Gutachters keine Einwände gegen die in der Zusammenstellung des IPP /U 32/ beschriebene Vorgehensweise, für die Wanddurchbrüche geeignete Abschirmmaßnahmen oder organisatorische Lösungen zu finden, um die Einhaltung des Grenzwertes der effektiven Dosis von 1 mSv pro Kalenderjahr nach § 46 StrlSchV /R 1/ für das Personal zu gewährleisten.

6. Wesentliche Teile des Gutachtens beschäftigen sich mit wichtigen Fragestellungen bezüglich der strahlenschutzrelevanten Betongüteparameter (Dichte, Wassergehalt, Borgehalt) und der Sicherung der Homogenität und Konstanz dieser Parameter in allen Wandbereichen der Torushalle sowie deren Auswirkungen auf den realisierten Strahlenschutz bei identifizierten Schwankungen. Dazu wurden sowohl die vorliegenden Messergebnisse aus früheren Probenahmen (Rückstellproben beim Betonieren) und Bohrkerne statistisch ausgewertet und die Schwankungen bewertet, als auch ergänzende Beprobungen der Torushallenwände mittels Kernbohrungen initiiert und die aktuellen Ergebnisse ausgewertet. Zur Ausgangslage für die Begutachtung stellen wir fest:
- a) Alle während der Betonierarbeiten 1997 genommenen Rückstellproben, die nicht zur Auswertung mittels nicht zerstörungsfreier Analyse-Verfahren herangezogen wurden, werden trocken und sicher verwahrt im IPP gelagert, wovon sich der Gutachter bei einer Begehung überzeugt hat.
 - b) Zur Qualitätssicherung bzw. zum messtechnischen Nachweis der Betongüteparameter wurden im Jahre 1998 48 Rückstellproben hinsichtlich des Borgehaltes analysiert und davon 4 Proben aus der Bodenplatte hinsichtlich der Dichte und des Wassergehaltes ausgewertet. Im Jahr 2000 wurden vier Bohrkerne aus den Torushallenwänden hinsichtlich des Borgehaltes und des Wassergehaltes analysiert, wobei von einer Betondichte von $2,27 \text{ g/cm}^3$ ausgegangen wurde. Wir konnten in den vorliegenden Unterlagen zur Beprobung keine einheitliche Strategie hinsichtlich deren Auswertung erkennen. Die Analyse der Proben war offenbar gemäß den speziellen fachlichen Ausrichtungen der Gutachter in Auftrag gegeben, denn zu keiner Probe wurden die drei wesentlichen Größen Dichte, Wasser- und Borgehalt simultan ermittelt.
Erst mit der Beprobung zu den Strahlenschutztores mittels Kernbohrung zeigt sich eine neue Qualität, denn alle relevanten Parameter wurden hier berücksichtigt.
 - c) Die Auswertung der Betonparameter erfolgte in bauphysikalischen Laboren oder Baustofflaboren (Labor für Berliner Wasser Betriebe /U 15/; IBB für /U 20, U 47/). In keinem der vorgelegten Berichte wurden detaillierte Aussagen zu den Analyseverfahren gemacht, wo doch eine Fehlerbetrachtung für die exakte Bewertung der Messgrößen von entscheidender Bedeutung ist.

- d) Bei der Auswertung der Messergebnisse wurden in einigen Gutachten und Berichten Mittelwerte über wenige Einzelproben bestimmt und diese als statistische Größen bewertet und diskutiert, ohne dabei zu berücksichtigen, dass eigentlich der Gesamtprozess (Betonmischen, Betonieren, Probenahme und Messung), also die Gesamtheit der einzelnen Ereignisse, statistisch auszuwerten und zu interpretieren ist. Die Mittelwerte aller relevanten Einzelmessungen wurden im Kapitel 3.3.1 zusammengestellt und bewertet, sie werden im folgenden Abschnitt kurz beschrieben.

Aufgrund der geschilderten Ausgangslage ergeben sich folgende Erkenntnisse: Zur Bewertung der Datenlage hinsichtlich der Betonparameter der Torushallenwände wurden in vorgelegten Unterlagen /U 15, U 20/ meist nur probenbezogene Auswertungen vorgenommen und durch Mittelung über einzelne Probeanteile (oben-unten, innen-außen) eine statistische Interpretation versucht, die wenig aussagekräftig ist, weil Statistik mit kleinen Häufigkeiten große Unsicherheiten aufweist und somit einen großen Interpretationsspielraum mit sich bringt. Bei der statistischen Bewertung der Messgrößen der Betonparameter geht es nicht um Einzelproben oder kleine Proben-Gruppen, sondern um die Bewertung und Interpretation des Gesamtprozesses und damit aller vergleichbaren Einzelproben. Die in den vorgelegten Berichten und Gutachten durchgeführte Interpretation der Messwerte führt zu einer Überbewertung von Messwerten, die im Rahmen der Statistik unterhalb des berechneten Mittelwertes liegen.

Die Prüfaufgabe bestand also darin, den Gesamtprozess zur Herstellung der Torushallenwände hinsichtlich der Einhaltung der vorgegebenen Größe der Betonparameter und deren Schwankungsbreiten zu bewerten. Dieser Gesamtprozess besteht aus den Teilprozessen Betonmischen, Betonieren und Probenahme sowie der Messung und Auswertung der Betonparameter. Die Messgröße und ihr statistischer Fehler erlaubt eine Aussage über die Summe der Einzelprozesse. Die Schwankungsbreite eines Betonparameters ermittelt sich aus den Schwankungsbreiten der einzelnen Prozesse. Es ist davon auszugehen, dass der Prozess der Messung und Auswertung in den Baustofflaboren den kleinsten statistischen Fehler aufweist, der im Vergleich zu den anderen Prozessen vernachlässigbar ist.

Die in Kapitel 3.3.1.1 zusammengestellten Ergebnisse wurden mittels einfacher statistischer Betrachtungen ermittelt. Dabei zeigt insbesondere der Mittelwert für den Borgehalt der 48 Rückstellproben (je 48 Proben unten bzw. oben), dass diese Inter-

pretation und Herangehensweise korrekt ist. Der Mittelwert des Bormassenanteils und der statistische Fehler (mit 95% Vertrauensbereich) des Mittelwertes betragen (1030 ± 20) ppm. Für die Betondichte ergibt sich ein Mittelwert von $(2,27 \pm 0,05)$ g/cm³. Aus der Häufigkeitsverteilung des Bormassenanteils (Abb. 3.8 a) wird deutlich, dass die Messwerte zum Borgehalt nahezu ideal einer Normalverteilung entsprechen. Analoge Ergebnisse liefern auch die anderen Auswertungen, obwohl dort aufgrund der geringeren Zahl der Einzelmessungen eine Normalverteilung nicht ausgeprägt ist.

Aufgrund der wenigen Daten zum Wassergehalt in den Torushallenwänden wurden vom Gutachter ergänzende Probenahmen mittels Kernbohrungen für notwendig erachtet. Diese Proben wurden an Punkten der Torushallenwände genommen, die aus einer Anzahl repräsentativer Punkte vom Gutachter stichprobenartig ausgewählt wurden. Die beschriebene statistische Auswertung ergab für die Bohrkerne einen mittleren Bormassenanteil von (1052 ± 49) ppm und einen mittleren Wasservolumenanteil von (144 ± 7) l/m³. Mit den ergänzenden Probenahmen und den Messergebnissen, die konsistent zu in früheren Gutachten ermittelten Werten sind, ist die Datenlage zu den strahlenschutzrelevanten Betonparametern ausreichend.

Die Rückverfüllung der Bohrlöcher wurde streng entsprechend der vom Gutachter erstellten Handlungsanweisung /L 7/ anforderungsgerecht ausgeführt. Das erreichte Ergebnis wird hinsichtlich der Anforderungen des Strahlenschutzes als abdeckend eingeschätzt.

7. Neben dem Nachweis zu gesicherten Größen der Betonparameter, der im Wesentlichen über die einfache statistische Auswertung der Messwerte erbracht wurde, ist die reale Schwankungsbreite der gemittelten Betonparameter von großer Bedeutung für die Interpretation der Messwerte und die Bewertung der Wirksamkeit der Abschirmung in allen relevanten Wandbereichen der Torushalle. Dazu wurden durch den Gutachter umfangreiche Berechnungen zum Abschirmverhalten der Torushallenwände unter Variation des Wasservolumenanteils bzw. des Bormassenanteils durchgeführt. Durch die Variationen dieser Betonparameter kommt es zu geringen Variationen der berechneten Betondichte, da diese vom Wassergehalt und der Masse des Borzuschlagstoffes Colemanit abhängig ist. Als Ausgangswert für die Monte-Carlo-Simulationen wurde die typische Mixtur des Los-Alamos-Concrete /L 11/ mit der Dichte von 2,251 g/cm³ verwendet, was als konservativer Wert angesehen werden kann.

Die Berechnungen zur Variation des Wasser- und Boranteils des Borbetons der Torushallenwände werden im Kapitel 3.3.3 im Detail vorgestellt. Dabei werden für die Variation des Wassergehaltes ein Intervall von 100 ... 150 l/m³ betrachtet und beim Borgehalt der Wertebereich 0 ... 1100 ppm (bzw. bis 10000 ppm) untersucht. Ausgangspunkt der Berechnungen ist das Modell W7XB35M mit den Betonparametern: Dichte von 2,214 g/cm³, Wasservolumenanteil von 120 l/m³ und Bormasseanteil von 1000 ppm. Aus diesen Berechnungen ergeben sich die folgenden Resultate für die Dosisleistung hinter der jeweiligen Abschirmwand und die Anforderungen an die Torushallenwände hinsichtlich deren Dicke, um die gesetzlich vorgeschriebenen Grenzwerte nach StrlSchV /R 1/ sicher einzuhalten.

- Variation des Wassergehalts:

- a) Für die Torushallenwände Nord und Ost liegt die Dosisleistung hinter der jeweiligen Wand (s. Abb. 3.13) im gesamten Wertebereich deutlich unterhalb des Grenzwertes von 1 mSv im Kalenderjahr (Aufenthaltsfaktor 1; entspricht 2000 Arbeitsstunden pro Jahr) nach § 46 StrlSchV /R 1/. Das gilt ebenso, wenn man aufgrund von Ableitungen nach § 47 StrlSchV einen reduzierten Grenzwert von 0,3 mSv pro Kalenderjahr voraussetzen würde. Variationen des Wassergehaltes im Beton der Torushallenwände mit einer Dicke von 180 cm und einem Borgehalt von 1000 ppm führen unter keinen Umständen zu einer Unterschreitung der erforderlichen Abschirmwirkung. Bei den Torushallenwänden wäre eine Mindestwanddicke von 161 cm (Nordwand) bzw. 155 cm (Ostwand) ausreichend, um den Grenzwert der effektiven Dosis von 1 mSv pro Kalenderjahr sicher einzuhalten.
- b) Bei der Torushallendecke liegt die Dosisleistung oberhalb der Decke (auf dem Dach, s. Abb. 3.13) für einen angenommenen Wassergehalt > 110 l/m³ deutlich unterhalb des Grenzwertes von 1 mSv im Kalenderjahr (Aufenthaltsfaktor 0,1; entspricht 200 Arbeitsstunden pro Jahr) nach § 46 StrlSchV /R 1/. Die erforderlichen Mindestwandstärken variieren im betrachteten Intervall 110...150 l/m³ im Bereich 115- 120 cm, um bei einem Aufenthaltsfaktor von 0,1 den Grenzwert von 1 mSv pro Jahr sicher einzuhalten.

- Variation des Borgehalts:

- a) Für die Torushallenwände Nord und Ost liegt die Dosisleistung hinter der jeweiligen Wand (s. Abb. 3.16) im gesamten Wertebereich deutlich unterhalb des Grenzwertes von 1 mSv im Kalenderjahr (Aufenthaltsfaktor 1; entspricht 2000 Arbeitsstunden pro Jahr) nach § 46 StrlSchV /R 1/. Das gilt ebenso, wenn man aufgrund von Ableitungen nach § 47 StrlSchV einen reduzierten Grenzwert von 0,3 mSv pro Kalenderjahr voraussetzen würde. Variationen des Borgehaltes im Beton der Torushallenwände mit einer Dicke von 180 cm und einem Wassergehalt von 120 l/m³ führen unter keinen Umständen zu einer Unterschreitung der erforderlichen Abschirmwirkung. Bei den Torushallenwänden wäre eine Mindestwanddicke von 160 cm (Nordwand) bzw. 155 cm (Ostwand) ausreichend, um den Grenzwert der effektiven Dosis von 1 mSv pro Kalenderjahr sicher einzuhalten.
- b) Bei der Torushallendecke liegt die Dosisleistung oberhalb der Decke (auf dem Dach, s. Abb. 3.16) bei einem angenommenen Borgehalt > 400 ppm deutlich unterhalb des Grenzwertes von 1 mSv im Kalenderjahr (Aufenthaltsfaktor 0,1; entspricht 200 Arbeitsstunden pro Jahr) nach § 46 StrlSchV /R 1/. Die erforderlichen Mindestwanddicken variieren im betrachteten Intervall von 400 bis 1100 ppm Bor im Bereich 119 - 120 cm, um den Grenzwert von 1 mSv pro Kalenderjahr (bei Aufenthaltsfaktor 0,1) sicher einzuhalten.

Als Resümee der Variationsbetrachtungen stellen wir fest, dass die Abschirmwirkung der bestehenden Torushallenwände ausreichend ist, um den Grenzwert von 1 mSv pro Kalenderjahr nach § 46 StrlSchV /R 1/ sicher einzuhalten, selbst wenn der Wassergehalt in einzelnen Wandbereichen von 100 bis 150 l/m³ schwanken sollte. Wie die Auswertung der Betonproben ergeben hat, beträgt der Wassergehalt (206 ± 25) l/m³ in der Betonplatte /U 15/ bzw. (144 ± 7) l/m³ in den Torushallenwänden /U 46/. Damit wird die ausgeführte Wanddicke der Torushallenwände von 180 cm bzw. der Torushallendecke von 120 cm in Borbeton mit den messtechnisch ermittelten Betonparametern [Dichte: ($2,27 \pm 0,05$) g/cm³; Wassergehalt: (144 ± 7) l/m³; Borgehalt: (1052 ± 49) ppm] als abdeckend für die erforderliche Abschirmwirkung auch hinsichtlich von Schwankungen des Wassergehalts bewertet.

Des Weiteren konnte nachgewiesen werden, dass die Abschirmwirkung der bestehenden Torushallenwände ausreichend ist, um den Grenzwert von 1 mSv pro Jahr

nach § 46 StrlSchV /R 1/ sicher einzuhalten, selbst wenn der Borgehalt in einzelnen Wandbereichen von 400... 1110 ppm schwanken sollte. Wie die Auswertung der Betonproben gezeigt hat, liegt der Borgehalt bei Werten von (1030 ± 20) ppm für die Rückstellproben der Torushalle /U 15/ bzw. (1052 ± 49) ppm in den Bohrkernen der Torushallenwände /U 46/. Damit wird die ausgeführte Wanddicke der Torushallenwände von 180 cm bzw. der Torushallendecke von 120 cm mit Borbeton als abdeckend für die erforderliche Abschirmwirkung auch hinsichtlich von Schwankungen des Borgehaltes bewertet.

8. Die Berechnungen nach dem technischen Bericht /U 18/ betreffen ausschließlich den unteren, aus Barytbeton mit Borcarbid-Zusatz in einer Dicke von 100 cm bestehenden Teil des Montagetors. Der Bericht führte dazu, dass dieser Teil durch eine 35 cm dicke Polyethylen-Schicht verstärkt wurde. Durch detaillierte Betrachtungen und Berechnungen mittels Monte-Carlo-Simulationen konnte in einem weiteren Bericht /U 21/ nachgewiesen werden, dass die Strahlenschutzttore die Anforderungen des Strahlenschutzes erfüllen, insbesondere wird der Grenzwert von 1 mSv im Kalenderjahr (Aufenthaltsfaktor 0,1; entspricht 200 Arbeitsstunden pro Kalenderjahr) nach § 46 StrlSchV /R 1/ im gesamten Bereich der Strahlenschutzttore, auch im unteren Bereich mit der Polyethylen-Schicht nach Bericht /U 18/, eingehalten. Die Strahlenschutzttore (Montagetor, Personaltor) werden in den vorliegenden Ausführungen als abdeckend angesehen und vom Gutachter entsprechend den Anforderungen der StrlSchV /R 1/ als ausreichend bewertet.
9. Mit dem vorgelegten Gutachten wurden die wesentlichen Einschätzungen zu den Berechnungsmodellen hinsichtlich der Bewertung des Baukörpers der Torushalle eingebracht. So wurde mittels zusätzlicher Berechnungen nachgewiesen, dass es bei den Simulationsberechnungen vertretbar ist, die aus Konkurrenzreaktionen (2a, 2b) entstehenden Neutronen mit einer Energie von 14 MeV bei der Dimensionierung der Torushallenwände und -decke zu vernachlässigen. Die damit erfolgte Unterschätzung der Abschirmung beträgt ca. 2-2,5 cm (1-2%). Dies wird durch die ausgeführte Dicke der Torushallenwände von 180 cm und der Torushallendecke von 120 cm mehr als ausgeglichen (s. Kapitel 6.1).

Durch Anwendung der Flussdichte-Dosisleistungsfunktion gemäß ICRP74 /L 12/ zur Berechnung der von den Nuklearteilchen generierten Dosisleistung, mit der nahezu alle Berechnungen in den vorgelegten Unterlagen /ab U 8/ und dem Gutachten durchgeführt wurden, werden konservative Ergebnisse erzielt, d.h. die

Torushallenwände werden um ca. 1 % überschätzt, was bei Betondicken von 120 bis 180 cm maximal 2 cm entsprechen kann. Die angewendeten Berechnungsverfahren zur Ermittlung der Dosisleistung führen entsprechend dem aktuellen Stand von Wissenschaft und Technik nach ICRP119 /L 13/ zu einer geringfügigen, systematischen Überschätzung der Dicke der Torushallenwände (s. Kapitel 6.2).

Damit stellen wir fest, dass die Sicherheit der Torushallenwände noch größer ist, als in allen bisher durchgeführten Berechnungen /U 4 - U 9, U 18, U 19, U 21, U 24 - U 31/ nachgewiesen wurde. Der rechnerische Nachweis wurde für die Nord- und Ostwand erbracht. Wenn der bauliche Strahlenschutz für die Nord- und Ostwand erfüllt ist, dann ist er für die anderen Wände wegen des größeren mittleren Abstandes zur quasi-isotropen Strahlenquelle erst recht garantiert (vergleiche Abb. F01).

10. Von den Auflagen der Errichtungsgenehmigung /U 1/ umfasst nur Auflage 5.1.12 die Genehmigungsvoraussetzungen nach § 18 Abs. 3 und 4 StrlSchV – alt /R 1'/ bzw. nach § 13 Abs. 3 und 4 StrlSchV /R 1/, die unmittelbar die Einhaltung der Grenzwerte und den Schutz der Bevölkerung sowie der Umwelt betreffen, und somit direkt den baulichen Strahlenschutz, insbesondere die Ausführung der Torushallenwände bzw. -decken als Schutzhülle, behandeln. In der Unterlage /U 15/ werden die Ausführung der Betonierarbeiten und deren Qualitätssicherung hinsichtlich homogener Einbringung und Realisierung der erforderlichen Betonmixturen beschrieben. Es wird ebenso auf die Gutachten und Berichte /U 11, U 12, U 14/ hingewiesen, in denen die Betonqualitäten und Betonzusammensetzungen nachgewiesen werden. Des Weiteren haben zusätzliche Probenahmen des Borbetons und deren Analyseergebnisse /U 20, U 46/ und nicht zuletzt die Untersuchungen in diesem Gutachten den Nachweis für die anforderungsgerechte Ausführung der Torushalle als Schutzhülle erbracht.

Damit stellen wir fest, dass sowohl die Sicherung des Strahlenschutzes entsprechend der Genehmigungsvoraussetzungen nach § 13 Abs. 3 und 4 StrlSchV /R 1/ als auch die Erfüllung der Auflage 5.1.12 der Errichtungsgenehmigung /U 1/ gewährleistet sind.

Als Fazit lässt sich feststellen:

Mit den vorgelegten Unterlagen und den erweiterten Untersuchungen (Kernbohrungen, Berechnungen zur Abschirmwirkung und Variation der Betonparameter) konnte nachgewiesen werden, dass der gemäß den Anforderungen an die Betonparameter /U 1, U 2/ errichtete Baukörper (Torushalle und Tore) den Anforderungen des Strahlenschutzes

hinsichtlich Erfüllung des Schutzzieles vollumfänglich durch eine fachgerechte Planung (Materialien, Dimensionierung) und qualitätsgerechte Rohbauausführung gerecht wird. Er garantiert insbesondere die zuverlässige Unterschreitung der Grenzwerte der effektiven Dosis im Kalenderjahr für das Personal, die Bevölkerung und die Umwelt nach §§ 46 und 55 StrlSchV /R 1/.

Hiermit wird versichert, dass das Gutachten unparteiisch und nach bestem Wissen und Gewissen frei von Weisungen hinsichtlich des Ergebnisses erstellt wurde.

Dresden, 23.10.2013

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Michael Bittner'.

Dr. Michael Bittner
Region Nordost
Leitung Strahlenschutz

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Jens Richter'.

Jens Richter
Region Nordost
Abteilung Strahlenschutz

Anlagen

A Verwendete Unterlagen

A 1 Begutachtungsunterlagen

- U 1 LAGuS: Genehmigung Nr. MGS 97401 zur Errichtung von Anlagen zur Erzeugung ionisierender Strahlung vom 18.12.1997
- U 2 IPP: Sicherheitsbericht für den Antrag auf Errichtungsgenehmigung gemäß § 15 StrlSchV (alt) für das Experiment Wendelstein 7-x im Max-Planck-Institut für Plasmaphysik – Teilinstitut Greifswald, vom Mai 1997
- U 3 Prüfstelle für Strahlenschutz München: Gutachten zum Sicherheitsbericht, Stand Mai 1997 (endgültig) von Dipl.-Phys. Klaus Göttel vom 08.12.1997
- U 4 GRS: Berechnungen von Abschirmungen und Dosisleistung für die Anlage Wendelstein 7-X, Bericht Nr. 1 vom 20.03.1996
- U 5 GRS: Berechnungen von Abschirmungen und Dosisleistung für die Anlage Wendelstein 7-X, Bericht Nr. 2, Dr. U. Quade, W. Weber vom 16.04.1996
- U 6 GRS: Berechnungen von Abschirmungen und Dosisleistung für die Anlage Wendelstein 7-X, Bericht Nr. 3, Dr. U. Quade, K. Hummelsheim, K.H. Hiddemann vom 07.05.1996
- U 7 GRS: Ergänzende Berechnungen zu Bericht Nr. 3, Dosisleistung nach einer borierten Normalbetonwand, Berichte Nr. 3a und 3b, Dr. U. Quade vom 22.05.1996
- U 8 GRS: Aktivierung der Torushalle, Bericht Nr. 5, Dr. U. Quade, K. Hummelsheim vom 03.09.1996
- U 9 IPP: Neutrons at W 7-X, IPP Report 2/341, J. Junkers, A. Weller, October 1998
- U 10 IPP: Protokoll zum 4. Treffen: W7-X Errichtungsgenehmigung vom 03.02.1997

- U 11 TU Berlin: Hinweise zur Ausschreibung für einen Strahlenschutzbeton WU B II als Massenbeton mit Bor-Zusatz, Prof. Dr. B. Hillemeier vom 07.04.1997
- U 12 TU Berlin: Hinweise zur Ausschreibung für einen Strahlenschutzbeton WU B II als Massenbeton mit Bor-Zusatz – Nachtrag zur Festigkeitsentwicklung, Prof. Dr. B. Hillemeier vom 22.05.1997
- U 13 Philipp Holzmann: Bericht B4-1279, Eignungsprüfung für Strahlenschutzbeton mit Colemanit vom 14.10.1997
- U 14 TU Berlin: Rückbestimmung des Borgehalts im Beton, Prof. Dr. B. Hillemeier vom 17.10.1997
- U 15 Bericht-Nr.97-0997/2, Qualitätssicherung zur Gewährleistung einer homogenen Verteilung des Bors im Beton, Prof. Dr. B. Hillemeier vom 21.12.1998
- U 16 Philipp Holzmann: Bericht B4-1287, Eignungsprüfung Schwerbeton mit Barytzuslag und Zusatzstoff Borcarbide vom 30.09.1998
- U 17 GRS: Berechnung der Dosisleistungen und Aktivierungen am Personalort des Wendelstein 7-X, Technischer Bericht, K. Gewehr, K. Hummelsheim, U. Quade vom 23.08.2000
- U 18 GRS: Wendelstein 7X, Dosisberechnung am Einfahrtstor, Bericht Nr. 6, K. Hummelsheim, U. Quade vom 22.09.1996
- U 19 GRS: Dosisleistungen und Aktivierungen am Personalort des Wendelstein 7-X, Bericht Nr. 7 und Ergänzungsbericht Nr. 7a, K. Hummelsheim, U. Quade vom 22.01.1998 / 25.02.1998
- U 20 IBB: Gutachten, 1. Ausfertigung, 16248-GA-01, O. Joers vom 18.12.2012
- U 21 Grünauer: Monte Carlo Simulationen zum Hallentor am Stellarator Wendelstein 7X, F. Grünauer vom 17.09.2012

- U 22 IPP: Protokoll zum 11. Festlegungstreffen für die Betriebsgenehmigung nach § 11 StrlSchV für das Experiment W7-X vom 23.05.2012
- U 23 IPP: Protokoll zum 3. Festlegungstreffen zur Erarbeitung einer Betriebsgenehmigung vom 05.05.2000
- U 24 IPP: Protokoll zum 10. Festlegungstreffen für die Betriebsgenehmigung nach § 11 StrlSchV für das Experiment W7-X vom 30.09.2011
- U 25 Aschauer: Abschirmstudie über die Durchführung für den Pelletinjektor in der W7-X-Torushallen-Diagnostikraum-Zwischenwand, J. Aschauer vom 26.09.2003
- U 26 Aschauer: Abschirmstudie zur Auslegung der Durchführung für die Thomsonstreuung-Laser in der W7-X-Torushallen-Diagnostikraum-Zwischenwand, J. Aschauer vom 29.02.2004
- U 27 GRS: Bericht Nr. 4, Dr. U. Quade, K. Hummelsheim, R. Hiddemann vom 01.09.1996
- U 28 Grünauer: Monte Carlo Simulationen zum Neutronen- und Gammastrahlungs-Transport in den Hallen des Wendelstein 7-X Stellarators, F. Grünauer vom 07.01.2009
- U 29 Grünauer: Monte Carlo Simulationen zur Abschirmwirkung verschiedener Materialien für Abschirmburgen für Kanäle durch die Hallenwände des Stellarators Wendelstein 7-X, F. Grünauer vom 14.02.2011
- U 30 Grünauer: Monte Carlo Simulationen zu Abschirmburgen außerhalb von Kanälen durch die Hallenwand des Stellarators Wendelstein 7-X, F. Grünauer vom 11.05.2011
- U 31 Grünauer: Monte Carlo Simulationen zum ECRH-Kanal und zu einem Labyrinth als Durchgang zur Torushalle am Stellarator Wendelstein 7-X, F. Grünauer vom 15.05.2012

- U 32 IPP: Zusammenstellung aller Öffnungen in der Strahlenschutzwand der W7-X Torushalle und ihrer Abschirmungen, R. Schwibbe vom 18.12.2012
- U 33 SM: Aktenvermerk zur Beratung zu den Deckenrissen und Kobaltgehalt der Stähle, IX 630-415.311.797.001 vom 24.11.1998
- U 34 IPP: Notiz über Risse in der Decke der Torushalle, Dr. G. Mauser vom 03.08.1998
- U 35 IPP: Protokoll zur Besprechung am 28.07.1998 zum Thema: Geb.0, Risse in Torusdecke vom 11.08.1998
- U 36 ARGE Rohbau IPP Wendelstein: Geb.0, Risse in Torusdecke vom 08.09.1998
- U 37 Leonhardt, Andrä und Partner: Stellungnahme zu den Rissen an der Decke in der Torushalle, Dr. W. Haumer vom 30.07.1998
- U 38 IPP: Protokoll zum 5. Festlegungstreffen zur Erarbeitung einer Betriebsgenehmigung vom 02.11.2001
- U 39 IPP: Protokoll zum 6. Festlegungstreffen zur Erarbeitung einer Betriebsgenehmigung vom 21.02.2003
- U 40 IPP: Protokoll zum 8. Festlegungstreffen zur Erarbeitung einer Betriebsgenehmigung vom 15.06.2005
- U 41 IPP: Protokoll zum 9. Festlegungstreffen zur Erarbeitung einer Betriebsgenehmigung vom 10.06.2008
- U 41 IPP: Gebäudepläne (nicht bemaßt, ohne Nummerierung) vom 20.04.2013, zugesandt per Email vom 12.02.2013, per Email am 18.02.2013
- U 42 IPP: Bemaßte Schnittdarstellungen der Torushalle und der angrenzenden Räume (ohne Nummerierung und Datum), zugesandt per Email am 18.02.2013



- U 43 IPP: Bemaßte Schnittdarstellungen und weitere Darstellungen unter dem Titel „Unternehmung Wendelstein 7-X“, (ohne Datum), zugesandt per Email am 02.05.2013

- U 44 IPP: Zusammenfassung Strahlenschutzore vom 22.01.2013

- U 45 IPP: Zusammenfassung Strahlenschutzwände vom 20.08.2012

- U 46 IBB: Gutachten, 1. Ausfertigung, 16248-GA-02, O. Joers vom 30.04.2013

- U 47 IPP: Protokolle zur Rückverfüllung der Bohrlöcher in den Torushallenwänden zu den Proben-Nr. 4, 6, 7, 9 ,11 und 14 (sechs Protokolle) vom 10.09.2013

- U 48 IPP: Protokolle zur Rückverfüllung der Bohrlöcher in den Strahlenschutzoren zu den Proben-Nr. 1 – 6 (Montagetor – großes Tor, sechs Protokolle) und zu den Proben-Nr. 7 und 8 (Personaltor – kleines Tor, zwei Protokolle) vom 11.09.2013

A 2 Gesetze, Verordnungen, Regeln, Richtlinien und Normen

- R 1 Verordnung über den Schutz vor Schäden durch ionisierende Strahlen (Strahlenschutzverordnung - StrlSchV) vom 20.07.2001 (BGBl. I, S. 1714) mit letzter Änderung vom 24.02.2012 (BGBl. I, S. 212)
- R 1' Verordnung über den Schutz vor Schäden durch ionisierende Strahlen („Alte“ Strahlenschutzverordnung – StrlSchV alt) vom 13.10.1976 i.d.F. der Bekanntmachung vom 30. Juni 1989 (BGBl. I, S. 1321, 1926)
- R 2 Atomgesetz / Gesetz über die friedliche Verwendung der Kernenergie und den Schutz gegen ihre Gefahren (AtG) vom 15.07.1985 (BGBl. I, S. 1565) mit letzter Änderung vom 08.11.2011 (BGBl. I S. 2178)
- R 3 DIN EN 12504-1: Prüfung von Beton in Bauwerken
Teil 1: Bohrkernproben, 07/2009
- R 4 BAW-Merkblatt der Bundesanstalt für Wasserbau „Bohrkernentnahme für Bauwerksuntersuchungen (MBK)“, Ausgabe 2012
- R 5 BAW-Merkblatt der Bundesanstalt für Wasserbau „Zweitbeton (MZB)“, Ausgabe 2012,
- R 6 Richtlinie des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton (DAfStB): Herstellung und Verwendung von zementgebundenem Vergussbeton und Vergussmörtel, Ausgabe 2011
- R 7 BMI: Rahmenrichtlinie über die Gestaltung von Sachverständigengutachten in atomrechtlichen Verwaltungsverfahren vom 15.12.1983 (GMBI. 1984, Nr. 2, S. 21)
- R 8 DIN EN 1992-1-1: Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken – Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau; Deutsche Fassung EN 1992-1-1:2004 + AC:2010, 01/2011



- R 9 DIN EN 1992-1-1/NA: Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter
– Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken – Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau, 04/2013
- R 10 DIN 25413: Klassifikation von Abschirmbetonen nach Elementarteilchen
Teil 1: Abschirmung von Neutronenstrahlung 06/1991; Entwurf 02/2012
Teil 2: Abschirmung von Gammastrahlung 07/1991; Entwurf 02/2012

A 3 Schriftverkehr, Gutachten, Literatur und Veröffentlichungen

- L 1 LAGuS: Angebotsaufforderung an die TÜV SÜD Industrie Service GmbH vom 15.10.2012, Akteneichen: LAGuS1, Angebotsaufforderung für die Erstellung eines Sachverständigengutachtens zur Einhaltung der Strahlenschutzverordnung im Forschungsexperiment Wendelstein 7-X im Hinblick auf die Schutzwirkung der Torushalle sowie ggf. Unterbreitung von Vorschlägen für weitere Maßnahmen

- L 2 TÜV SÜD Industrie Service GmbH: Schreiben an das LAGuS vom 16.11.2012, Angebot für die Erstellung eines Sachverständigengutachtens zur Einhaltung der Strahlenschutzverordnung im Forschungsexperiment Wendelstein 7-X im Hinblick auf die Schutzwirkung der Torushalle sowie ggf. Unterbreitung von Vorschlägen für weitere Maßnahmen

- L 3 LAGuS: Beauftragung an die TÜV SÜD Industrie Service GmbH vom 05.11.2012, Aktenzeichen: LAGuS1, Beauftragung für die Erstellung eines Sachverständigengutachtens zur Einhaltung der Strahlenschutzverordnung im Forschungsexperiment Wendelstein 7-X im Hinblick auf die Schutzwirkung der Torushalle sowie ggf. Unterbreitung von Vorschlägen für weitere Maßnahmen

- L 4 TÜV SÜD Industrie Service GmbH: Begehungsbericht am 12.02.2013 im IPP/Greifswald – Überblick über den Baufortschritt des Projektes Wendelstein 7-X, Dr. M. Bittner und J. Richter (Sachverständige nach § 66 Abs. 1 StrlSchV)

- L 5 TÜV SÜD Industrie Service GmbH: Begehungsbericht am 13.02.2013 im IPP/Greifswald – Erstellung eines Beprobungsplanes für die vier Außenwände der Torushalle, Dr. M. Bittner und J. Richter (Sachverständige nach § 66 Abs. 1 StrlSchV)

- L 6 TÜV SÜD Industrie Service GmbH: Begehungsbericht am 14.02.2013 im IPP/Greifswald – Bestätigung der sechs Probenahmepunkte an den Außenwänden der Torushalle und Fotodokumentarische Erfassung wichtiger strahlenschutzrelevanter Bereiche sowie verschiedener Halterungen und

sanierter Risse, Dr. M. Bittner und J. Richter (Sachverständige nach § 66 Abs. 1 StrlSchV)

- L 7 TÜV SÜD Industrie Service GmbH: Handlungsanweisung zur Beprobung in den Torushallenwänden, 22.02.2013, Dr. M. Bittner und F. Kaiser
- L 8 TÜV SÜD Industrie Service GmbH: Schreiben an das LAGuS vom 22.02.2013, Stellungnahme zur Begutachtung der Einhaltung der StrlSchV im Forschungsexperiment Wendelstein 7-X im Hinblick auf die Schutzwirkung der Torushalle im Rahmen des Genehmigungsverfahrens MGS 97401
- L 9 LAGuS: Antwort auf Stellungnahme an die TÜV SÜD Industrie Service GmbH vom 27.02.2013, Aktenzeichen: LAGuS502-38065-11-2013, Bestätigung von vorgeschlagenen weitergehenden Untersuchungen gemäß Nr. 3 des Gutachterauftrages zur Strahlenschutzwirkung der Torushalle (Berechnungen, Beprobung)
- L 10 TÜV SÜD Industrie Service GmbH: Bericht zur Begutachtung der Probenahme von Kernbohrungen im Zeitraum vom 21.03.2013-22.03.2013 im IPP/Greifswald durch TÜV SÜD, 09.04.2013, Dr. M. Bittner und J. Richter (Sachverständige nach § 66 Abs. 1 StrlSchV)
- L 11 LANL – Los Alamos National Laboratory: MCNPX User's Manual, Version 2.6.0, LA-CP-07-1473, April 2008
- L 12 ICRP – International Commission on Radiological Protection: Conversion Coefficients for use in Radiological Protection against External Radiation, ICRP Publication 74, Ann. ICRP 26 (3-4), 1996
- L 13 ICRP – International Commission on Radiological Protection: Compendium of Dose Coefficients based on ICRP Publication 60; ICRP Publication 119, Ann. ICRP 41(s), 2012



- L 14 TÜV SÜD Industrie Service GmbH: Schreiben an das LAGuS vom 09.08.2013, 2. Stellungnahme zur Begutachtung der Einhaltung der StrlSchV im Forschungsexperiment Wendelstein 7-X im Hinblick auf die Schutzwirkung der Torushalle im Rahmen des Genehmigungsverfahrens MGS 97401

- L 15 Kern- und Elementarteilchenphysik, G. Musion, J. Ranft, R. Reif und D. Seeliger, VEB Deutscher Verlag der Wissenschaften Berlin, 1988

- L 16 Grundlagen der Strahlungsphysik und des Strahlenschutzes, H. Krieger, 2. Auflage B.G. Teubner Verlag, Wiesbaden 2007



B Empfehlungen

- E 3.3/1 Wir empfehlen, die Torushallendecke während des Experimentierbetriebs mit einem Deuteriumplasma als abgesperrten Bereich zu deklarieren.
- E 5/1 Im Bereich der Zentralen Gasversorgung (C1) empfiehlt der Gutachter während des Experimentierbetriebs mit einem Deuteriumplasma die Einrichtung eines temporär abgesperrten Bereiches.

C Monte-Carlo-Simulationen zu Berechnungen der Ortsdosisleistungsverteilung

Zur Bewertung Abschirmwirkung der Torushallenwände und des baulichen Strahlenschutzes um die Torushalle des Wendelstein 7-X Fusionsexperiments wurden für den Betrieb eines Deuterium-Plasmas sowohl die Neutronenquelle und der Fusionsreaktor Wendelstein 7-X als auch die Abschirmwände möglichst detailgetreu entsprechend den Angaben in den Unterlagen /U 9, U 28/ modelliert.

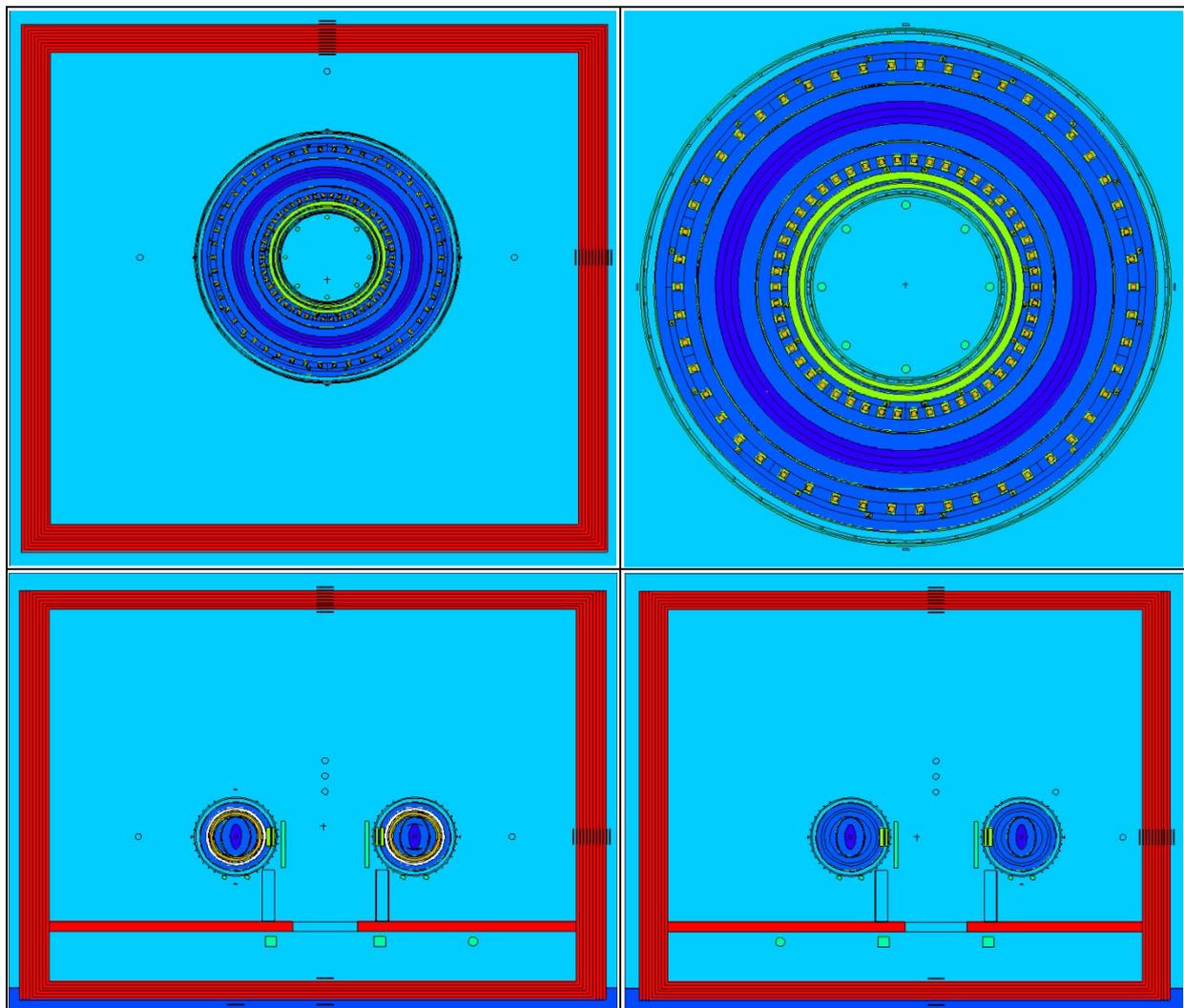


Abb. C01 a-d Modell der Torushalle und des Fusionsreaktors Wendelstein 7-X mit den Strahlenschutz relevanten Komponenten Plasmakammer (schmaler Torus – dunkelblau), Innenbereich des Kryostaten (hellblau), supraleitende Spulen (orange und hellgrün), Edelstahl der Strukturmaterialien (gelbgrün), Wasser im Kühlsystem (grün), Strahlenschutzbetonwände (rot), Luft (türkis) sowie Erdreich (blau) in drei Schnittebenen: a) xy-Ebene (Draufsicht – oben links) und b) Wendelstein 7-X (Detaildraufsicht – oben re.); b) xz-Ebene (unten links); d) yz-Ebene (unten rechts)

In Abbildung C01a, c und d sind die Torushalle und die angrenzende Bereiche an die West- und Ostwand (Abb. C01 c) bzw. an die Süd- und Nordwand (Abb. C01 d) sowie ins Erdreich bzw. oberhalb der Hallendecke dargestellt. Die Abb. C01 b zeigt eine horizontale Schnittdarstellung des Fusionsreaktors Wendelstein 7-X, in der die einzelnen, strahlenschutzrelevanten Komponenten und Strukturelemente, die in die Monte-Carlo-Simulation mit einbezogen wurden, zu erkennen sind. Neben den farblich dargestellten Komponenten ist aus der Abb. C01 ebenso die Lage der ca. 55 kugel- oder zylinderförmigen Testdetektoren, die für die Berechnung der Dosisleistung an den relevanten Punkten positioniert wurden, zu entnehmen. Auf die Modellierung von Durchbrüchen und den Verschluss (z.B. Strahlenschutz Tore) wurde bei den Simulationen verzichtet.

Die Anlagen- bzw. Raumdimensionen, insbesondere die Wandstärken, wurden den vorliegenden Plänen /U 41-43/ entnommen. Die Höhe der gesamten Torushalle wurde mit 24,0 m angenommen, wovon ca. 20,15 m auf die eigentliche Torushalle und ca. 3,25 m auf das Untergeschoss entfallen. Die Breite der Torushalle (West-Ost-Richtung) beträgt ca. 32,45 m und die Tiefe (Süd-Nord-Richtung) beträgt etwa 30,5 m. Der Fusionsreaktor (Torusachse) befindet sich asymmetrisch in der Torushalle, wobei die kürzesten Abstände von der Torusachse zur Nordwand (ca. 13,25 m) bzw. zur Ostwand (ca. 15,45 m) gegeben sind. Damit sind diese Wände und die Torushallendecke die kritischsten Abschirmungen für den Schutz der Außenbereiche (Personal, Bevölkerung und Umwelt), die bei den Berechnungen zum Abschirmverhalten zur Auswertung herangezogen wurden.

Entsprechend den Ergebnissen aus den in der Planungsphase absolvierten Simulationsrechnungen /U 4 - U 7 bzw. U 9/ sowie den im Sicherheitsbericht /U 2/ zusammengestellten Angaben zum Beton der Wände/Decken wurde es zum Erreichen der angestrebten Abschirmwirkung erforderlich, die Torushalle aus Normalbeton mit einer Zumischung von ca. 17,5 – 19,4 kg Colemanit pro 1 m³ Normalbeton und einem zusätzlichen Wasservolumenanteil zu fertigen. Aus den Unterlagen zu den Simulationsrechnungen /U 4 - U 9/ u.a. sowie den Untersuchungen zur Beschaffenheit und den bauchemischen bzw. statischen Eigenschaften der ermittelten Betonmischung /U 11 - U 15/ wurde letztlich ein Wasservolumenanteil von 120 l/m³ Beton und ein Bormassenanteil von 1000 ppm ermittelt, um eine effektive Abschirmung gegen die Neutronenstrahlung sowie die Sekundärstrahlung zu errichten. Gemäß den Angaben im Bericht /U 7/ und den Ausführungen im Sicherheitsbericht /U 2/ waren die Torushallenwände mit diesem Spezialbeton, bei dem man von der Dichte 2,3 g/cm³ /U 4 – U 9/ ausgeht, in einer Dicke von 1,80 m (Torushallendecke von 1,20 m) auszuführen, um den Anforderungen des Strahlenschutzes /R 1/ zu genügen und den effektiven Schutz der angrenzenden Bereiche zu sichern.

In der Modellrechnung wird von einer Grundmischung von Normalbeton mit einer Dichte von $2,251 \text{ g/cm}^3$ ausgegangen, dessen Zusammensetzung der sogenannten Los Alamos Concrete aus dem MCNPX-Manual /L 11/ entspricht. Ausgehend von dieser Grundzusammensetzung wurden verschiedene Betonmischungen unter Variation des Wasservolumenanteils und des Bormassenanteils untersucht. Dabei variieren aufgrund der unterschiedlichen Dichten der einzelnen Betonkomponenten auch die Betondichten der betrachteten Mischungen. Eine Normierung auf die Betondichte von $2,3 \text{ g/cm}^3$, wie in einigen Berechnungsmodellen /U 4 – U 9/ praktiziert, erfolgte nicht, da das nicht einer korrekten Variation der Einzelkomponenten entspricht und die Betondichte ebenso eine variable Größe ist.

Mit diesem Geometriemodell wurden die Dosisleistungsberechnungen mit dem Monte-Carlo-Simulationscode MCNPX (Version 2.60 aus dem Los Alamos NL, 2008) /L 11/ für die erwartete Quell-Neutronenstrahlung einer maximalen Energie der Neutronen von 2,45 MeV, die bei der DD-Reaktion entstehen, durchgeführt. Bei dem entsprechend den Unterlagen /U 2, U 9/ angegebenen Zeitregime für den Betrieb eines Deuteronen-Plasmas ist von maximal 50 Tagen pro Jahr mit täglich 10 Pulsen à 10 s mit einer Neutronenrate pro Puls von $6 \cdot 10^{16} \text{ s}^{-1}$ auszugehen. Damit ergibt sich eine Neutronenrate von $3 \cdot 10^{19} \text{ a}^{-1}$. Daraus kann man bei einer Strahlzeit von 5000 s/a, was ca. 1,4 h pro Jahr entspricht, von einer mittleren, konstanten Neutronenrate von $4,17 \cdot 10^{12} \text{ n/s}$ als Exposition des Personals ausgehen, wenn man gemäß der üblichen Herangehensweise 1-Schicht-Betrieb und eine Jahresarbeitszeit von 2000 h (50 Wochen/a * 40 h/Woche) voraussetzt. In der MC-Simulation wurde somit eine mittlere Ortsdosisleistung berechnet, die direkt mit der jährlichen effektiven Dosis verglichen werden kann.

Zur Simulation des Fusionsexperiments wurde der Quellterm für die Neutronen entsprechend der Abb. C02 a) verwendet. Die Neutronen-Energieverteilung wurde als Gauß-Verteilung mit einem Energiemittelwert von 2,45 MeV und einer Halbwertbreite von 0,025 MeV, d.h. von ca. 1%, angenommen. Daraus resultieren durch Wechselwirkung mit dem Plasma und den anderen Strukturkomponenten (Plasmakammer, Divertoren, supraleitende Spulen, Kryostat u.a.) die nach Abb. C02 b) und c) dargestellten Neutronen-Flussdichten sowie die Photonen-Flussverteilung gemäß Abb. C02 d) aus den entsprechenden Anlagenkomponenten. Auf die Darstellungen für die resultierenden Winkelverteilungen der generierten Strahlungskomponenten soll hier verzichtet werden. Die Modelle beschreiben die realen Strahlungskomponenten sowohl hinsichtlich deren Energieverteilung als auch der Winkelverteilungen zutreffend.

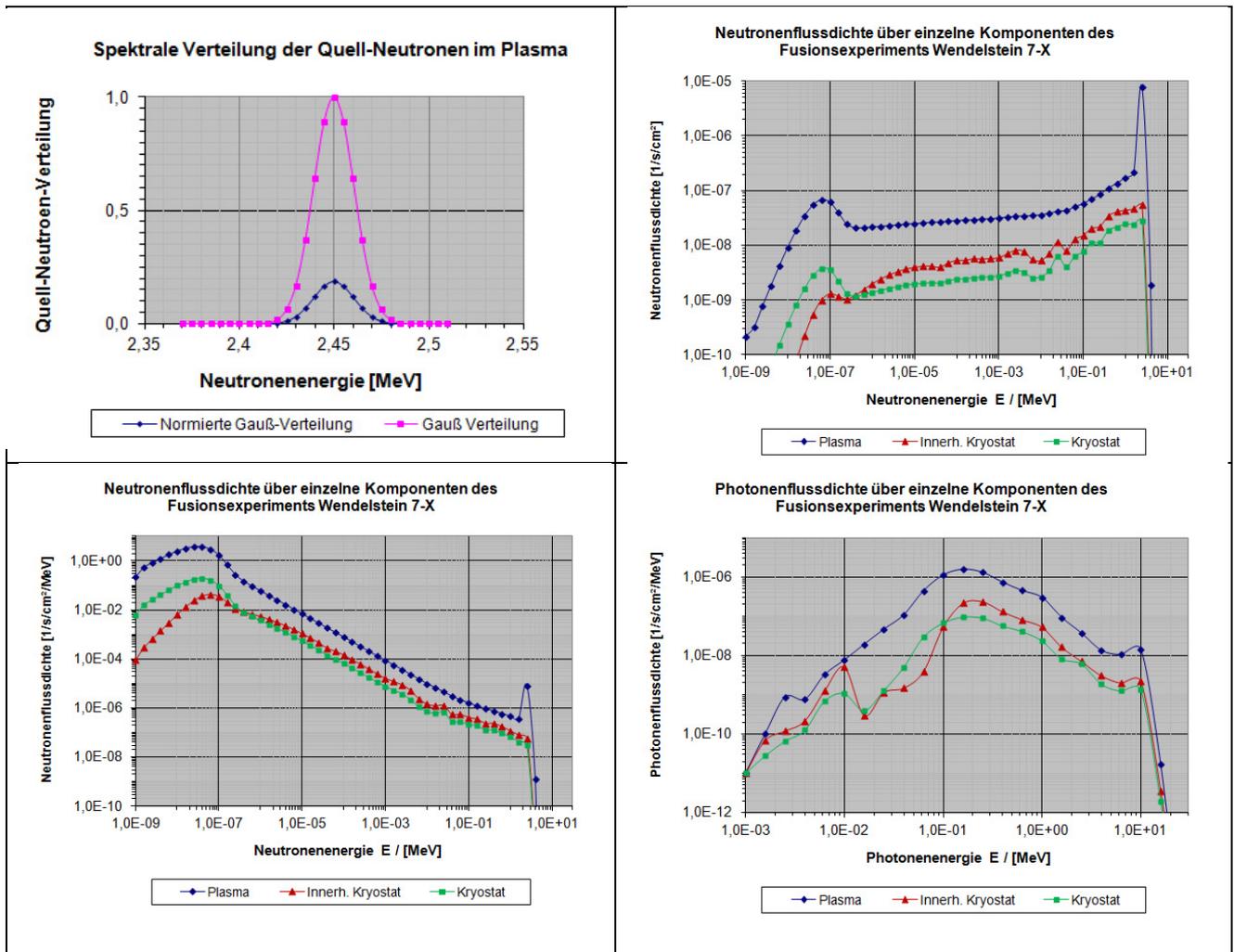


Abb. C02 a-d Spektrale Verteilung der Quell-Neutronen (li., ob.) und spektrale Flussdichte der Neutronen (re., ob.), spektrale Flussdichte der Neutronen pro Energieintervall (li., unt.) und der erzeugten Photonen (re., unt.) pro Energieintervall über einzelne Komponenten (Plasma, innerhalb Kryostat, über Kryostatoberfläche) bei der Monte-Carlo-Simulationen mit MCNPX (am Beispiel von Modell: W7XB35M)

Mit den angegebenen Modelldaten für den Quellterm wurden die Berechnungen der Neutronen- und Photonenfluenz durch Monte-Carlo-Simulation mittels des Programm-codes MCNPX durchgeführt (Rechenzeit je Modell ca. 15-20 Tage). Die Neutronen- bzw. Photonenfluenz wird dabei als über das Volumen gemittelte Größe nach der Formel (C 1) berechnet. Die Bestimmung der Neutronen- bzw. Photonendosisleistung erfolgte aus der Neutronen- bzw. Photonenfluenz mittels der üblichen Berechnungsfunktion (Flux-to-Dose-rate-Conversion von ANSI/ANS-1991 – ICRP74 und nach ICRP119 AP von 2012) /L 12, L 13/ über Formel (C 3). Die Neutronen- und Photonendosis wurden jeweils über die Formel (C 4) aus der Zeit und dem Aufenthalts- bzw. dem Richtungsfaktor (jeweils 1) berechnet und zur Gesamtdosis addiert. Die so bestimmte Dosis entspricht der Umge-

bungs-Äquivalentdosis $H^*(10)$, die mit der üblichen Berechnungsfunktion (Flux-to-Dose-rate-Conversion) /L 11/ in allen Berechnungen ermittelt wurde (Tab. C01, Abb. C04 bzw. Tab. C02, Abb. C05).

Für die Berechnungen wurden die Wirkungsquerschnitte (Abb. D01 - D03 in Anlage D) für die einzelnen Materialien zur Modellierung der verschiedenen Kernprozesse entweder aus der Kerndatenbank ENDF/B-VI oder einer anderen, die mit dem Monte-Carlo-Code MCNPX (Version 2.6.0) vertrieben wird, oder aus Reaktionsmodellen, die in MCNPX (Version 2.6.0) /L 11/ implementiert sind, verwendet.

Die Berechnungen zur Neutronen- bzw. Photonenfluenz und der Neutronen- bzw. Photonendosisleistung in den einzelnen Volumenzellen der Monte-Carlo-Simulation wurden ausschließlich mit den nachfolgenden Formeln durchgeführt.

$$\Phi = \frac{1}{V} \int dE \int dt \int dV \int d\Omega \psi(\vec{r}, \Omega, E, t) \quad (C 1)$$

$$\Phi = w \frac{T_1}{V} \quad (C 2)$$

mit: V – Zellvolumen [cm^3], ψ – Phot.-Verteilungsfunk., E – Neutr./Ph.-Energie[MeV],
 t – Neutronen-/Photonen-Lebenszeit [s], \vec{r} – Ortsvektor [cm] (MCNPX),
 Ω – Neutr./Phot.-Richtungsvektor [-], T_1 – Spurlängenschätzer [cm] (MCNPX),
 w – statistisches Teilchengewicht [-], Φ – mittlere Neutr./Phot.-Fluenz [$1/\text{cm}^2$]

$$\dot{H}_p = \int f(p, E_p) \cdot \Phi(p, E_p) \cdot n_n dE_p \quad (C 3)$$

$$H_p = \dot{H}_p \cdot t \cdot k_B \cdot k_A \quad (C 4)$$

mit: H_p – Jahresdosis (mSv), \dot{H}_p – mittlere Dosisleistung [mSv/h] pro MC-Zelle,
 $f(p, E)$ – Konversionsfaktor [$\text{mSv/h} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{s}$], n_n – Neutronenquellrate [1/s],
 Φ – mittlere Neutr./Photonen-Fluenz [$1/\text{cm}^2$], t – Aufenthaltszeit [h pro Jahr],
 k_B – Richtungsfaktor [-], k_A – Aufenthaltsfaktor [-]

Die Formel für die Jahresdosis, die bei Ganzkörperexposition der effektiven Dosis im Kalenderjahr entspricht, wurde zur Abschätzung der Personendosis und zum Vergleich dieser Größe mit dem Grenzwert für das beruflich strahlenexponierte Personal (Kategorie A:

20 mSv; Kategorie B: 6 mSv) nach § 54 StrlSchV und für die Bevölkerung (1 mSv) nach § 46 StrlSchV /R 1/ verwendet. Das Berechnungsverfahren kann als konservativ angesehen werden. Die Neutronen- bzw. Photonendosisleistung wurde über zwei unterschiedliche Berechnungswege in der MC-Simulation ermittelt. So erfolgte zum einen die Berechnung der Ortsdosisleistung an definierten Punkten in sogenannten Testdetektoren und zum anderen wurde die Ortsdosisleistung in einem Gitterraster (mesh) in der Torushalle und in deren Umgebung berechnet. Die Berechnungsergebnisse zur Verteilung der Neutronen- und Photonendosisleistung [in $\mu\text{Sv/h}$] sind am Beispiel des Berechnungsmodells W7XA31 mit den angegebenen Betonparametern (Rohdichte: $2,213 \text{ g/cm}^3$; Wassergehalt: 120 l/m^3 Beton; Borgehalt: 0 ppm) in Abb. C03 a-d dargestellt.

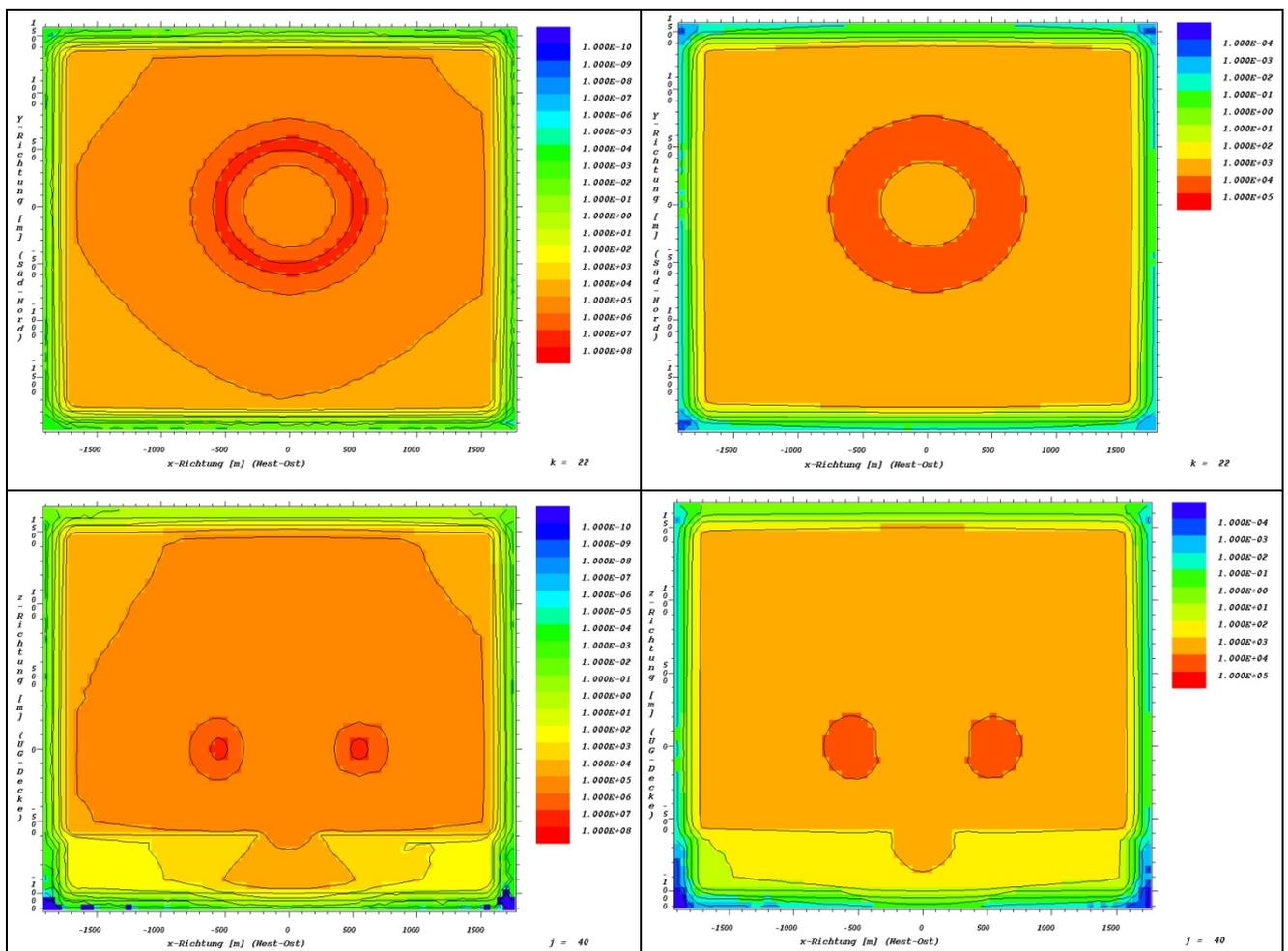


Abb. C03 a-d Verteilung der Neutronendosisleistung [$\mu\text{Sv/h}$] in der xy-Schnittebene (links, oben) bzw. in der xz-Ebene (links, unten) und Verteilung der Photonendosisleistung [$\mu\text{Sv/h}$] in der xy-Ebene (rechts, oben) bzw. in der xz-Ebene (rechts, unten) am Beispiel des Berechnungsmodells W7XA31

Konversionsfaktoren (Funktion) von Neutronenflussdichte in Neutronendosisleistung

Energie / MeV	ANSI/ANS1991 - IRCP74 DF(E) / (mSv/h)/(n/cm ² /s)	Energie / MeV	IRCP119 AP DF(E) / (mSv/h)/(n/cm ² /s)	IRCP119 ROT DF(E) / (mSv/h)/(n/cm ² /s)
1,00E-09	2,376E-05	1,00E-09	1,886E-05	1,076E-05
1,00E-08	3,240E-05	1,00E-08	2,358E-05	1,339E-05
2,53E-08	3,816E-05	2,50E-08	2,736E-05	1,584E-05
1,00E-07	4,644E-05	1,00E-07	3,582E-05	2,070E-05
2,00E-07	4,860E-05	2,00E-07	4,032E-05	2,315E-05
5,00E-07	4,896E-05	5,00E-07	4,608E-05	2,617E-05
1,00E-06	4,788E-05	1,00E-06	4,968E-05	2,822E-05
2,00E-06	4,644E-05	2,00E-06	5,220E-05	2,992E-05
5,00E-06	4,320E-05	5,00E-06	5,400E-05	3,139E-05
1,00E-05	4,068E-05	1,00E-05	5,436E-05	3,204E-05
2,00E-05	3,816E-05	2,00E-05	5,436E-05	3,211E-05
5,00E-05	3,564E-05	5,00E-05	5,328E-05	3,175E-05
1,00E-04	3,384E-05	1,00E-04	5,256E-05	3,128E-05
2,00E-04	3,204E-05	2,00E-04	5,184E-05	3,082E-05
5,00E-04	2,988E-05	5,00E-04	5,112E-05	3,024E-05
0,001	2,844E-05	0,001	5,112E-05	3,002E-05
0,002	2,772E-05	0,002	5,184E-05	3,020E-05
0,005	2,880E-05	0,005	5,652E-05	3,262E-05
0,01	3,780E-05	0,01	6,588E-05	3,816E-05
0,02	5,976E-05	0,02	8,568E-05	4,968E-05
0,03	8,532E-05	0,03	1,044E-04	6,084E-05
0,05	1,480E-04	0,05	1,386E-04	8,172E-05
0,07	2,160E-04	0,07	1,699E-04	1,001E-04
0,1	3,168E-04	0,1	2,153E-04	1,253E-04
0,15	4,752E-04	0,15	2,887E-04	1,634E-04
0,2	6,120E-04	0,2	3,564E-04	1,973E-04
0,3	8,388E-04	0,3	4,788E-04	2,578E-04
0,5	1,159E-03	0,5	6,768E-04	3,578E-04
0,7	1,350E-03	0,7	8,316E-04	4,428E-04
0,9	1,440E-03	0,9	9,612E-04	5,184E-04
1	1,498E-03	1	1,015E-03	5,544E-04
1,2	1,530E-03	1,2	1,116E-03	6,228E-04
2	1,512E-03	2	1,379E-03	8,424E-04
3	1,483E-03	3	1,555E-03	1,019E-03
4	1,469E-03	4	1,649E-03	1,134E-03
5	1,458E-03	5	1,706E-03	1,206E-03
6	1,440E-03	6	1,739E-03	1,253E-03
7	1,458E-03	7	1,764E-03	1,289E-03
8	1,472E-03	8	1,778E-03	1,318E-03
9	1,512E-03	9	1,789E-03	1,343E-03
10	1,584E-03	10	1,796E-03	1,361E-03
12	1,728E-03	12	1,796E-03	1,386E-03
14	1,872E-03	14	1,786E-03	1,404E-03
15	1,944E-03	15	1,778E-03	1,408E-03
16	1,998E-03	16	1,768E-03	1,415E-03
18	2,052E-03	18	1,750E-03	1,418E-03
20	2,160E-03	20	1,728E-03	1,422E-03

Tab. C01 Konversionsfaktoren von Neutronenflussdichte in Neutronen-Dosisleistung nach IRCP

Neutron Flux-to-Dose Rate Conversion Factors

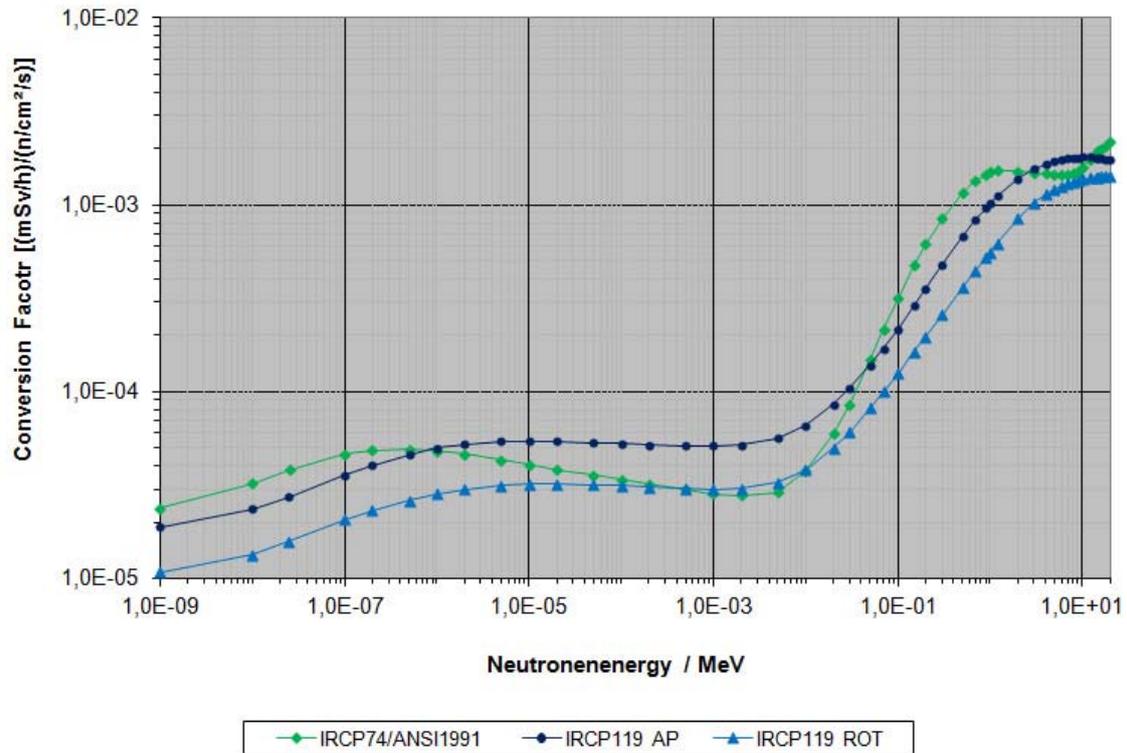


Abb. C04 Konversionsfunktionen zwischen Fluss und Dosisleistung für Neutronenstrahlung

Mit der Tabelle C01 erhält man die Konversionsfaktoren, wie sie von der ICRP in den Berichten ICRP74 /L 12/ bzw. ICRP119 /L 13/) veröffentlicht wurden, zur Berechnung der Neutronendosisleistung aus der Neutronenflussdichte in Abhängigkeit von der entsprechenden Neutronenenergie durch lineare Interpolation. Die berechneten Größen sind mit der Umgebungs-Äquivalentdosis $H^*(10)$ für Neutronenstrahlung vergleichbar.

Konversionsfaktoren (Funktion) von Photonenflussdichte in Photonendosisleistung

Energie / MeV	ANSI/ANS1991 DF(E) / (mSv/h)/(p/cm ² /s)	Energie / MeV	IRCP119 AP DF(E) / (mSv/h)/(p/cm ² /s)	IRCP119 ROT DF(E) / (mSv/h)/(p/cm ² /s)
1,00E-02	1,000E-07	1,00E-02	1,787E-07	8,919E-08
3,00E-02	4,200E-07	1,50E-02	4,646E-07	1,768E-07
5,00E-02	7,800E-07	2,00E-02	7,598E-07	2,877E-07
7,00E-02	9,810E-07	3,00E-02	1,107E-06	5,081E-07
1,00E-01	1,320E-06	4,00E-02	1,243E-06	6,717E-07
1,50E-01	1,984E-06	5,00E-02	1,311E-06	7,805E-07
2,00E-01	2,680E-06	6,00E-02	1,377E-06	8,704E-07
2,50E-01	3,355E-06	7,00E-02	1,508E-06	9,879E-07
3,00E-01	4,060E-06	8,00E-02	1,586E-06	1,066E-06
3,50E-01	4,807E-06	1,00E-01	1,861E-06	1,286E-06
4,00E-01	5,504E-06	1,50E-01	2,722E-06	1,927E-06
4,50E-01	6,323E-06	2,00E-01	3,605E-06	2,632E-06
5,00E-01	7,299E-06	3,00E-01	5,415E-06	4,094E-06
5,50E-01	8,229E-06	4,00E-01	7,212E-06	5,538E-06
6,00E-01	9,104E-06	5,00E-01	8,911E-06	6,957E-06
0,65	9,925E-06	0,6	1,043E-05	8,322E-06
0,7	1,064E-05	0,8	1,342E-05	1,091E-05
0,8	1,190E-05	1	1,609E-05	1,337E-05
1	1,427E-05	2	2,682E-05	2,355E-05
1,4	1,885E-05	4	4,290E-05	3,927E-05
1,8	2,310E-05	6	5,648E-05	5,261E-05
2,2	2,710E-05	8	6,957E-05	6,557E-05
2,6	3,101E-05	10	8,268E-05	7,859E-05
2,8	3,290E-05	13	9,840E-05	9,563E-05
3,25	3,689E-05	15	1,088E-04	1,066E-04
3,75	4,104E-05			
4,25	4,504E-05			
4,75	4,906E-05			
5	5,121E-05			
5,25	5,344E-05			
5,75	5,738E-05			
6,25	6,109E-05			
6,75	6,516E-05			
7,5	7,129E-05			
9	8,337E-05			
11	9,886E-05			
13	1,117E-04			
15	1,252E-04			

Tab. C02 Konversionsfaktoren von Photonenflussdichte in Photonen-Dosisleistung nach ICRP

Photon Flux-to-Dose Rate Conversion Factors

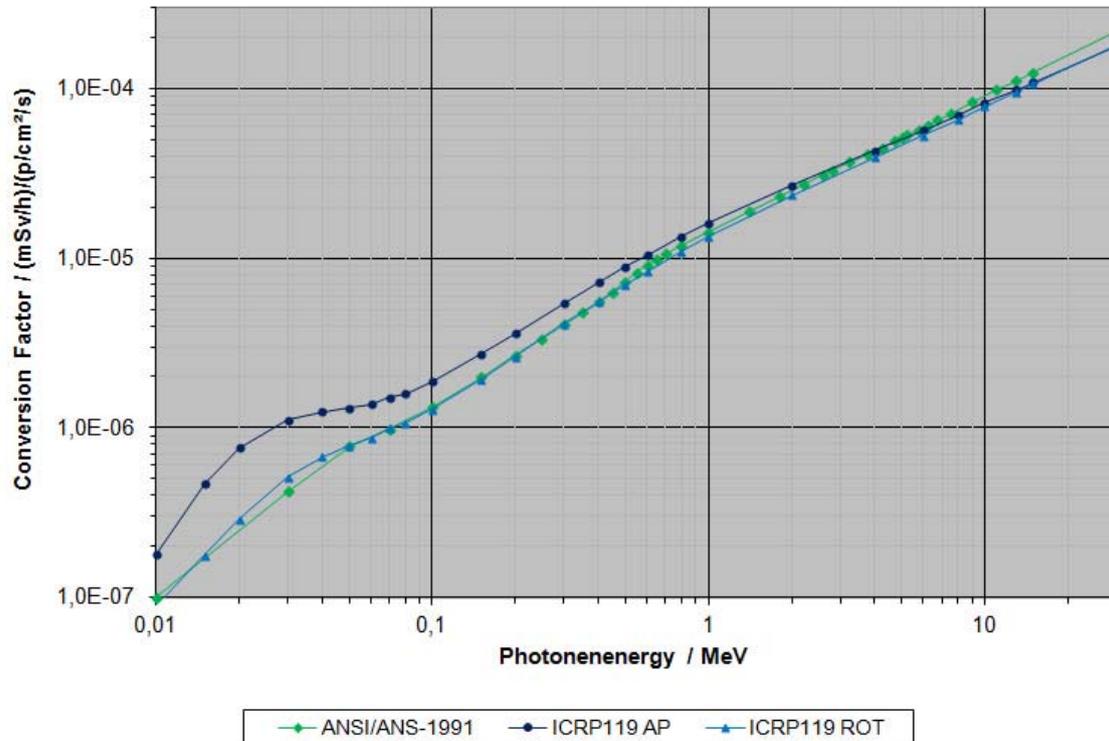


Abb. C05 Konversionsfunktionen zwischen Fluss und Dosisleistung für Photonenstrahlung

Mit der Tabelle C02 erhält man die Konversionsfaktoren, wie sie von der ICRP in den Berichten ICRP74 /L 12/ bzw. ICRP119 /L 13/) veröffentlicht wurden, zur Berechnung der Photonendosisleistung aus der Photonenflussdichte in Abhängigkeit von der entsprechenden Photonenergie durch lineare Interpolation. Die berechneten Größen sind mit der Umgebungs-Äquivalentdosis $H^*(10)$ für Photonenstrahlung vergleichbar.

D Relevante Wirkungsquerschnitte der Neutronenreaktionen

In den nachfolgenden Darstellungen sind Wirkungsquerschnitte zu den Neutronenreaktionen für die Materialien der Torushallenwände, die für die Abschirmung der Neutronenstrahlung wesentlich sind, abgebildet. In den Darstellungen sind die relevanten Wirkungsquerschnitte für den Borbeton unter Variation des Wasservolumenanteils bzw. des Bormassenanteils zum Vergleich abgebildet.

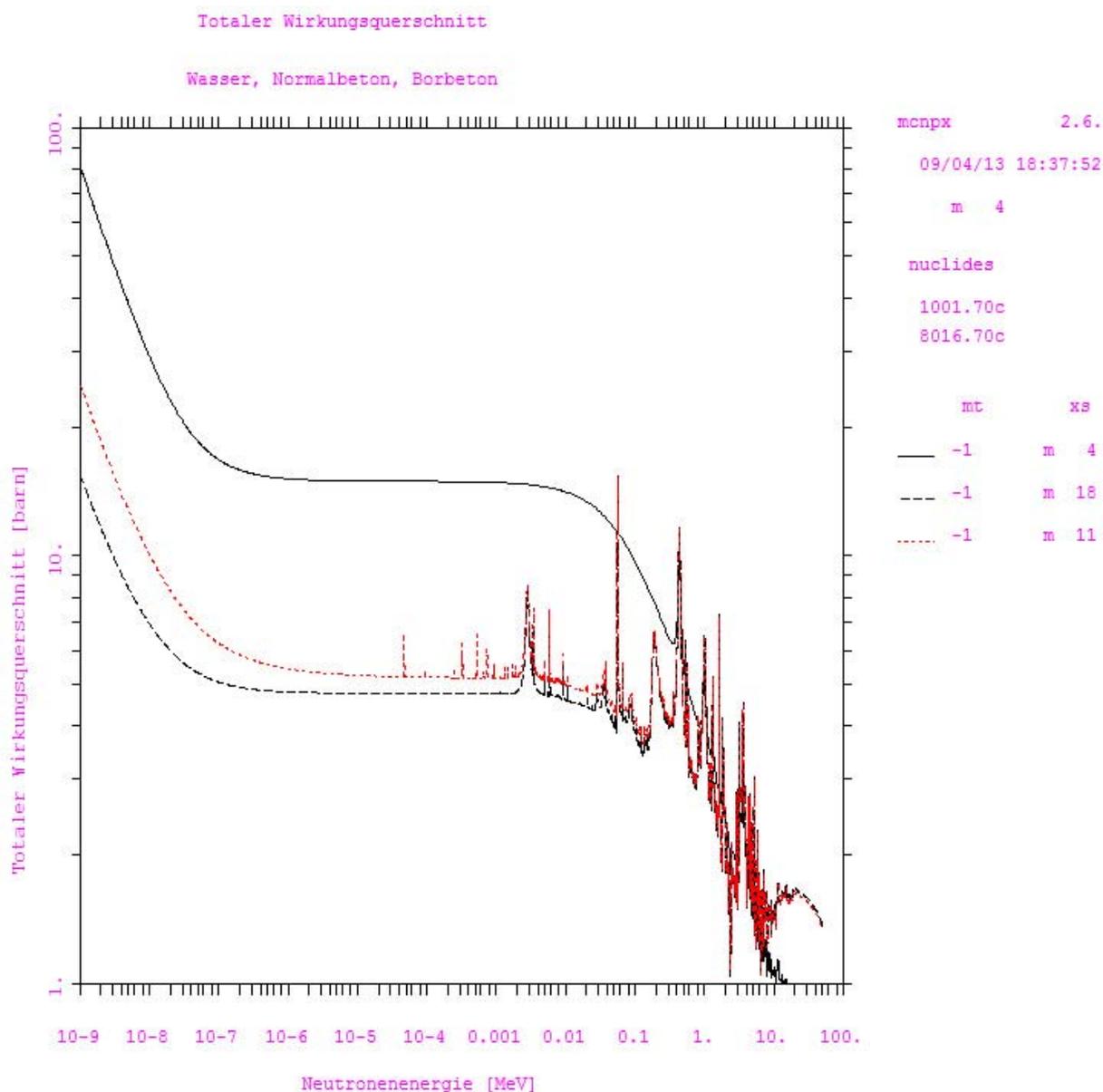


Abb. D01 Vergleich der totalen Wirkungsquerschnitte der Neutronenstrahlung für Wasser (Material M 4), für Normalbeton (Standard Los Alamos concrete, M18) und Borbeton (M11) mit einem Wassergehalt von 120 l/m³ und einem Borgehalt von 1000 ppm

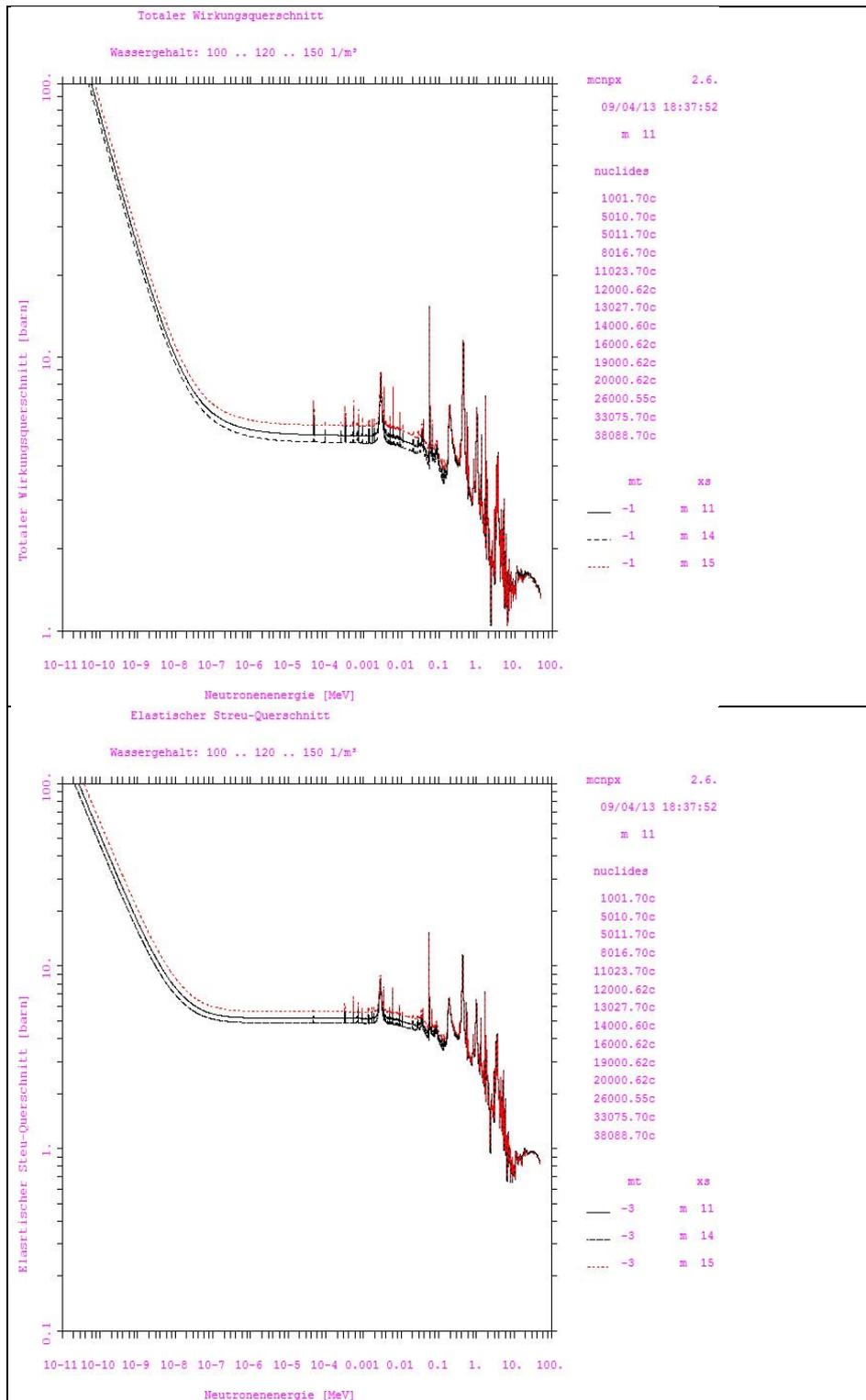


Abb. D02 Vergleich der totalen Wirkungsquerschnitte (mt -1) und elastischen Streuquerschnitte (mt -3) der Neutronenstrahlung für Borbeton (M 11: 120 l/m³ Wassergehalt), bzw. für Borbeton mit 100 l/m³ (M 14) bzw. 150 l/m³ (M 15); Unterschiede bei den totalen WQ resultieren bei Variation des Wassergehalts nahezu vollständig aus dem elastischen Streuquerschnitt

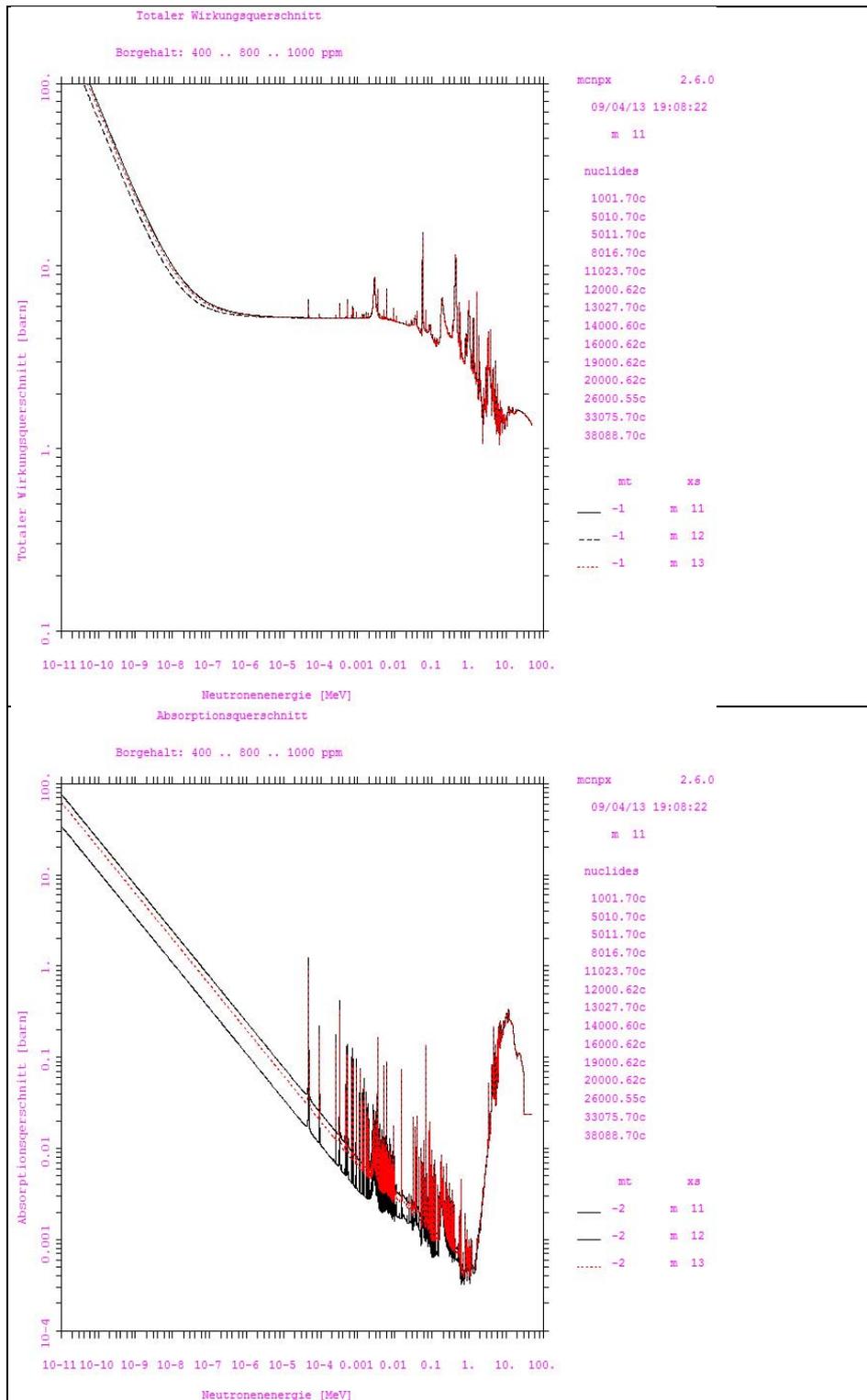


Abb. D03 Vergleich der totalen Wirkungsquerschnitte (mt -1) und Absorptionsquerschnitte (mt -2) der Neutronenstrahlung für Borbeton (M 11: 1000 ppm Bormassenanteil), bzw. für Borbeton mit 400 ppm (M 12) bzw. 800 ppm (M 13); Unterschiede bei den totalen WQ resultieren bei Variation des Borgehalts nahezu vollständig aus dem Absorptionsquerschnitt

E Zusammenstellung der Berechnungsmodelle

Lfd. Nr.	Bezeichnung	Version	Änderungen / Untersuchung	Bemerkungen
1	W7XA01		toroidal Source, Energy: 2.5 MeV (quasi monoenerg. neutrons), photonuclear phys	erster Test der Neutronenquelle, keine Ergebnisse
2	W7XA02	1 - 7	new flux-to-dose-cor. ANST/ANS 1991, Test: symetry, no mesh, source-rad: 12.5 cm	erster Test der Fluss-zu Dosis-Funktion, keine Ergebnisse
3	W7XA03		Test: symetry, mesh, source-rad: 12.5 cm	Test der Symmetrie, keine Ergebnisse
4	W7XA04	0 - 1	Wall structure (variance deduction)	Erste Ergebnisse für Fluss in Testdetektoren 915 und 916
5	W7XA05	0 - 2	flux first detector, dump 120, mesh, DR in Torushall	Fluss, Dosisleistung für Neutronen und Photonen
6	W7XA06	0 - 3	first torrus materials (plasma chamber, cryostat), geometry elipt. Torus	Fluss, Dosisleistung, mesh-Plots
7	W7XA07	0 - 2	materials (ss1.4429 modif., Epoxy, superconductors), inner and outer coils (as homogene material)	
8	W7XA08	0 - 2	cylindrical divertors materials (graphite, CuCrZr, water) and outer coils accept back-up rings (inner and outer); 2 torussegment divertors materials	
9	W7XA09	0 - 1	Steel construction (10 columns and frame) and water system	
10	W7XA20		new concrete - Mixture LAC75 (1000 ppm B, 120l water), n-rate: 4.1667E12 n/s (average per year), Dr-unit: $\mu\text{Sv/h}$	
11	W7XA21		new water pipe geometry (inner cylinder, outer tori), new steel const.	
12	W7XA22	0 - 1	new water pipe geometry, new toris (48 rad. and 26 axi.), simply geometry	
13	W7XA23		inner coils 50-hollow cyl., 20 outer coils, print 128 universe, small div.	
14	W7XA24		water pipe geometry like 22 (separate), new toris (48 rad. and 26 axi.)	
15	W7XA25	0 - 2	all imp 1 exept torus hall, wall and outside air, other test detectors, lower tallies (without ICRP21)	
16	W7XA26	0 - 1	new water pipe in UG, only mesh 411	
17	W7XA27	1 - 4	variation of B LAC30...70: 600-1100 ppm	keine verwertbaren Ergebnisse
18	W7XA27	1 - 5	variation of Water LAC71...75: 105-143 l/m ³	keine verwertbaren Ergebnisse
19	W7XA29		Testmodel	
20	W7XA30 and W7XB302	0 - 2	two monenerg. sources (addit. Part of DT-Neutronen, app.1/200)	Simulation mit Konkurrenzreaktionen (DD- und DT-Reaktion zu 0,05%)
21	W7XA31		new concrete mixture BC75n (colemanit mixture), mesh 511	Berechnung mit und ohne Bor
22	W7XA32	0 - 12	variation of B with real colemanit mixture up to BC100n 10000 ppm /120 l Water	keine verwertbaren Ergebnisse
23	W7XA33	0 - 10	variation of H2O with real colemanit mixture: 1000 ppm / 100 -150 l water	keine verwertbaren Ergebnisse
22	W7XB34	0 - 12	variation of B with real colemanit mixture up to BC10x 10000 ppm /120 l Water	Variation des Borgehaltes komplett, Ergebnisse ausgewertet
23	W7XB35	0 - 8	Variation of H2O with real colemanit mixture: 1000 ppm / 100 -150 l water with master W7XB35M	Variation des Wassergehaltes komplett, Ergebnisse ausgewertet

Tab. E01

F Bauliche Darstellungen der Torushalle

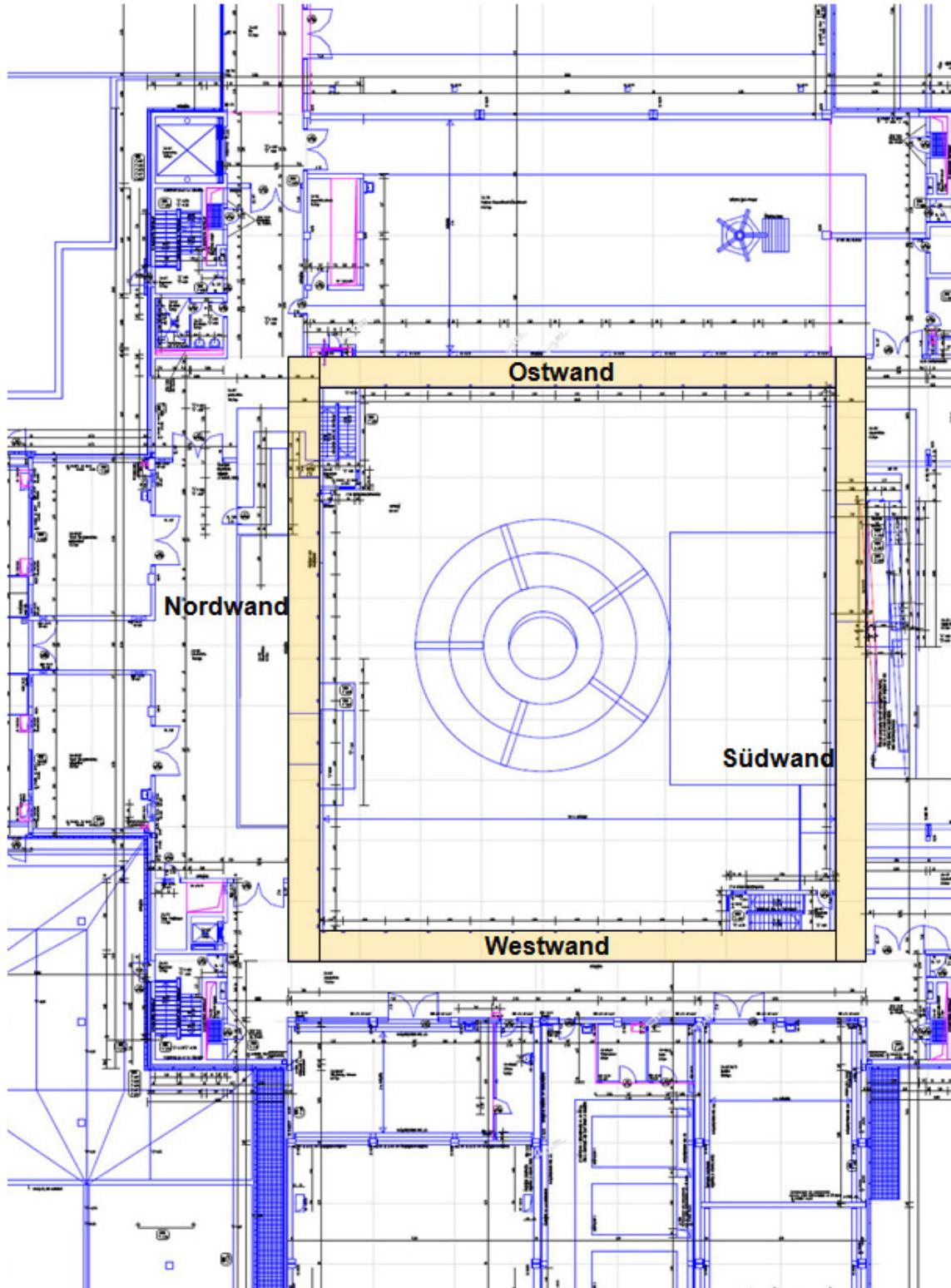


Abb. F01 Grundriss der Torushalle EG (nicht maßstabsgerecht) /U 42/

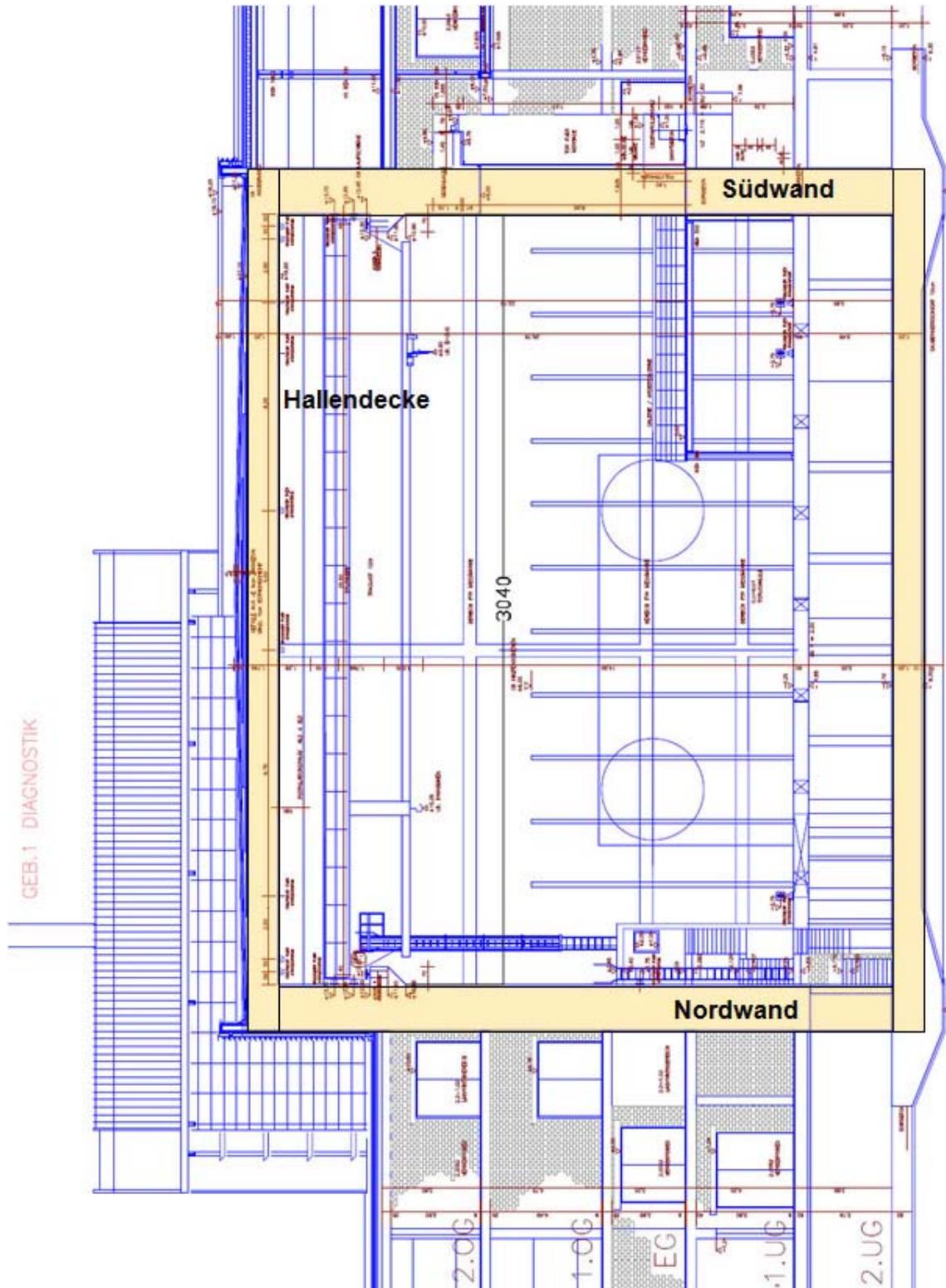


Abb. F02 Schnittdarstellung der Torushalle (Schnitt 32, Nord-Süd) /U 42/