

Simulation des Flugzeuganpralls auf Stahlbetonstrukturen

Marco Grosse¹, Roger Schlegel¹, Herbert Friedl²

¹Dynardo GmbH, D-99423 Weimar, Steubenstraße 25

²BKW Energie AG – Engineering Risk&Safety, CH-3013 Bern, Viktoriaplatz 2

1 Einführung

Die Attentate vom 11. September 2001 auf das World Trade Center lösten weltweit eine Diskussion zur Überprüfung der Sicherheit von Kernkraftwerken gegenüber Flugzeuganprall aus (s. z.B. [1]). Oftmals sind dabei Stahlbetonkonstruktionen gegenüber Einwirkungen aus Flugzeuganprall zu untersuchen. In den letzten 15 Jahren gab es daher viele Untersuchungen zum Widerstandsverhalten gegen die mechanischen Auswirkungen eines Flugzeugabsturzes. Neben experimentellen Untersuchungen und analytischen Betrachtungen haben insbesondere numerische Simulationen für die Beurteilung der mechanischen Auswirkungen bei einem Flugzeuganprall zunehmende Bedeutung gewonnen.

Der vorliegende Beitrag zeigt das Vorgehen zur Untersuchung eines Stahlbeton-Reaktorgebäudes gegen Flugzeuganprall mittels Impaktsimulationen mit LS-DYNA.

2 Methodik

Um die aus einem Flugzeuganprall resultierenden Antwortgrößen der Tragstruktur berechnen zu können und alle wichtigen Tragreserven des Reaktorgebäudes zu berücksichtigen, wird der Flugzeuganprall mittels Finite-Elemente-Analyse numerisch simuliert. Es werden dynamisch transiente Finite-Elemente-Analysen in LS-DYNA durchgeführt.

Für die numerische Simulation werden zwei Teilmodelle erstellt, ein Teilmodell für das Reaktorgebäude (bestehend unter anderen aus den Bauteilen wie z.B. Fundamentplatte, Außenwand, Dach bzw. Kuppel, Zwischendecken usw.) und ein Teilmodell für das Flugzeug. Die Teilmodelle werden zu einem parametrischen Gesamtmodell kombiniert, wobei das Flugzeug in der betrachteten Anprallsituation und Fluggeschwindigkeit positioniert wird. Mittels des parametrisch aufgebauten Finite-Elemente-Modells werden Varianten der Anprallsituation simuliert und in Grenzwertbetrachtungen relevante Schadensszenarien ermittelt und mit anlagenspezifischen Bewertungskriterien verglichen.

3 Modellierung von Stahlbetonstrukturen

Die Modellierung des Reaktorgebäudes erfolgt als 3D-Modell, wobei unterschiedliche Bereiche definiert werden. Im Aufprallbereich des Flugzeugs muss eine feinere Diskretisierung vorgenommen werden. In diesem Bereich wird der Verbundwerkstoff Stahlbeton durch eine diskrete, räumliche Modellierung von Beton und Bewehrungsstahl abgebildet (s. Fig. 1).

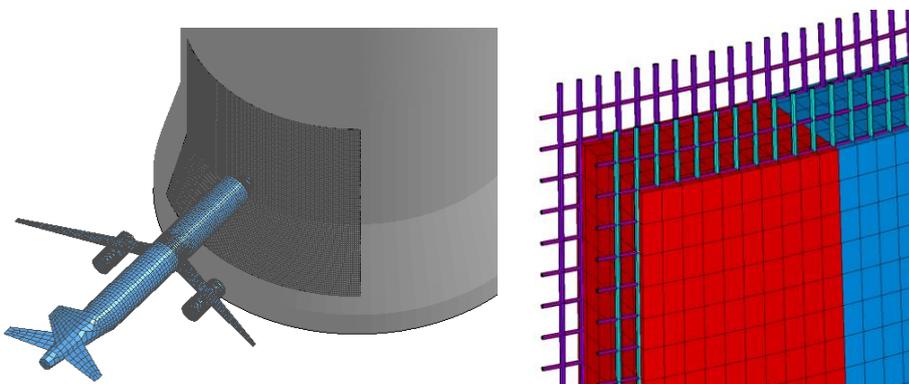


Fig. 1 Detaillierte Stahlbetonmodellierung im Aufprallbereich

Der Beton wird mittels Volumenelementen diskretisiert, die einzelnen Bewehrungsstäbe mittels Stabelementen. Die Bewehrungsmengen werden den Bewehrungsplänen entnommen. Außerhalb des Aufprallbereichs können die Netzdichte vergrößert und die Eigenschaften des Stahlbetons verschmiert betrachtet werden. Für die Modellierung wurde im vorliegenden Fall ANSYS verwendet.

4 Nichtlineare Materialmodellierung von Beton und Bewehrungsstahl

Die Modellierung des Betons und des Bewehrungsstahls basieren auf den Materialdaten die im Rahmen der Qualitätsüberwachung sowie der Alterungsüberwachung am Reaktorgebäude entnommen wurden. Damit wird der Zustand des Reaktorgebäudes unter Beachtung alterungsbedingter Einflüsse sehr realitätsnah berücksichtigt.

Für Impaktberechnungen (insbesondere für Penetrationsuntersuchungen) muss das verwendete Betonmodell folgende Features enthalten:

- konsistente Beschreibung der Betonfestigkeit im Spannungsraum unter Berücksichtigung der Zug- / Druck-Anisotropie sowie der Besonderheiten bei Schubbeanspruchung und Verfestigung unter triaxialen Druckspannungszuständen
- nichtlineares Spannungs-Dehnungsverhalten [5] (Hardening- / Softening) des Betons im Druck- und Zugbereich (verschmierte Rissmodellierung),
- nichtassoziertes plastisches Schädigungsverhalten zur Beschreibung der Dilatanz,
- Dehnratenabhängigkeit der Betondruckfestigkeit (s. Fig. 2)
- robuste numerische Umsetzung (besonders für praktische Projektanwendungen wichtig!)
- Möglichkeit des Erodings bei bestimmten Dehnungskriterien

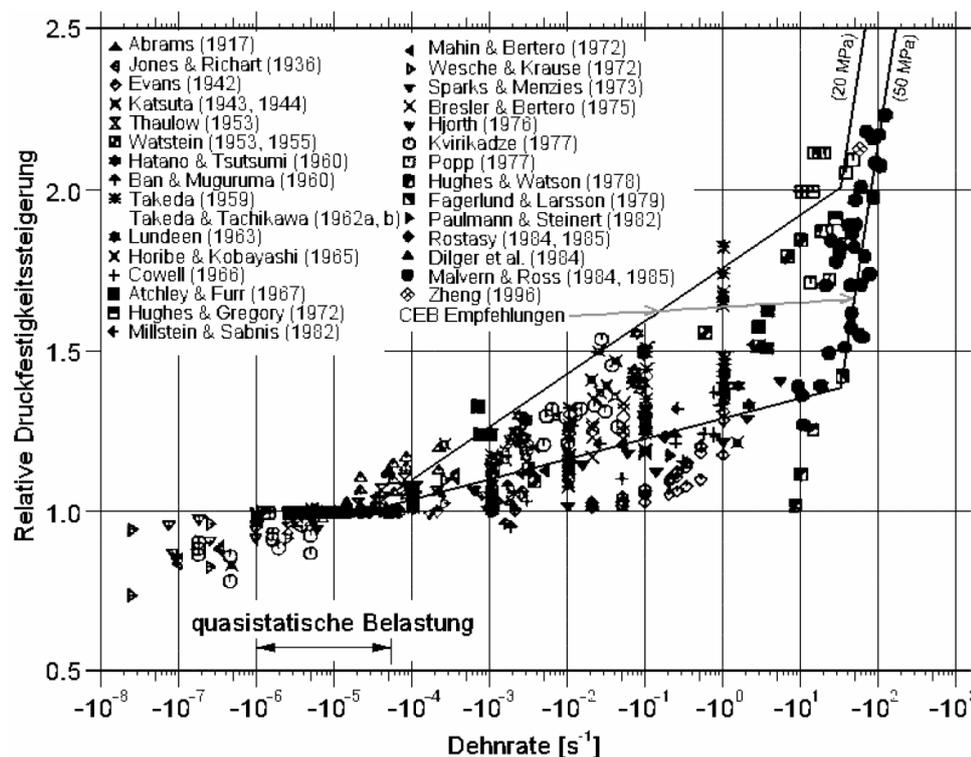


Fig. 2 Abhängigkeit der Betondruckfestigkeit von der Dehnrade nach [2]

LS_DYNA bietet eine große Auswahl von Betonmodellen, welche bei Dynardo seit über 15 Jahren in einer Vielzahl von nichtlinearen Betonanalysen eingesetzt worden sind. Je nach Aufgabenstellung gibt es z.T. große Unterschiede bei der Eignung und Robustheit der einzelnen Modelle. Deshalb ist eine Validierung zur Auswahl des für die Aufgabenstellung geeigneten Materialmodells sehr wichtig [7].

Im Nahbereich der Anprallposition wird der Beton mittels des LS-DYNA Materialmodells 16 (*MAT_PSEUDO_TENSOR) modelliert [6]. In diesem Materialmodell können verschiedene Moden der Materialmodellierung ausgewählt werden. Verwendet wird der als „Tensile failure plus damage scaling“ bezeichnete Mode II.C. Ein wesentlicher Aspekt für die Wahl dieses Materialmodells ist neben der gut nachvollziehbaren physikalischen Plausibilität dessen numerische Robustheit. Allerdings sind

für eine sichere Verwendung des Materialmodells einige zu den im Manual [6], [8] (MAT16, Abschnitt „A Suggestion“) gegebenen Empfehlungen zusätzliche Einstellungen notwendig. Diese wurden durch Nachrechnung von Betonprüfungen nach [9], [10] mittels Parameteridentifikation mit optiSLang [11] bestimmt und betreffen insbesondere die als equation-of-state EOS bezeichnete tabellarische Eingabe der Abhängigkeit des Kompressionentlastungsmoduls K von der Volumenstauchung.

Die Bewehrung wird diskret mit Balkenelementen und dem LS-DYNA Materialmodell 24 (*MAT_PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY) modelliert [6]. Nach [3] verhält sich Betonstahl unter hoher Beanspruchungsgeschwindigkeit im Wesentlichen elastisch-viskoplastisch. Die Materialeigenschaften im elastischen Bereich sind folglich von der Dehnrates nahezu unabhängig, währenddessen für den plastischen Bereich ein viskoses, dehnratenabhängiges Verhalten berücksichtigt werden muss. Der Einfluss der Dehnrates auf die mechanischen Eigenschaften von Bewehrungsstählen wirkt sich demnach in zweifacher Weise günstig auf das Verhalten von Stahlbetonbauteilen unter hohen Belastungsgeschwindigkeiten aus: Sowohl die Erhöhung der Festigkeitswerte als auch der Anstieg der Verformungsfähigkeit führen zu einem erhöhten Arbeitsvermögen der Stahlbetonbauteile. Um den positiven Effekt in den Finite-Elemente-Analysen ausnutzen zu können, werden dehnratenabhängig formulierte, idealisierte Spannungs-Dehnungs-Beziehungen [4] herangezogen.

Das Finite-Elemente-Modell des Reaktorgebäudes berücksichtigt im Anprallbereich alle wichtigen Versagensmoden des Stahlbetons infolge des Flugzeuganpralls (Schub- und Biegeversagen, Durchstanzen) sehr realitätsnah. Fig. 3 zeigt Ergebnisse aus Test- und Validierungsberechnungen.

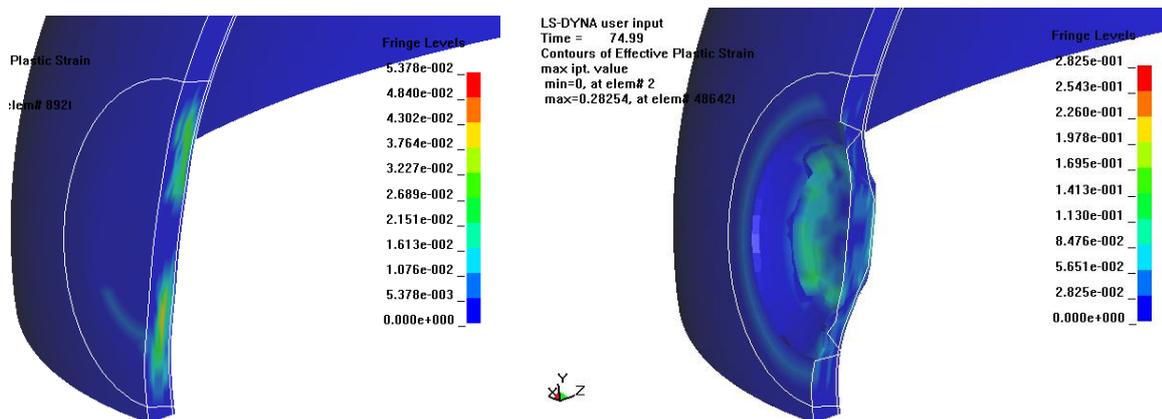


Fig. 3 Validierungsberechnungen Stahlbeton: links kombiniertes Schub- und Biegeversagen; rechts: Durchstanzen

5 Belastung aus dem Flugzeuganprall

Die aus dem Flugzeuganprall resultierenden Belastungen können mit Hilfe von Flugzeugmodellen realitätsnah untersucht werden.

Die Flugzeuggeometrie wird in LS-DYNA als Schalenmodell abstrahiert. Für die Finite-Elemente-Diskretisierung werden Schalenelemente (Belytschko-Tsay, ELFORM=2) verwendet. Fig. 4 zeigt das Modell eines Airbus A320 im Längsschnitt entlang der Rumpfmittle. Darüber hinaus wurden auch Modelle der Flugzeugtypen Airbus A340 und A380 erstellt.

Maßgeblich für das Crashverhalten sowie das Energiedissipationsvermögen sind die Massenverteilung, die Steifigkeiten (Querschnitt des Rumpfes resp. Flächenträgheitsmomente der Wingbox) sowie die plastischen Grenzwiderstände (Bruchmomente, Bruchquerkräfte, Beullasten). Die Massenverteilung, die Steifigkeiten und die plastischen Grenzwiderstände des Flugzeugmodells werden anhand bereitgestellter Herstellerangaben kalibriert und verifiziert.

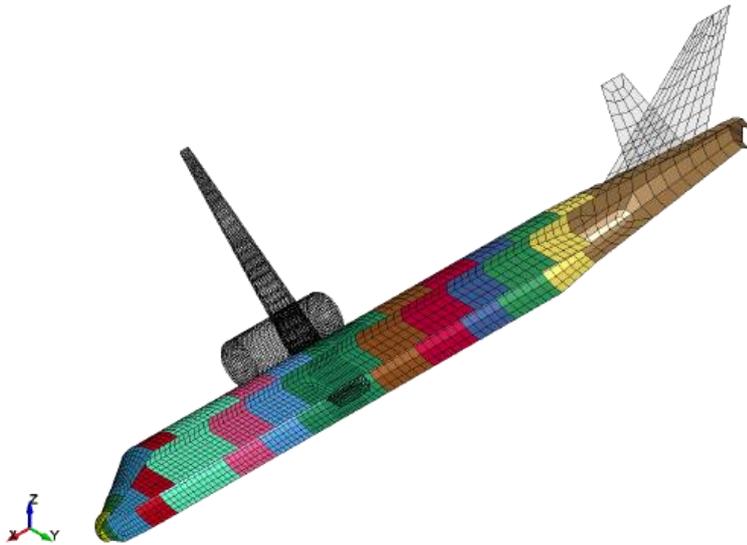


Fig. 4 Schnitt durch das Flugzeugmodell eines A320

6 Validierungsberechnungen und Grenzwertuntersuchungen am Gesamtmodell

Wichtigstes Bewertungskriterium für ein Flugzeugmodell ist die Plausibilität des Crashverhaltens der Flugzeugstruktur beim Anflug gegen einen steifen Zylinder (s. Fig. 5). Dabei ist zu zeigen, dass die Annahmen zu den plastischen Grenzwiderständen plausibel beim Crash nachvollzogen werden können.

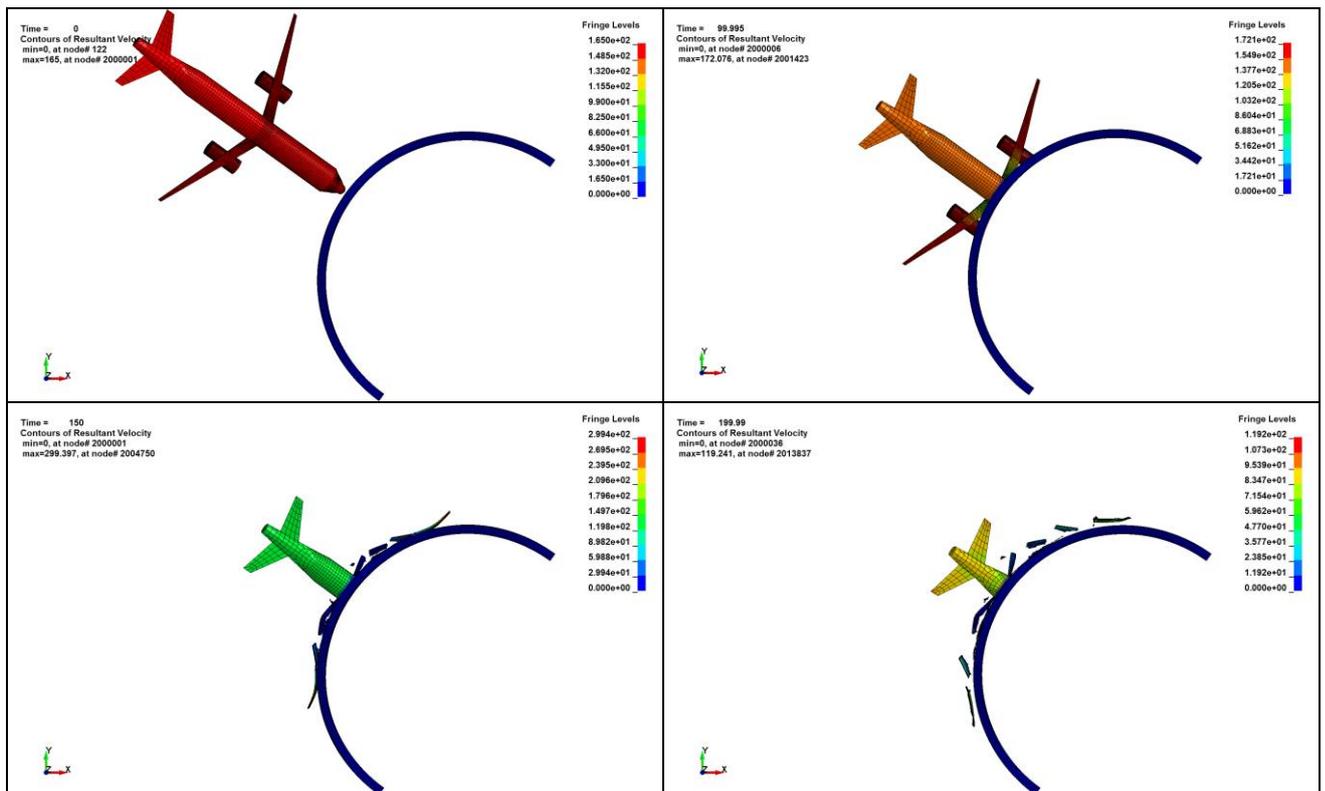


Fig. 5 Validierungsberechnungen Simulation des Anpralls eines A320 an eine steife Wand, Konturplot der Knotengeschwindigkeiten für verschiedene Zeitpunkte

In wichtigen Querschnitten (Normalkraft in typischen Rumpfqerschnitt, Querkraft/Moment im Anschluss Wingbox, Querkraft im Anschluss Triebwerk) werden die Momente sowie die Normal- und Querkräfte ausgewertet und mit den vorgegebenen Kennwerten oder mit frei zugänglichen Daten

verglichen. Weiterhin können zur Plausibilitätsprüfung die mit dem Flugzeugmodell simulierten Last-Zeitfunktionen mit einem vereinfachten Ansatz (z.B. Riera-Kurve) verglichen werden.

Für Grenzwertuntersuchungen zum Flugzeuganprall wird die Verwendung von einem validierten Gesamtmodell, bestehend aus der zu untersuchenden Stahlbetonstruktur (z.B. Reaktorgebäude) und Flugzeugmodell, empfohlen. Dabei können in der Simulation für verschiedene Aufprallszenarien die Interaktionen zwischen dem Flugzeug und dem Stahlbetongebäude energetisch konsistent erfassen werden.

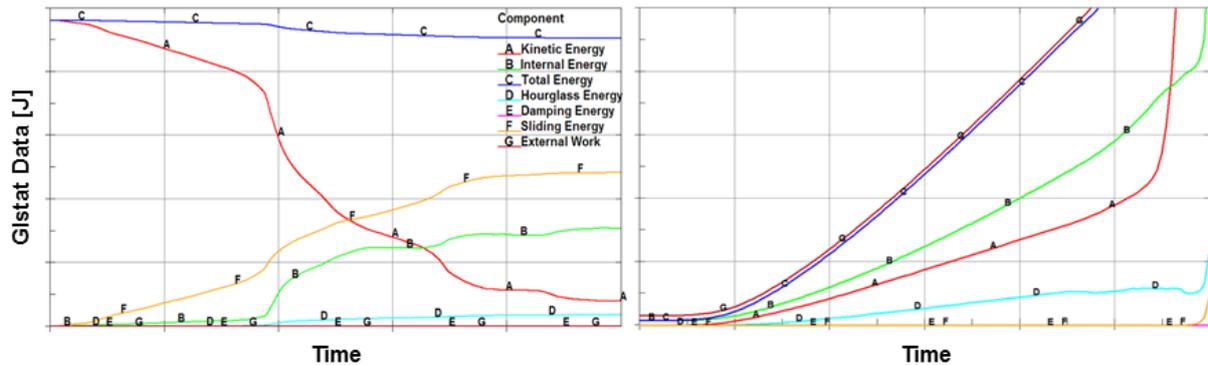


Fig. 6 Energiebilanz einer Anprallsimulation am Gesamtmodell bei großer Schädigungen der Stahlbetonkonstruktion, links: Verwendung eines Flugzeugmodells, rechts: Belastung mittels Druck-Zeitfunktion

In Fig. 6 sind beispielhaft die Energiebilanzen von Anprallsimulationen bei Verwendung eines Flugzeugmodells und bei Belastung mittels Druck-Zeitfunktion gegenübergestellt, in denen große Schädigungen der Stahlbetonkonstruktion auftreten. Im Gegensatz zur Berechnung mit einem Flugzeugmodell ist der Ansatz mit Lastflächen und einer Druck-Zeitfunktion als Belastung für den Flugzeuganprall bezüglich der Energiebilanz unrealistisch und Schädigungen der Stahlbetonkonstruktion werden häufig überschätzt. Dies liegt insbesondere daran, dass die Druck-Zeitfunktion (eingetragene Kraft) unabhängig von der Bauwerksantwort wirkt und äußere Arbeit (Kraft-Weg) verrichtet wird, die sich aus der eingetragenen Kraft und der Verformung ergibt. Der Belastung steht quasi unendlich viel Energie zur Verfügung. Daraus ergeben sich folgende Aspekte:

- Der Berechnungsansatz mit Lastflächen und einer Druck-Zeitfunktion führt nicht zu einem Energiegleichgewicht gegenüber der kinetischen Energie des anfliegenden Flugzeugs.
- Die resultierenden Schädigungen am Bauwerk sind energiegesteuert (plastische Verformungsenergie). Die vom Bauwerk aufnehmbare Energie bis zum Bruchzustand ist im Modell realistisch abgebildet. Die eingetragene Energiemenge ist aber nicht realistisch, daher sind also die Größenordnungen der berechneten Schädigungen nicht unbedingt adäquat zu einem realen Flugzeuganprall.
- Sofern die Belastung so groß wird, dass die Traglast abfällt (Nachbruchverhalten), steigt die externe Arbeit auf Grund der überproportionalen Zunahme der Verformungen sehr stark an. Auf Grund dieser extremen Zunahme der externen Arbeit versagt das Bauwerk schlagartig. Die Bestimmung eines Schadensbildes bei Überschreiten der Traglast ist mit dem Ansatz einer Druck-Zeit-Belastungsfunktion nicht möglich.

7 Zusammenfassung

Für die realitätsnahe Simulation zur Standsicherheit und Integrität von Stahlbetonkonstruktionen gegenüber einem Flugzeugaufprall ist eine möglichst realistische Erfassung der Belastung und der Widerstände von entscheidender Bedeutung.

Die hier vorgestellte FE-Modellierung erfolgt mit ANSYS. Die hochgradig nichtlinearen Simulationen werden mit LS-DYNA durchgeführt. OptiSLang wird zur Parameteridentifikation und Kalibrierung eingesetzt.

Das FE-Flugzeugmodell wird als Schalenmodell modelliert und an globalen Kennwerten (Masseverteilung, Abreißkräfte Flügel/Triebwerke, Beullasten Rumpf) verifiziert. Dieses Vorgehen wurde bereits für die Flugzeugtypen Airbus A320, A340 und A380 umgesetzt.

Die Stahlbetonkonstruktion wird detailliert als Volumen (Beton) und Stabelementen (Hauptstahlbewehrung) modelliert. Alle Materialien werden mit geeigneten elasto-plastischen Modellen inklusive eines Schädigungsverhaltens bis zum Versagen abgebildet und an Materialversuchsdaten verifiziert.

Mittels Anprallsimulationen am Gesamtsystem können in den Grenzwertbetrachtungen sehr plausible Schadensszenarien ermittelt und Aussagen zur Integrität des Stahlbeton-Reaktorgebäudes gegenüber Flugzeuganprall gemacht werden.

8 Literatur

- [1] HSK-AN-4626 Stellungnahme der HSK zur Sicherheit der schweizerischen Kernkraftwerke bei einem vorsätzlichen Flugzeugabsturz, Würenlingen, März 2003 (http://static.ensi.ch/1312876660/fla-bericht_maerz03.pdf)
- [2] Plotzta A.: Ein Verfahren zur numerischen Simulation von Betonstrukturen beim Abbruch durch Sprengen, Dissertation, Universität Fridericiana Karlsruhe, 2002
- [3] Fuchs, M.: Stahlbetonbauteile nach außergewöhnlicher Einwirkung – Schadensquantifizierung und Instandsetzung, Dissertation, Universität der Bundeswehr München, Professur für Massivbau, 2009
- [4] Institut für Baustatik und Konstruktion ETH Zürich Bericht Nr. 7709-1, Zugversuche an Bewehrungsstahl mit erhöhter Dehngeschwindigkeit, Juni 1982
- [5] DIN EN 1992-1-1, Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken – Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau, 01/2011
- [6] LS-DYNA® Keyword User's Manual, Volume II Material Models, August 2012
- [7] Schwer, L.: Concrete & Geomaterial Modeling, Seminarunterlagen 2006
- [8] Dilger, Koch, Kowalzyk, ACI Journal, Title no. 81-11, January-February, Page 73-81, 1984
- [9] DIN EN 12390-1, Prüfung von Festbeton - Teil 1: Form, Maße und andere Anforderungen für Probekörper und Formen, 2001
- [10] DIN EN 12390-5, Prüfung von Festbeton - Teil 5: Biegezugfestigkeit von Probekörpern, 2009
- [11] optiSLang - the optimizing Structural Language version 5.2.0, DYNARDO GmbH, Weimar, 2016, www.dynardo.de, optiSLang Documentation