

BAM – GGR 008 – Richtlinie für numerisch geführte Sicherheitsnachweise im Rahmen der Bauartprüfung von Transport- und Lagerbehältern für radioaktive Stoffe

Die sicherheitstechnischen Anforderungen an die Auslegung von Transportbehältern für radioaktive Stoffe basieren auf den Empfehlungen der International Atomic Energy Agency (IAEA) in Wien, die über die nationalen und internationalen Gefahrgutbeförderungsvorschriften verbindlich gemacht worden sind. Darin sind diejenigen Prüfbedingungen und Störfallszenarien definiert, für die Sicherheitsnachweise im Rahmen der verkehrsrechtlichen Verfahren für die Zulassung von Behälterbauarten zu erbringen sind. Weitere sicherheitstechnische Anforderungen an die Auslegung von Behältern resultieren aus dem Gebot der Gewährleistung des langfristigen sicheren Einschusses des radioaktiven Inhaltes sowohl bei der Zwischenlagerung als auch bei der Endlagerung. Die Prüfung der entsprechenden lagerspezifischen Sicherheitsnachweise erfolgt in nationalen atomrechtlichen Begutachtungsverfahren.

Die Empfehlungen der IAEA ebenso wie die nationalen und internationalen Transportvorschriften (z. B. ADR, Kap. 6.4.12.1) bzw. die atomrechtlichen Vorschriften enthalten allgemeine Anforderungen an die anzuwendende Nachweismethodik wonach bei der Bauartprüfung sowohl experimentelle als auch rechnerische (analytische oder numerische) Nachweismethoden eingesetzt werden können. Insbesondere, wenn der Sicherheitsnachweis numerisch geführt wird, sind allgemeine Anforderungen an die Art, den Umfang und die Darstellung des Nachweises zu stellen, die nicht explizit aus den gesetzlichen Vorschriften zu entnehmen sind. Um hier entsprechende Vorgaben und Anforderungen zu formulieren, wurde unter der Berücksichtigung der Erfahrungen der BAM bei der Bauartprüfung von dichten Umschließungen für radioaktive Stoffe die Richtlinie für numerisch geführte Sicherheitsnachweise erarbeitet.

Die BAM – GGR 008 gilt im Verantwortungsbereich der BAM - Prüf- und Begutachtungstätigkeit und ist anzuwenden bei der Erstellung und Prüfung von Sicherheitsnachweisen für Transport- und Lagerbehälter für radioaktive Stoffe, die teilweise oder ganz auf computergestützten numerischen Berechnungen beruhen. Sie soll insbesondere die Grundlage für die korrekte Durchführung der numerischen Analyse nach dem Stand von Wissenschaft und Technik bilden und die Prüfbarkeit des numerischen Sicherheitsnachweises unterstützen. Ihre Anwendung gewährleistet die Nachvollziehbarkeit des Berechnungsganges und der den Berechnungen zugrunde liegenden Voraussetzungen und Annahmen.

Bundesanstalt für Materialforschung und –prüfung
Fachgruppe III.3 „Sicherheit von Transport- und Lagerbehältern“

BAM – GGR 008

**Richtlinie für
numerisch geführte Sicherheitsnachweise
im Rahmen der Bauartprüfung von
Transport- und Lagerbehältern
für radioaktive Stoffe**

Rev. 0

Februar 2003

Diese Richtlinie wurde von der BAM erstellt im Rahmen des Projektes III-208-0113

*„Mathematische Analytik für die Sicherheitsbeurteilung von
Gefahrgutumschließungen“*

Inhaltsverzeichnis	Seite
1. Einleitung.....	5
1.1 Anwendungsbereich.....	5
1.2 Zweck.....	5
1.3 Rechtsgrundlagen.....	6
1.4 Andere Richtlinien.....	6
2. Charakterisierung numerischer Sicherheitsnachweise.....	7
2.1 Verifikation und Validierung.....	7
2.2 Benchmark-Untersuchung.....	8
2.3 Parameterstudie.....	8
2.4 Konservative Auslegungsrechnung.....	8
3. Qualitätssicherung bei numerischen Sicherheitsnachweisen.....	9
3.1 Finite-Elemente-Programme.....	9
3.2 Personalqualifikation.....	10
3.3 Verantwortlichkeiten.....	10
4. Anforderungen an numerische Sicherheitsnachweise.....	11
4.1 Formale Anforderungen.....	11
4.2 Vollständigkeit.....	11
4.3 Verwendete Software.....	12
4.3.1 Dokumentation.....	12
4.3.2 Programmbeschreibung.....	12
4.3.3 Programmeignung, Zuverlässigkeit und Qualitätssicherung.....	12

4.4	Modellbildung.....	12
4.4.1	Mathematisches Modell.....	13
4.4.2	Materialdaten und -modelle.....	13
4.5	Datenumfang.....	14
4.5.1	Eingabedaten.....	14
4.5.2	Maßgebliche Ergebnisse.....	14
4.5.3	Sonstige Ergebnisse.....	14
4.6	Darstellung der Ergebnisdaten.....	15
4.6.1	Datenaufbereitung.....	15
4.6.2	Grafische Darstellung.....	15
4.6.3	Tabellarische Darstellung.....	15
4.6.4	Darstellung sonstiger Ergebnisse.....	16
4.7	Beurteilung der Berechnungsergebnisse.....	16
4.7.1	Kontrollen.....	16
4.7.2	Genauigkeit der Ergebnisse.....	17
4.7.3	Ergebnisbewertung.....	17
5.	Prüfung numerischer Sicherheitsnachweise.....	18
	Literatur und Unterlagen.....	19

1 Einleitung

1.1 Anwendungsbereich

Diese Richtlinie gilt im Verantwortungsbereich der BAM-Prüf- und Begutachtungstätigkeit und ist anzuwenden bei der Erstellung und Prüfung von Sicherheitsnachweisen für Transport- und Lagerbehälter für radioaktive Stoffe, die teilweise oder ganz auf computergestützten numerischen Berechnungen beruhen. In den dafür eingesetzten Rechenprogrammen für mechanische und thermische Analysen wird als Lösungsverfahren für die das Verhalten der Behälterbauteile unter Prüfanforderungen beschreibenden Differentialgleichungssysteme vorrangig die Methode der finiten Elemente (FEM) verwendet. Die Richtlinie gilt sinngemäß aber auch für andere numerische Verfahren, wie die Methode der finiten Differenzen oder die Randelementmethode.

1.2 Zweck

Die Richtlinie dient der Qualitätssicherung bei der Erstellung, Kontrolle und Beurteilung von Sicherheitsnachweisen, die auf einer numerischen Analyse von Problemstellungen basieren, welche zum Prüf- und Begutachtungsumfang für Transport- und Lagerbehälter gehören. Sie soll insbesondere die Grundlage für die korrekte Durchführung der numerischen Analyse nach dem Stand von Wissenschaft und Technik bilden und die Prüfbarkeit des numerischen Sicherheitsnachweises unterstützen. Ihre Anwendung gewährleistet die Nachvollziehbarkeit des Berechnungsganges und der den Berechnungen zugrunde liegenden Voraussetzungen und Annahmen.

1.3 Rechtsgrundlagen

Die sicherheitstechnischen Anforderungen an die Auslegung von Transportbehälter für radioaktive Stoffe basieren auf den Empfehlungen der International Atomic Energy Agency (IAEA) in Wien [1], die über die nationalen und internationalen Gefahrgutbeförderungsvorschriften verbindlich gemacht worden sind (siehe dazu z. B. für den Transportträger Straße die Literatur [2]). Darin sind diejenigen Prüfbedingungen und Störfallszenarien definiert, für die Sicherheitsnachweise im Rahmen der verkehrsrechtlichen Verfahren für die Zulassung von Behälterbauarten zu erbringen sind.

Auf der Grundlage des Paragraphen 6 des Atomgesetzes [3] resultieren für die sichere Aufbewahrung von Kernbrennstoffen und radioaktiven Abfällen weitere nationale Prüfanforderungen aus den anlagespezifischen Störfallanalysen, den RSK-Leitlinien [25] oder aus Paragraph 3 der Strahlenschutzverordnung [4] für Abfallbehälterzwischenlager und –endlager, beispielsweise aus den allgemeinen Annahmebedingungen für die Zwischenlagerung radioaktiver Abfälle (z. B. [5]) und aus den Anforderungen an endzulagernde radioaktive Abfälle (z. B. [6, 7]).

1.4 Andere Richtlinien

Diese Richtlinie nimmt sowohl Bezug auf die KTA-Regel 3201.2 [8] und dort insbesondere auf Kapitel 9 und Anhang B3 als auch auf die „Richtlinie für das Aufstellen und Prüfen EDV-unterstützter Standsicherheitsnachweise“ [9] und erweitert bzw. modifiziert die dort gemachten Vorgaben bzgl. der Anforderungen an Form, Art und Umfang des Sicherheitsnachweises im Hinblick auf den im Abschnitt 1.1 genannten Anwendungsbereich. Hinsichtlich der konkreten Umsetzung der im Kapitel 3 genannten allgemeinen Aspekte der Qualitätssicherung numerischer Sicherheitsnachweise wird Bezug auf das NAFEMS Quality System Supplement to BS EN ISO 9001 [16] genommen.

2 Charakterisierung numerischer Sicherheitsnachweise

Da numerische Sicherheitsnachweise je nach der Güte der Modellbildung (Abschnitt 4.4.1) nur auf Näherungslösungen basieren können, werden im Folgenden die Anforderungen an solche Nachweise unter Berücksichtigung ihrer Zielsetzung im Sinne dieser Richtlinie formuliert und kommentiert. Bezüglich der in dieser Richtlinie verwendeten Fachbegriffe wird auf die einschlägige Fachliteratur, z. B. [20] bis [22] und [8], Anhang B.3.2 verwiesen.

2.1 Verifikation und Validierung

Der Verifikationsbericht dient zum Nachweis, dass das verwendete FE-Modell (siehe Abschnitt 4.4) mit seinen Eingabeparametern (insbesondere Materialgesetze und -kennwerte u. a.) die technische Aufgabenstellung, d. h. die zu untersuchende physikalische Realität hinreichend genau beschreibt. Dies kann geschehen durch den Vergleich mit hinreichend gesicherten experimentellen Ergebnissen oder unter Bezugnahme auf exakte analytische Lösungen (Aussagen zur Genauigkeit, s. Abschnitt 4.7.2).

Diese beiden Nachweisverfahren sind jedoch bei komplizierten dreidimensionalen Problemstellungen im Allgemeinen nicht ohne weiteres durchführbar, weil es entweder keine exakte Referenzlösung gibt oder zu wenig repräsentative Versuchsergebnisse vorliegen. In diesem Fall kann die technische Aufgabenstellung verifiziert werden, indem vorher mittels geeigneter Teil- bzw. Ersatzmodelle wichtige Eingabeparameter separat verifiziert wurden (vgl. 4.7.1).

Eine Validierung im Sinne dieser Richtlinie ist die Bestätigung durch die BAM, dass die Verifikation eines FE-Modells oder wichtiger Eingabeparameter für komplexe FE-Modelle, wie z. B. spezielle Materialgesetze für nachgiebige Aufprallobjekte (Lagerfundamente, Stoßdämpfer) erfolgreich abgeschlossen wurde.

2.2 Benchmark-Untersuchung

Benchmark-Untersuchungen dienen in erster Linie zur Überprüfung der Rechenalgorithmen eines FE-Programmes, z. B. anhand analytisch lösbarer physikalischer Aufgabenstellungen [23].

Zum Benchmarking gehören auch Vergleichsrechnungen mit verschiedenen Programmen unter Verwendung des gleichen FE-Modells im Sinne einer Erprobung eines für die konkrete Anwendung vorgesehenen Programmes, siehe hierzu beispielsweise den SANDIA-Bericht „Sample Problem Manual for Benchmarking of Cask Analysis Codes“ [24]. Hierdurch gewinnt man in erster Linie Erkenntnisse über die Eignung (Abschnitt 4.3.3) des jeweiligen FE-Programmes für die zu untersuchende technische Aufgabenstellung. Damit ist allerdings das verwendete FE-Modell noch nicht verifiziert.

2.3 Parameterstudie

Parameterstudien dienen der gezielten Untersuchung der Auswirkungen auf Berechnungsergebnisse, wenn für ein bestimmtes Szenarium (z. B. eine Fallposition) bestimmte Vorgaben (Materialgesetz oder -parameter, Elementierung, Rand- oder Kontaktbedingungen) unter Berücksichtigung möglicher Schwankungsbreiten variiert werden. Eine plausible Interpretation der zugehörigen Ergebnisse liefert wichtige Erkenntnisse im Hinblick auf die (ggf. konservative) Eignung verwendeter FE-Modelle sowie die Sensitivität der Berechnungsergebnisse bezüglich des Toleranz-/ Unsicherheitsbereichs von Eingabeparametern und Optionen.

2.4 Konservative Auslegungsrechnung

Eine konservative Auslegungsrechnung wird mit dem Ziel der Ermittlung von Grenzwerten in den Zielgrößen technischer Aufgabenstellungen (z. B. Spannungen, Verformungen, Temperaturen) durchgeführt. Sie kann sich als zweckmäßig oder notwendig erweisen, wenn wichtige Eingabeparameter (wie z. B. Materialgesetze) nur unzureichend bekannt sind und die mit konservativen Annahmen erzielten Ergebnisse in zulässigen Bereichen liegen.

Bei einem nichtlinearen FE-Modell kann aus der Konservativität der Eingabedaten nicht ohne weiteres auf die Konservativität der Ergebnisse geschlossen werden, d. h. es muss nachvollziehbar begründet werden, dass die Ergebnisse sicherheitstechnisch wirklich relevant sind. Dies kann durch theoretisch begründete Plausibilitäts- und Analogiebetrachtungen oder durch Parameterstudien nachgewiesen werden.

3 Qualitätssicherung bei numerischen Sicherheitsnachweisen

3.1 Finite-Elemente-Programme

FE-Programme müssen bedingt durch Änderungen des Quelltextes (infolge Verbesserungen oder Einführung neuer Merkmale) und durch die nötige Anpassung an neue Hardware und Betriebssystem-Software einem ständigen Kontrollprozess unterliegen [15]. Dies leisten i. A. die kommerziellen Anbieter von FE-Software oder unabhängige Organisationen wie z. B. die NAFEMS. Arbeitet der Software-Anbieter nicht nach einem akkreditierten Qualitätssicherungssystem oder wird vom Antragsteller im Quelltext vorliegende eigene oder fremde Software eingesetzt, so sind qualitätssichernde Maßnahmen z. B. in Anlehnung an [16] durchzuführen und der BAM gegenüber zu dokumentieren. Dies gilt sowohl für das eigentliche FE-Berechnungsprogramm als auch für die verwendeten Pre- und Postprozessoren (d. h. Software für die Netzgenerierung und grafische Aufbereitung der Berechnungsergebnisse). Qualitätssichernde Maßnahmen des Programmanbieters entbinden den Anwender nicht von seiner Sorgfaltspflicht in dem Sinne, dass bei neuen Programmversionen oder sonstigen Änderungen der Softwareumgebung die Plausibilität der Berechnungsergebnisse durch den Vergleich mit einzelnen älteren Berechnungen und damit die Eignung und Genauigkeit für den konkreten Einsatz jeweils neu zu überprüfen ist [17].

3.2 Personalqualifikation

Eine korrekte Anwendung der FE-Methode im Sinne dieser Richtlinie erfordert neben einer adäquaten technisch-wissenschaftlichen Grundqualifikation in den Bereichen EDV, Numerik und Ingenieurwissenschaften einschlägige Erfahrungen im Lösen ähnlich gelagerter technischer Aufgabenstellungen mittels numerischer Lösungsverfahren.

Die in [16] Appendix C -Personnel competence- genannten konkreten Vorgaben werden als geeignete Grundlage für die der BAM nachzuweisenden Anforderungen betrachtet.

3.3 Verantwortlichkeiten

Wurde der numerische Sicherheitsnachweis von einem Dritten (Ersteller) durchgeführt, so ist der Auftraggeber verpflichtet, auf die Einhaltung dieser Richtlinie durch den Dritten zu achten. Dies schließt auch die Beibringung der in 3.1 und 3.2 genannten Nachweise mit ein. Weiterhin trägt er die fachliche Verantwortung für die Vollständigkeit und Richtigkeit des numerischen Sicherheitsnachweises, u. a., weil der Auftraggeber durch Vorgaben bei der Auftragserteilung maßgeblich den Analyseaufwand mitbestimmt und sein eigenes Qualitäts-Management-System ihn zur Kontrolle der Fremdleistung verpflichtet.

4. Anforderungen an numerische Sicherheitsnachweise

4.1 Formale Anforderungen

Bezüglich der generell einzuhaltenden formalen Anforderungen wie Wahl der Begriffe, Formelzeichen, Einheiten, Ordnungssysteme usw. an numerisch geführte Sicherheitsnachweise wird auf [9], Abschnitt 4.3 verwiesen.

4.2 Vollständigkeit

Der numerische Sicherheitsnachweis ist vollständig, wenn der Bericht alle für die Kontrolle des Nachweises wesentlichen Angaben nachvollziehbar enthält. Insbesondere muss der Sicherheitsnachweis die Anforderungen der Rechtsgrundlagen (s. Abschnitt 1.3) hinsichtlich der nachzuweisenden Ergebnisse erfüllen. Der zur Dokumentation und Prüfung vorzulegende Bericht sowie die zugehörigen Unterlagen haben insbesondere die hier im Überblick zusammengestellten und in den nachfolgenden Unterabschnitten genauer erläuterten Anforderungen zu erfüllen hinsichtlich:

- Angaben zur verwendeten Software (Abschnitt 4.3),
- Angaben zur Modellbildung (Abschnitt 4.4),
- Anforderungen an Umfang und Darstellung der Eingabedaten (Abschnitt 4.5),
- Anforderungen an Umfang und Darstellung der Ergebnisse (Abschnitt 4.6),
- Beurteilung der Berechnungsergebnisse (Abschnitt 4.7) sowie
- Referenzen, Literaturhinweise und Quellenangaben.

4.3 Verwendete Software

4.3.1 Dokumentation

Die vollständige schriftliche oder elektronische Dokumentation des oder der eingesetzten Programme sind in der verwendeten Version zu benennen (z. B. Literaturverweis) und auf Anforderung der BAM zur Verfügung zu stellen.

4.3.2 Programmbeschreibung

Die wesentlichen Aspekte zur Funktionsweise, zu den Berechnungsmöglichkeiten und zu den besonderen Vorzügen bzw. Nachteilen des Programmsystems sind in allgemein verständlicher Form in Bezug auf die zu lösende Aufgabenstellung zu beschreiben.

4.3.3 Programmeignung, Zuverlässigkeit und Qualitätssicherung

Der Nachweis der prinzipiellen Programmeignung kann u. a. durch den Rückgriff auf öffentlich zugängliche Publikationen erfolgen. Die Anwendbarkeit und die Zuverlässigkeit des Programmsystems (s. [8], Anhang B.3.3.2.3) im Hinblick auf die zu behandelnde Aufgabenstellung sind an mindestens zwei Beispielen nachzuweisen. Diese Beispiele können entweder selbst erarbeitet oder aus der Literatur entnommen sein, müssen aber in jedem Fall als verifiziert (vgl. 2.1) gelten. Bezüglich der erforderlichen Nachweise über die durchgeführten qualitätssichernden Maßnahmen wird auf das Kapitel 3 verwiesen.

4.4 Modellbildung

Grundlegend für jede numerische Analyse ist, dass für den jeweiligen mechanischen oder thermischen Sicherheitsnachweis ein geeignetes mathematisches Modell definiert werden muss ([18], [20] S. 2ff). Dazu gehört die Festlegung der Belastung, der Geometrie, der Materialeigenschaften sowie der Kontakt-, Übergangs-, Rand- und Anfangsbedingungen. Bereits hier findet i. A. eine Idealisierung der technischen Aufgabenstellung durch die Vereinfachung der Geometrie und die Wahl der Randbedingungen (z. B. Kontaktbedingungen) statt. Dieses mathematische Modell wird in einem zweiten Schritt z. B. mit Hilfe der Methoden der Finite-Elemente gelöst. Dazu

wird die Geometrie mittels sog. finiter Elemente diskretisiert (sog. FE-Netz). Die gewählte Netzdichte in Verbindung mit einem oder mehreren geeignet zu wählenden Elementtypen und den verwendeten weiteren Lösungsparametern (Materialgesetze usw.) ist entscheidend für die Genauigkeit und das Konvergenzverhalten des verwendeten numerischen Ersatzmodells (FE-Modell). Das FE-Modell stellt somit die Summe der Eingabedaten für das Berechnungsprogramm zur numerischen Beschreibung des gewählten mathematischen Modells dar.

Im Folgenden werden die im Sicherheitsnachweis zu behandelnden diesbezüglichen Gesichtspunkte bei der Modellbildung konkretisiert.

4.4.1 Mathematisches Modell

Das gewählte mathematische Modell und die für die numerische Lösung mittels der Methode der finiten Elemente darüber hinaus benötigten Lösungsparameter sind zu beschreiben und ihre Eignung unter den nachfolgend angegebenen Gesichtspunkten zu begründen:

- a) geometrischer Vergleich mit der Realität (Übersichtsskizzen inkl. der vorgenommenen Vereinfachungen der Bauteilgeometrien und Verweise auf die verwendeten technischen Zeichnungen),
- b) gewählte grafische Darstellung der Diskretisierung der Gesamtstruktur und wichtiger Teilbereiche (ggf. in verschiedenen Perspektiven),
- c) möglichst grafische Abbildung der Randbedingungen, wie Fesselungen und/oder Kontaktbedingungen, und ggf. sog. Zwangsbedingungen zwischen Knoten,
- d) gewählte Elementtypen und Netzdichte,
- e) Lastannahmen (z. B. gewählte Fallposition, Lasteinleitung, Wärmequellen) und Rand-, Kontakt-, Übergangs- und Anfangsbedingungen.

4.4.2 Materialdaten und -modelle

Die verwendeten Materialdaten und deren Abhängigkeit von signifikanten Einflussgrößen sind grafisch und in tabellarischer Form anzugeben. Die Eignung der verwendeten Materialmodelle für die zu lösende Aufgabenstellung ist zu begründen.

Sind für sicherheitsrelevante Bauteile (z. B. Behälterkörper, Deckel, Schrauben, Dichtungen, Abschirmmaterialien) oder für Teile, die die Ergebnisse numerischer Analysen stark beeinflussen (z. B. Stoßdämpfer, nachgiebige Aufprallobjekte bei

mechanischen Analysen), keine ausreichend abgesicherten Daten verfügbar, so sind experimentelle Einzeluntersuchungen zur Ermittlung der Materialdaten durchzuführen. Alternativ kann durch eine Parameterstudie die Konservativität der Berechnungsergebnisse bzgl. der gewählten Materialdaten nachgewiesen werden (beachte hierzu Abschnitt 2.4).

4.5 Datenumfang

4.5.1 Eingabedaten

Die in numerisch geführten Sicherheitsnachweisen zu dokumentierenden Eingabegrößen müssen diejenigen Daten vollständig umfassen, die für eine unabhängige Reproduktion der FE-Berechnung notwendig sind. Dazu zählt die Datenbank des Preprozessors, die Eingabe-Datei für das FE-Berechnungsprogramm und ggf. die Ausgabe-Datei des Preprozessors, wenn diese per Editor manuell bearbeitet wurde, um die erwähnte Eingabe-Datei zu erzeugen. Diese Dateien sind auf CD zu speichern und unverzichtbarer Teil des Sicherheitsnachweises.

Eine hinreichende Beschreibung des Aufbaus der Eingabe-Datei ist beizufügen, so dass eine Kontrolle der Eingabedaten jederzeit auch unabhängig vom verwendeten FE-Berechnungsprogramm möglich ist.

4.5.2 Maßgebliche Ergebnisse

Die maßgeblichen Ergebnisse bilden die Basis für die abschließende sicherheitstechnische Bewertung der Ergebnisse der Analyse. Die Auswahl der für den Sicherheitsnachweis gewählten maßgeblichen physikalischen Größen (z. B. bestimmte lokale Spannungskomponenten oder Vergleichsspannungen, Beschleunigungsverläufe, Bauteiltemperaturen bzw. -verläufe usw.) ist zu begründen.

4.5.3 Sonstige Ergebnisse

Die sonstigen Ergebnisse (z. B. Verformungsbilder, Spannungsverteilungen, Energiebilanzen, Wärmestrom- und Temperaturfelder) dienen dem Nachweis der Richtigkeit der durchgeführten Berechnungen und sollen einfache Plausibilitätskontrollen ermöglichen.

4.6 Darstellung der Ergebnisdaten

4.6.1 Datenaufbereitung

Die Ergebnisdaten sind derart darzustellen, dass alle für die Bearbeitung der jeweiligen Aufgabenstellung wesentlichen Gesichtspunkte (Dokumentation, Diskussion und Prüfbarkeit des gewählten FE-Modells, Bewertung und ggf. Verifikation der Berechnungsergebnisse) in übersichtlicher und nachvollziehbarer Form vorliegen.

Die Zuordnung der im Bericht beschriebenen Eingabedaten zur Eingabe-Datei des FE-Berechnungsprogramms muss nachvollziehbar und eindeutig sein.

4.6.2 Grafische Darstellung

Die Darstellung der Berechnungsergebnisse sollte bevorzugt in grafischer Form erfolgen. Eine hinreichend genaue Auflösung und Ablesbarkeit muss hierbei gewährleistet sein.

Ausgehend von der globalen Darstellung bestimmter Temperatur-, Spannungs- oder Verschiebungsfelder in der Gesamtstruktur bzw. größeren Teilstrukturen sind die Detailergebnisse für die besonders kritischen und damit für die Auslegung relevanten Bereiche der Struktur darzustellen. Diese Detailergebnisse (wie z. B. lokale Spannungen, Dehnungen, Temperaturen) sind als Funktion des Ortes und der Zeit darzustellen. Bei der Simulation von Behälterabstürzen oder der Erhitzungsprüfung ist die Berechnung bis zu einem Zeitpunkt durchzuführen, bis zu dem unzweifelhaft die maximalen Werte der jeweils sicherheitstechnischen Parameter (Spannungen, Verformungen, Temperaturen o. Ä.) erreicht wurden.

Typische grafische Darstellungen beinhalten z. B.:

- geometrische Ausgangskonfigurationen,
- unter Belastung verformte Strukturen,
- Spannungs- oder Temperaturzustände für ausgewählte Strukturbereiche und
- zeitabhängige Verläufe von Verschiebungen und Spannungen.

4.6.3 Tabellarische Darstellung

Bestimmte für die sicherheitstechnische Bewertungen maßgebliche Ergebnisse sind zusammen mit den maximal zulässigen Grenzwerten in Tabellen übersichtlich anzugeben.

4.6.4 Darstellung sonstiger Ergebnisse

Hierzu zählen z. B.:

- grafische Darstellungen stark verformter FE-Netze im Bereich von Auftreffpunkten (Stoßdämpferverformung, Penetration des Behälters in nachgiebigem Untergrund),
- Weg-, Geschwindigkeits- und Beschleunigungs-Zeitverläufe von Masseschwerpunkten oder Temperatur-Zeitverläufe ausgewählter Teilstrukturen (Deckel, Behälterkörper, Dichtungen, Inhalt, Moderator, ...),
- Energiebilanzen (Aufschlüsselung der Teilenergien für das Gesamtmodell bzw. für ausgewählte Teilsysteme) oder Wärmestromfelder und ggf. vom Programm berechnete Wärmeübergangszahlen.

4.7 Beurteilung der Berechnungsergebnisse

4.7.1 Kontrollen

Die Kontrolle der Eingabedaten ([8] Anhang B3.3.1.6) und der Berechnungsergebnisse durch den Ersteller ist unerlässlich. Zu beachten sind insbesondere die Aussagen in [8] (Anhang B3.3.3 „Beurteilung von Rechenergebnissen“).

Geeignet sind beispielsweise

- analytische oder numerische Kontrollen mit einer vereinfachten Struktur,
- Kontrollen durch den Vergleich mit experimentellen Ergebnissen,
- Kontrollen durch Netzverfeinerungen (siehe 4.7.2, letzter Absatz) oder
- Vergleiche mit Referenzbeispielen.

Basierend auf diesen Kontrollen ist die Genauigkeit der Berechnungsergebnisse im Hinblick auf die Verhältnisse bei der realen Struktur zu ermitteln. Dazu gehören die Bewertung der Einflüsse vereinfachender Modellannahmen, möglicher Schwankungsbreiten von Materialkennwerten und numerisch bedingter Ungenauigkeiten auf die Berechnungsergebnisse.

4.7.2 Genauigkeit der Ergebnisse

Die Berechnungsergebnisse stellen bedingt durch die Abbildung der technischen Aufgabenstellung in ein mathematisches Modell (physikalische Diskretisierung) und durch die Lösung dieser Idealisierung mittels finiter Elemente (numerische Approximation) in zweifacher Hinsicht eine Näherungslösung ([8], Anhang B.3.2.3.2) dar.

Wird die Verifikation eines FE-Modells durch den Vergleich mit einer exakten analytischen Lösung durchgeführt, so darf die Abweichung der Ergebnisse nicht mehr als $\pm 5\%$ zu betragen. Beim Vergleich mit dem Experiment gilt als Richtwert, dass die Ergebnisse der Rechnung innerhalb des Vertrauensbereiches der Messergebnisse liegen müssen.

Um Aussagen zur numerischen Genauigkeit nachprüfbar angeben zu können, ist es erforderlich, die ausreichende Diskretisierung durch Netzverfeinerung ([8], Anhang B 3.3.3.3.1) nachzuweisen, eine Variation der Zeitschritte vorzunehmen und eine Analyse der Spannungs(Temperatur-)sprünge in benachbarten Elementen in Bereichen mit großen Spannungs(Temperatur-)gradienten ([8], Anhang B 3.3.3.2) durchzuführen. Bezüglich der Fehlerabschätzung und Aussagen zur Konvergenz von FE-Ergebnissen wird auf [20], S. 263ff verwiesen.

4.7.3 Ergebnisbewertung

Im Anschluss an die Kontrolle des FE-Modells und die Beurteilung der Genauigkeit der Ergebnisse im Sinne einer ausreichend genauen mathematischen Abbildung der technischen Aufgabenstellung ist eine Bewertung der maßgeblichen Ergebnisse durchzuführen [19].

Die für die Bewertung der Ergebnisse und für den Vergleich mit zulässigen Materialbeanspruchungen zu beachtenden Regeln leiten sich aus den spezifischen Anforderungen an die Spannungs(Temperatur-)bewertung in Verbindung mit dem jeweiligen Behälterbauteil und -werkstoff ab. Hinsichtlich der mechanischen Bewertung und Materialkennwerte sind z. B. die FKM-Richtlinie [10,11], das IAEA-TECDOC-717 [12], die BAM-Leitlinie „Duktiles Gusseisen“ [13] und die KTA-Regeln 3905 [14] und 3201.2 [8] zu beachten.

5. Prüfung numerischer Sicherheitsnachweise

Die BAM prüft den Sicherheitsnachweis auf Vollständigkeit und Nachvollziehbarkeit im Sinne dieser Richtlinie. Liegen formale Mängel vor, wird der Ersteller bzw. der Antragsteller mit Bezug auf die entsprechenden Abschnitte dieser Richtlinie aufgefordert, diese zu beseitigen.

Die Richtigkeit der Eingabedaten des FE-Modells sowie der Ergebnisse wird durch eigene Betrachtungen analog zum Abschnitt 4.7 kontrolliert. Die Prüfung der Eingabedaten erfolgt in der Regel EDV-gestützt. Sofern dies nicht möglich ist, wird eine manuelle Stichprobenprüfung durchgeführt.

Ist eine unabhängige Prüfung aufgrund der Komplexität der technischen Aufgabenstellung notwendig, so kann dies durch

- eine eigene Vergleichsberechnung
- oder
- mittels geeigneter experimenteller Untersuchungen
(z. B. Modell- oder Prototypversuche)
- erfolgen.

Die Durchführung von Modell- oder Prototypversuchen kann insbesondere dann notwendig sein, wenn die Ergebnisse der FE-Berechnungen mangels hinreichend verifizierter wichtiger Eingabeparameter (z. B. Materialkennwerte) nicht ausreichend genau quantifiziert werden können oder die Behälterbauart stark von bereits begutachteten Bauarten abweicht.

Literatur und Unterlagen

- [1] International Atomic Energy Agency (IAEA):
Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material,
1996 Edition (Revised), Safety Standards Series No. TS-R-1 (ST-1: Revised)
Vienna, 2000;
http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub1098_scr.pdf
- [2] Europäisches Übereinkommen vom 30. September 1957 über die internationale Beförderung auf der Straße (ADR), BGBl. 1960 II, S. 1489, in Kraft gesetzt mit der 15. ADR-Änderungsverordnung (ADR 2001) vom 15.06.2001 BGBl. 2001 II, S. 654, Anlagen A und B
- [3] Gesetz über die friedliche Verwendung von Kernenergie und den Schutz gegen ihre Gefahren (Atomgesetz) vom 23. Dezember 1959 (BGBl. I, S. 814) in der Fassung der Bekanntmachung vom 15. Juli 1985 (BGBl. I, S. 1565 (BGBl. III 751-1) zuletzt geändert durch Gesetz vom 22. April 2002 (BGBl. I S. 1351));
<http://jurcom5.juris.de/bundesrecht/atg/gesamt.pdf>
- [4] Verordnung über den Schutz vor Schäden durch ionisierende Strahlen (Strahlenschutzverordnung - StrlSchV), 18. Juli 2002;
http://jurcom5.juris.de/bundesrecht/strlschv_2001/gesamt.pdf
- [5] Allgemeine Annahmebedingungen für die zur Zwischenlagerung vorgesehenen radioaktiven Abfälle gem. Auflage 33 der Genehmigung des Staatlichen Gewerbeaufsichtsamtes Lüneburg – GAA vom 27.10.1983 für das Abfalllager Gorleben – ALG, (Technische Annahmebedingungen – TA),
Rev. 2, Stand Dezember 1995
- [6] Brennecke, P. (Hrsg.):
Anforderungen an endzulagernde radioaktive Abfälle (Endlagerungsbedingungen, Stand: Dezember 1995) – Schachtanlage Konrad –,
Bericht ET-IB-79, Bundesamt für Strahlenschutz, Salzgitter, 1995
- [7] Martens, B.-R. (Hrsg.):
Produktkontrolle radioaktiver Abfälle – Schachtanlage Konrad – (Stand: Dezember 1995), Bericht ET-IB-45-REV-3, Bundesamt für Strahlenschutz, Salzgitter, 1995

- [8] Kerntechnischen Ausschuss (KTA):
Sicherheitstechnische Regel des Kerntechnischen Ausschuss (KTA),
KTA 3201.2 -Komponenten des Primärkreises von Leichtwasserreaktoren-,
Teil 2: Auslegung, Konstruktion und Berechnung, Stand 13.07.2000;
http://www.kta-gs.de/deutsch/regeln/3200/3201_2.pdf
- [9] Arbeitskreis „EDV-unterstützter Standsicherheitsnachweis“:
Richtlinie für das Aufstellen und Prüfen EDV-unterstützter Standsicherheitsnachweise, (Ri-EDV-AP 89)
Verkehrsblatt –Verlag, Drucksache Nr. 5219, Dortmund, April 1989
- [10] Forschungskuratorium Maschinenbau e.V. (FKM):
FKM-Richtlinie „Rechnerischer Festigkeitsnachweis für Maschinenbauteile“,
3. Auflage, VDMA Verlag, Frankfurt, 1998
- [11] Hänel, B.:
Richtlinie „Rechnerischer Festigkeitsnachweis für Maschinenbauteile“,
konstruieren + gießen 21 (1996) Nr.3
- [12] International Atomic Energy Agency (IAEA):
IAEA-TECDOC-717,
Guidelines for safe design of shipping packages against brittle fracture,
IAEA, Wien, 1993
- [13] BAM – GGR 007:
Leitlinie zur Verwendung von Gusseisen mit Kugelgraphit für Transport- und Lagerbehälter für radioaktive Stoffe, Rev. 0, Berlin, Juni 2002
- [14] Sicherheitstechnische Regel des Kerntechnischen Ausschuss (KTA):
KTA 3905 -Lastanschlagspunkte an Lasten im Kernkraftwerk-;
<http://www.kta-gs.de/deutsch/regeln/3900/3905n.pdf>
- [15] IAEA:
Quality Assurance for Software Important to Safety,
Technical Reports Series No. 397,
IAEA, Vienna, 2000
- [16] NAFEMS:
Quality System Supplement to ISO 9001 Relating to Finite Element Analysis
in the Design and Validation of Engineering Products, Issue 2. 17th June 1997
NAFEMS Ltd., U.K. 1997

- [17] SAFESA (SAFE Structural Analysis):
Qualitätssicherung in der Strukturmechanik durch die Finite-Elemente-Analyse:
- SAFESA Management Guidelines
- SAFESA Quick Reference Guide
- SAFESA Technical Manual
<http://www.nafems.org/publications/index.htm>
- [18] Baguley, D., Hose, D. R.:
How to – Model with Finite Elements,
NAFEMS Ltd., U.K. 1997
- [19] Baguley, D., Hose, D. R.:
How to – Interpret Finite Element Results,
NAFEMS Ltd., U.K. 1997
- [20] Bathe, K.-J.:
Finite-Elemente-Methoden, 2. Auflage,
Springer Verlag, 2002
- [21] Argyris, J.H., Mlejnek, H.-P.:
Die Methode der Finiten Elemente,
Bd. 1-3, Vieweg Verlag, Braunschweig
- [22] Zienkiewicz, O. C., Taylor, R. L.:
The Finite Element Methode, 5. Auflage,
Bd. 1-3, Arnold Verlag, 2000
- [23] Davies, G. A. O.:
Background to Benchmarks,
NAFEMS Ltd., U.K. 1993
- [24] SANDIA:
SAND88-0190.TTC-0780.UC-71, Sample Problem Manual for Benchmarking of Cask Analysis Codes, February 1988
- [25] Reaktorsicherheitskommission (RSK):
Sicherheitstechnische Leitlinien für die trockene Zwischenlagerung bestrahlter Brennelemente in Behältern, gebilligt in der RSK-Sitzung am 5. April 2001;
<http://www.rskonline.de/Download/leitlinien/LEITLINIEN050401.pdf>