

Transportbehälter für radioaktive Stoffe mit einer Typ-B-Versandstückzulassung müssen auch bei schweren Unfallbeanspruchungen sicherstellen, dass das radioaktive Inventar sicher umschlossen, eine unterkritische Anordnung gewährleistet und ionisierende Strahlung ausreichend abgeschirmt ist. Bei der Bewertung von Transportbehältern für radioaktive Stoffe im Rahmen der Bauartprüfung sowie für Risikoanalysen beim Transport radioaktiver Stoffe ist eine Simulation des Verhaltens holzgefüllter, stoßdämpfender Bauteile von Transportbehältern von großem Interesse, da diese in einer Unfallsituation einen Großteil der Aufprallenergie aufnehmen und damit die maximale Stoßkraft deutlich verringern. Damit haben die stoßdämpfenden Bauteile maßgeblichen Einfluss auf die Einhaltung der vom Versandstück zu gewährleistenden Schutzziele.

Das Verhalten stoßdämpfender Bauteile wird von einer Vielzahl von Parametern wie Stoßdämpferkonstruktion, Materialeigenschaften und Beanspruchungsrandbedingungen beeinflusst. Es bestehen Unsicherheiten bei der Anwendung von vereinfachten numerischen Verfahren zur Berechnung derartiger Bauteile. Für die Simulation mit Hilfe von komplexen numerischen Verfahren wie dynamische Finite-Elemente-Methoden (FEM) ist bisher keine Modellbildung für die Kompression von Holz in axialer Richtung bei großen Deformationen erfolgt. Die in dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen haben sich daher auf die Modellbildung sowie die Untersuchung der Anwendbarkeit verschiedener Modellierungsformen konzentriert.

Auf Basis von Erkenntnissen aus der Analyse stoßdämpfender Bauteile von Prototypen von Brennelementtransportbehältern nach einer 9-m-Fallprüfung auf ein unnachgiebiges Fundament und von in dieser Arbeit durchgeführten Stoßversuchen auf Holzproben wurde ein Modell für das Verhalten von Holz bei axialer Beanspruchung und großen Deformationen entwickelt. Das Modell beschreibt die bei der axialen Druckbeanspruchung von Holz auftretende Entfestigung als Funktion der seitlichen Dehnungsbehinderung. Die Energie, die vom Holz absorbiert werden kann, ist umso größer, je größer die seitliche Dehnungsbehinderung ist. Für das stoßdämpfende Bauteil resultiert daraus, dass die Energieabsorptionsfähigkeit des Stoßdämpfers von der Fähigkeit der äußeren Blechstruktur, ein Ausweichen der hoch belasteten Holzpakete zu verhindern, abhängt. Damit wurde ein Modell für das Verhalten von holzgefüllten Stoßdämpfern abgeleitet.

Holz muss, um signifikant Energie zu absorbieren, durch starre Behälter- oder Stoßdämpferstrukturen lagestabilisierend abgedeckt sein. Für einen realistischen Vergleich zwischen gemessener und berechneter Stoßdämpferdeformation ist zu der gemessenen Verformung noch eine elastische Rückfederung des stoßdämpfenden Bauteils nach dem Aufprall zu addieren. Das optische, zur Vermessung von dreidimensionalen Objekten entwickelte Messverfahren der Streifenprojektion wurde erstmalig für die Vermessung von stoßdämpfenden Bauteilen von Transportbehältern für radioaktive Stoffe eingesetzt. Das Verfahren ermöglicht die Aufnahme der genauen Objektgeometrie vor und nach dem Versuch und eignet sich somit sehr gut für eine Schadens- und Verformungsdokumentation der stoßdämpfenden Bauteile von in Fallversuchen untersuchten Prüfmustern.

Es wurde gezeigt, dass für Behälter mit großen, relativ zueinander beweglichen Massen das verbreitete Bewertungsschema der Begrenzung der Starrkörperverzögerung für eine

Beanspruchungsermittlung an den Komponenten des Versandstücks nicht geeignet ist, da das System nicht mehr als Starrkörper aufgefasst werden kann.

Es wurde das vereinfachte numerische Verfahren „ImpactCalc“, mit dem Starrkörperverzögerungen und Stoßdämpferdeformationen ermittelt werden können, entwickelt und bewertet. Das Verfahren kann für mechanische Nachweise der Einhaltung der Schutzziele für Versandstücke mit radioaktiven Stoffen in der Bauartprüfung zielführend eingesetzt werden, wenn das Versandstück exklusive der Stoßdämpfer als Starrkörper betrachtet werden kann und ein entsprechender Sicherheitsfaktor angewendet wird. Für die Risikoanalyse können auf einfache und kostengünstige Weise Beanspruchungen durch verschiedene Unfallsituationen, beispielsweise der Aufprall auf reale Fundamente, abgeschätzt und mit dem Aufprall auf das unnachgiebige Prüfstandsfundament verglichen werden.

Für Finite-Elemente-Verfahren wurde aufbauend auf den Schlussfolgerungen zum Verhalten von Holz bei Kompression unter großen Deformationen ein kontinuumsmechanisches Ersatzmodell vorgeschlagen, das die seitliche Dehnungsbehinderung als Mehrachsigkeit des Spannungszustandes im Ersatzkontinuum in Betracht zieht. Mit Hilfe des kommerziellen Finite-Elemente-Programms LS-DYNA wurde die Anwendbarkeit verschiedener Materialmodelle auf dieses Ersatzmodell sowie weitere vorgeschlagene Modellierungsformen untersucht. Mit keiner der untersuchten Kombinationen ist es gelungen, global das Verhalten von Holz im Nachbruchbereich inkl. Entfestigung zu modellieren.

Durch Simulation eines Fallversuchs mit einer behälterähnlichen Ersatzmasse und stoßdämpfenden Bauteilen wurden verschiedene Modellierungsformen und Detaillierungsgrade für stoßdämpfende Bauteile von Transportbehältern für radioaktive Stoffe untersucht und bewertet. Kann eine weitreichende Verifikation mit experimentellen Methoden vorausgesetzt werden, lässt sich die FEM in Bauartprüfung und Risikoanalyse zielführend für die Beanspruchungsermittlung anwenden. Durch eine experimentelle Verifikation muss das Simulationsmodell an die im Versuch herrschenden Randbedingungen bezüglich der seitlichen Stützung des Holzes angepasst werden.