

# Ein deterministisches Beurteilungsverfahren zur lokalen und globalen Standsicherheit von Tunnelkonstruktionen bei Explosionsereignissen

Markus Nöldgen\*

Alexander Stolz#

\*Schüßler-Plan Ingenieurgesellschaft mbH, Düsseldorf

#Fraunhofer Institut für Kurzzeitdynamik, Ernst-Mach-Institut, Freiburg

## 1. EINFÜHRUNG

Zur Beurteilung der Kritikalität eines Bauwerkes oder seiner Teile sind mehrere Analyseschritte zu durchlaufen, die in einer Bewertung des betrachteten Objektes mündet.



Abbildung 1: Analyseschema zur Beurteilung der Kritikalität der Elemente der Infrastruktur

Der Ablauf der Analyse ist in Abbildung 1 als Schaubild visualisiert. Der erste Schritt innerhalb der Analyse beinhaltet die Identifikation einer maßgebenden und relevanten Bedrohung sowie die aus der Bedrohung resultierenden Risiken für die betrachteten Bauwerke. Wichtiger Bestandteil der daran anschließenden Risikoanalyse ist dabei die Prognose des zu erwartenden Schadensausmaßes am betrachteten Bauwerk oder seiner Teile infolge des definierten Bedrohungsszenarios. Durch diese ereignisbezogenen Schadensanalyse können dann für die Bauwerke bestehende Risiken im Sinne seines Tragfähigkeitsverlustes bzw. der Resttragfähigkeit bewertet und bei Bedarf entsprechende Schutzmaßnahmen entwickelt werden. Die Identifikation der Bedrohung und ihrer Risiken stellt bereits zu Beginn der Analyse ein komplexes Problem dar, zu dessen Lösung unter anderem die Datenbank Terror Event Database (TED) am Ernst-Mach- Institut entwickelt wurde. Die Datenbank ermöglicht durch ihre Sammlung international dokumentierter Vorfälle eine statistische Auswertung bezüglich des Bauwerktyps, des Ereignistypus und weiterer erfasster Parameter. Für Tunnelbauwerke ergibt sich aus der Analyse mittels der Datenbank die in Abbildung 2 (rechts) dargestellte Verteilung an Ereignissen die weltweit für Brücken und Tunnel erfasst werden konnten.

Anzahl von Terroranschlägen weltweit  
Terror Event Database (EMI)

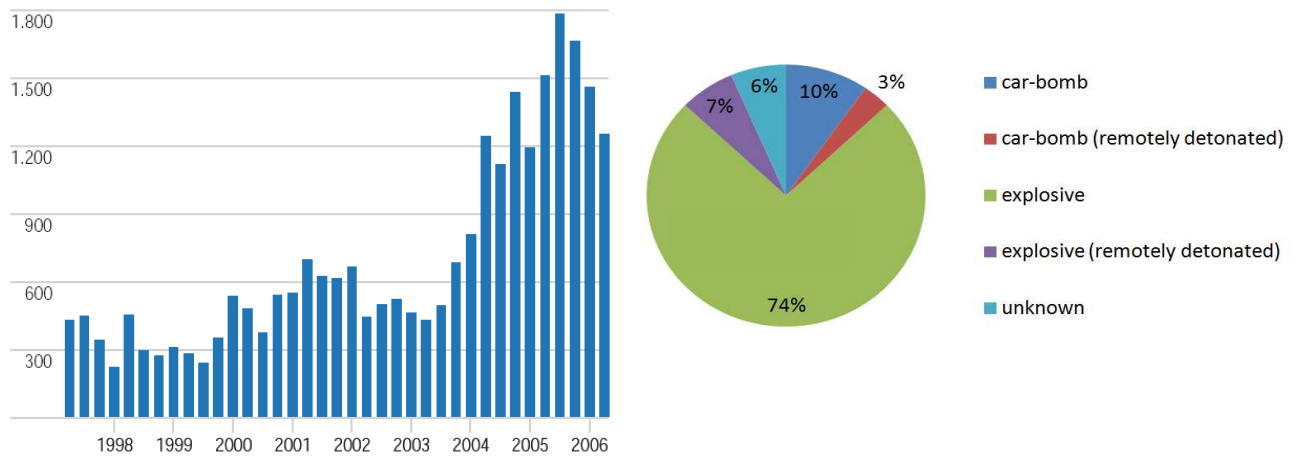


Abbildung 2: Auswertung der TED – Terror Event Database für Terroranschläge weltweit (links) und Art des Anschlags bei Anschlägen auf Brücken und Tunnel (rechts) (Gesamtzahl 31 Ereignisse)

Explosionen in Tunneln haben im Vergleich zu anderen statistisch abgesicherten Ereignissen (Wind-, Verkehrslasten) eine äußerst geringe Eintrittswahrscheinlichkeit, dem gleichzeitig ein enormes Schadenspotential für Bauwerk, Mensch und Umwelt gegenüber steht. Zudem ist das Szenario bei Explosionen mit kriminellem, terroristischen Hintergrund weiteren - mitunter subjektiven - Kriterien unterworfen, so dass die Ereigniswahrscheinlichkeit mit einer Plausibilitätsüberprüfung kombiniert werden muss und der Untersuchungsansatz somit als deterministisch einzustufen ist. Der folgende Beitrag stellt vor diesem Hintergrund ein Beurteilungsverfahren zur lokalen und globalen Standsicherheit von Tunnelkonstruktionen bei Explosionsereignissen vor. Die Untersuchungen konnten im Zuge der vom Bundesministerium für Bildung und Forschung geförderten Forschungsprojekte SKRIBT (Schutz kritischer Infrastrukturen, Brücken und Tunnel im Zuge von Straßen) und AISIS (Automatisierte Informationsgewinnung und Schutz kritischer Infrastrukturen im Katastrophenfall) von den Autoren durchgeführt werden.

## 2. DEFINITION UND BERECHNUNG VON EXPLOSIONSEREIGNISSEN

Die Größe der Beanspruchung von Bauwerkskomponenten bzw. Bauwerken durch Explosionsereignisse wird hauptsächlich bestimmt durch die Parameter der Ladungsmenge und der Distanz in der sie zum betrachteten Objekt stattfindet. Der aus der Detonation resultierende Spitzenüberdruck erreicht dabei für Kontaktdetonationen Werte von mehreren Gigapascal, die für wenige Millisekunden wirken, während für Ladungen mit größerem Abstand typischerweise Spitzenüberdruckwerte der Luftstoßwelle von mehreren Hundert Kilopascal erreicht werden, die über mehrere hundertstel Sekunden wirken. Eine erste ingenieurmäßige Einschätzung über die Art der aus der Detonation entstehenden Belastung kann mit Hilfe des sogenannten skalierten Abstands  $Z$ , abgeleitet aus den Ähnlichkeitsgesetzen nach Hopkinson – Cranz [Smi94], erfolgen.

Ein skaliertes Abstand von  $Z > 0,5$  führt bei Flächentragwerken aus Stahlbetonbauteilen, wie zum Beispiel Wänden und Platten, zu einer globalen Strukturantwort in Form einer Biegebeanspruchung des Bauteiles. Demgegenüber führen skalierte Abstände  $Z < 0,5$  zu einer vorwiegenden Scher- und Durchstanzbeanspruchung des Bauteiles. Selbstverständlich ist der exakte Grenzwert abhängig von den Festigkeitsparametern der belasteten Struktur.

Trotzdem ermöglicht die versierte Verwendung des skalierten Abstandes eine Klassifizierung der zu erwartenden dominanten Beanspruchungsmodi, wodurch die Wahl des Analysewerkzeuges zur detaillierten Untersuchung des Einflusses der Explosionseinwirkung auf die Bauteilintegrität vereinfacht wird.

Neben der Versuchstechnik, im Prototypen- oder Modellmaßstab, ermöglichen moderne Finite-Element-Methoden aus der Klasse der „Hydrocodes“ eine Analyse der Bauteil- und auch Bauwerksbeanspruchung bei denen die Erfassung der Wellenausbreitung im Bauteil von wesentlicher Bedeutung ist, unter der Voraussetzung, dass das kurzzeitdynamische Materialverhalten in adäquaten Materialmodellen beschrieben wird. Mit Hilfe dieser numerischen FEM-Simulationen lassen sich dann komplexe Geometrien, diskrete Bewehrungslagen und Verstärkungslagen aus Metallen, Polymeren, oder Stofffasern beschreiben und die Wirkung eines Explosionsereignisses auf sie analysieren.

Weiterhin stehen vereinfachte Ingenieurverfahren zur Verfügung, die eine schnelle Analyse standardisierter Geometrien und Belastungsszenarien ermöglichen. Die Ergebnisse für die oben genannten Standardgeometrien sind dabei anhand von Experimenten validiert worden [Geb04]. Zu unterscheiden ist dabei erneut zwischen Ingenieurverfahren für die lokale Beanspruchung des Bauteiles infolge Schub und Durchstanzen und zwischen der globalen Beanspruchung infolge Biegung des Bauteiles.

Beide Belastungsarten sind bei der Analyse der Sicherheit und Kritikalität von Tunneln zu berücksichtigen und werden im Folgenden erläutert.

### **Lokale Belastung**

Kontaktdetonationen oder Detonationen in sehr kleinem skaliertem Abstand führen zu einer sehr komplexen Deformationsphänomenologie. Eine nahezu diskontinuierliche Stoßfront mit Spitzenüberdrücken im Bereich mehreren GPa wird vom Sprengstoff in die Struktur eingeleitet. Wellenreflektionen an der lastabgewandten Seite führen zur Spallation des Bauteils, die durch rückseitige Abplatzungen und Auswurf von Trümmerteilen charakterisiert ist. Zudem entsteht auf der lastzugewandten Seite ein Krater aus teilweise oder vollständig zerstörtem Material. Überschneiden sich Kratertiefe an der Vorderseite und die Tiefe des Abplatzungsbereiches an der Rückseite, entsteht ein Durchbruch im Bauteil.

Diese komplexen Prozesse sind in mehrdimensionalen Strukturen in der Regel analytisch nicht mehr erfassbar. Ihre Auswirkungen können aber zutreffend durch empirische Ansätze für Beton, Stahlbeton und auch Stahlfaserbeton beschrieben werden [Geb04]. Die empirisch hergeleiteten Zusammenhänge sind in Ingenieurcodes implementiert Exemplarische Berechnungsergebnisse für relevante Wanddicken im Tunnelbau sind in Abbildung 3 dargestellt. Die Stahlbetonbauteile werden dabei durch die Detonation einer konstanten Sprengstoffmenge beansprucht. Die Prognosequalität dieser Ingenieurcodes für vereinfachte Bauteilkomponenten in Verbindung mit Belastungsszenarien, die innerhalb des Gültigkeitsbereiches der empirischen Zusammenhänge liegen, ist in Abbildung 4 dargestellt.

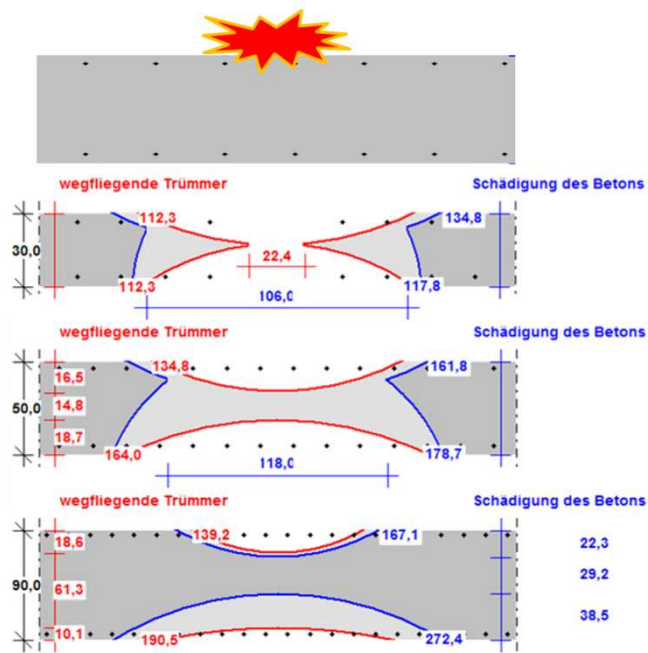


Abbildung 3: Lastfalldefinition und berechnete Schädigung für Tunnelwände und -decken

Es zeigt sich, dass eine gute Übereinstimmung zwischen den Ergebnissen des Experiments und der Berechnungen des Ingenieurverfahrens bezüglich der Größe des geschädigten Bereiches erreicht werden kann. Hinsichtlich des Schädigungsgrades liefert der Code eine geringfügige Unterschätzung der Schädigungstiefen. Die in der Abbildung ebenfalls dargestellte numerische Simulation mit einem Hydrocode liefert sowohl für die Berechnung der Größe des Schädigungsbereiches als auch dessen quantitativer Schädigung noch zutreffendere und detailliertere Ergebnisse.

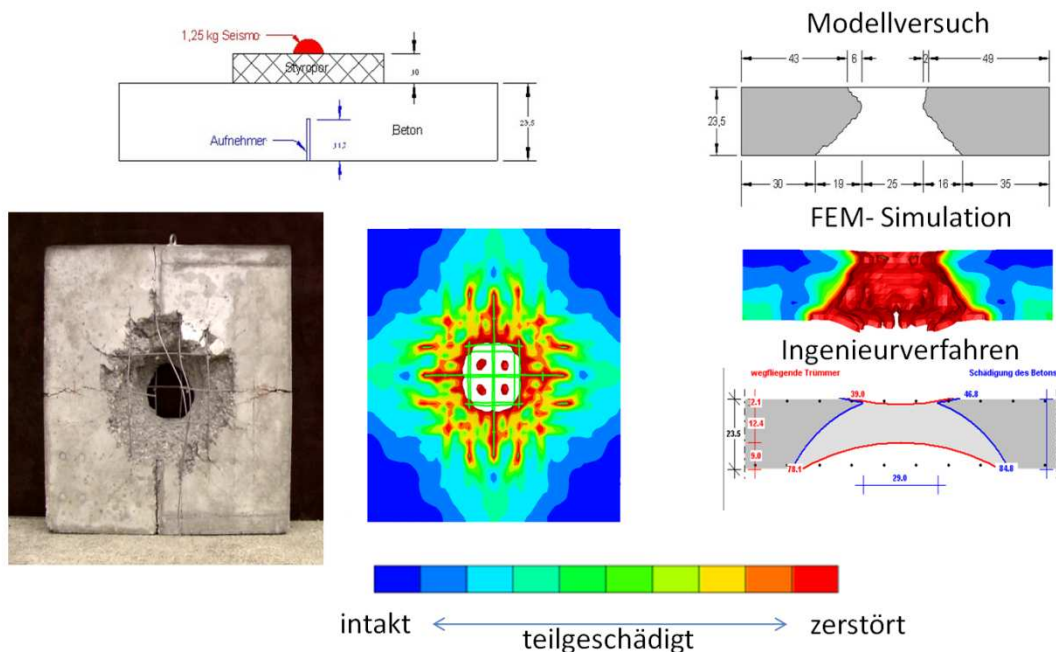


Abbildung 4: Vergleich der Ergebnisse einer Nahfelddetonation aus Modellversuch, numerischer Simulation und Ingenieurverfahren

## Globale Belastung

Die Charakteristik einer Druckwellenausbreitung in einem Tunnelinnenraum unterscheidet sich deutlich von einer Detonation im Freien. Die Wirkung der reflektierten Druckwelle auf das Strukturverhalten bei Detonationen im Innern nimmt stark zu. Es treten Mehrfach-Reflexionen auf, die den im Freifeld charakteristischen plötzlichen Abfall des Überdrucks reduziert und nicht zu einer nachfolgenden Sogphase führt. Im Grundsatz sind zwei Stadien zu unterscheiden: die zu Beginn auftretenden sehr hohen Spitzendrücke (mehrere bar) mit geringen Einwirkzeiten und der sich danach einstellende Gasdruck bzw. so genannte quasistatische Druck, mit im Vergleich zum Spitzenüberdruck geringer Druckamplitude, aber großer Wirkungsdauer (mehrere 100 ms) [May96, Bak83]. Abbildung 5 (kleines Diagramm) zeigt einen typischen Druck-Zeit-Verlauf einer Detonation in einem Tunnel.

Für eine Beurteilung der globalen Belastung und Ermittlung einer Tunnellänge, die bezogen auf die Tragfähigkeit überkritisch beansprucht wird eignet sich eine Abschätzung mit einem sogenannten Druck-Impuls Diagrammen mit Zerstörungskennlinie.

Ausgehend von einem idealisierten Masse-Feder System kann in solchen Diagrammen für eine beliebige Kombination von Spitzenüberdruck und Belastungsimpuls das Verhalten des Bauteils ermittelt werden. Mit der Angabe einer kritischen Auslenkung als Zerstörungskriterium erhält man eine Zerstörungskennlinie als Grenzwert der Bauteilzerstörung.

Zur Verwendung des Druck-Impuls-Diagrammes in Verbindung mit der bauteilspezifischen Zerstörungskennlinie, ist es erforderlich die auf die Struktur einwirkenden Spitzenüberdrücke und Impulse zu kennen.

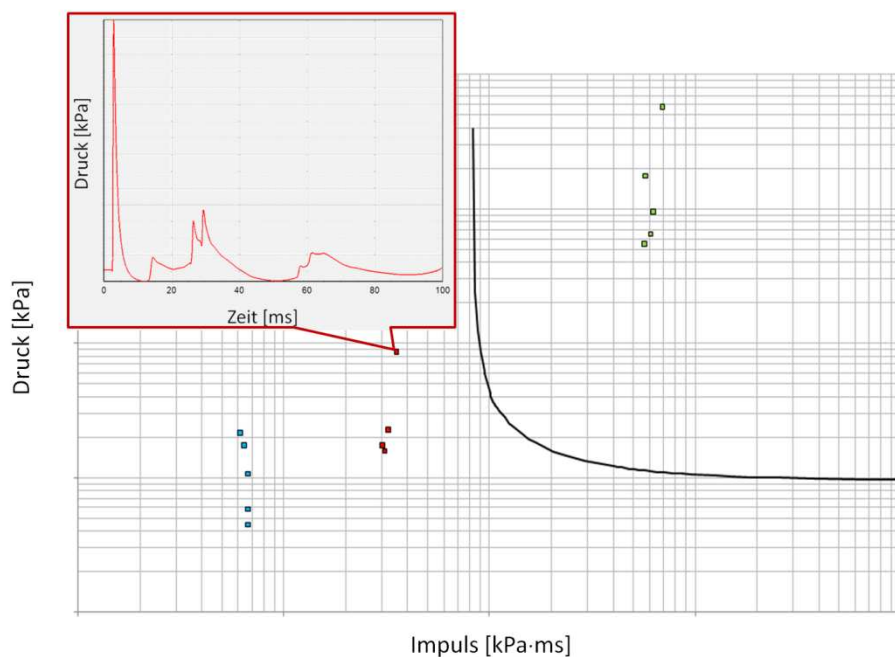


Abbildung 5: charakteristischer qualitativer Druck-Zeitverlauf infolge einer Detonation im Tunnelinnenraum (kleines Diagramm) und Druck-Impuls-Diagramm für eine Tunnelwand

Bei langgestreckten Volumina, wie z. B. Tunneln, gibt es eine Vielzahl von zeitlich verzögerten Drucküberlagerungen, die nach [Smi94] entsprechend Abbildung 5 verlaufen. Dadurch kommt es zu einer längeren quasi-statischen Belastung. Die Dauer dieser quasi-

statischen Belastung hängt von Verbindungs- und Belüftungsöffnungen zu anderen Räumen sowie der Geometrie des Raumes ab. Für einfache Rechteckgeometrien könne diese Werte mit Hilfe eines am EMI entwickelten Ingenieurtools (TUBLAC) berechnet werden.

Die Verbindung der berechneten Druck- und Impulswerte in Kombination mit den Zerstörungskennlinien führt zu einer Belastung auf das Tunnelbauwerk, wie in Abbildung 5 in Diagrammform aufgetragen. Liegt ein Druck-Impuls Tupel oberhalb der Zerstörungskennlinie, wurde das Bauteil zerstört, andernfalls liegt keine Bauteilzerstörung vor.

Für komplexere Geometrien und Belastungsszenarien kann sowohl die lokale als auch die globale Beanspruchung des Tunnels nur noch mit Hilfe von Modellversuchen und numerischen Simulationen mit der Finite-Element-Methode untersucht werden. Die zutreffende Berechnung der lokalen Schädigung einer Stahlbetonwand mittels numerischer Simulation ist in Abbildung 4 visualisiert. Der Gleichungslöser der Finite-Element-Methode basiert dabei auf einer sogenannten Hydrocode-Formulierung, die die gleichzeitige Lösung der Erhaltungsgleichungen von Masse, Impuls und Energie für ortsfeste (Euler-) und körperfeste (Lagrange-) Gitter und deren Interaktion vorsieht. Die numerische Simulation kann dabei zum einen verwendet werden, um die globale Beanspruchung durch die Berechnung von Druck und Impulswerte in einer komplexen Geometrie infolge einer lokalen Detonation erfassbar zu machen. Abbildung 6 zeigt ein mögliches Szenario bei dem direkt über der Zwischendecke eines in Schildbauweise erstellten Tunnels eine Sprengladung explodiert. Die Bilder zeigen die aus der Detonation entstehende Ausbreitung einer Druckwelle, welche im Tunnelquerschnitt propagiert. Dargestellt sind die Druckordinaten zu verschiedenen Zeitpunkten in der Luft die oberhalb von 0,2 bar Überdruck liegen. Mit Hilfe dieser berechneten Druck- und Impulsordinaten können dann wiederum Bereiche ermittelt und bewertet werden in denen infolge des lokalen Detonationsereignisses die Bauwerkskomponenten auf Biegung beansprucht werden.

Für den Fall, dass die globale Beanspruchung des Tunnels nicht aus einer einfachen Biegebeanspruchung von Wand- und Deckelementen resultiert, sondern aus anderen Belastungsmechanismen, kann die numerische Simulation letztendlich auch verwendet werden um die vollständig gekoppelte Strukturantwort des im Boden eingebetteten Tunnels auf eine im Tunnelinnraum detonierende Sprengladung zu simulieren, analysieren und bewerten.

Abbildung 7 zeigt die im vollständig gekoppelten System berechnete Verschiebung und Schädigung einer Tübbingtunnelschale. Neben der Schädigung der Betonstruktur ist die radiale Verschiebung der Tübbinge infolge der Beanspruchung ein weiteres Kriterium, welches bei der Bewertung der Kritikalität eines Explosionsereignisses berücksichtigt werden muss.

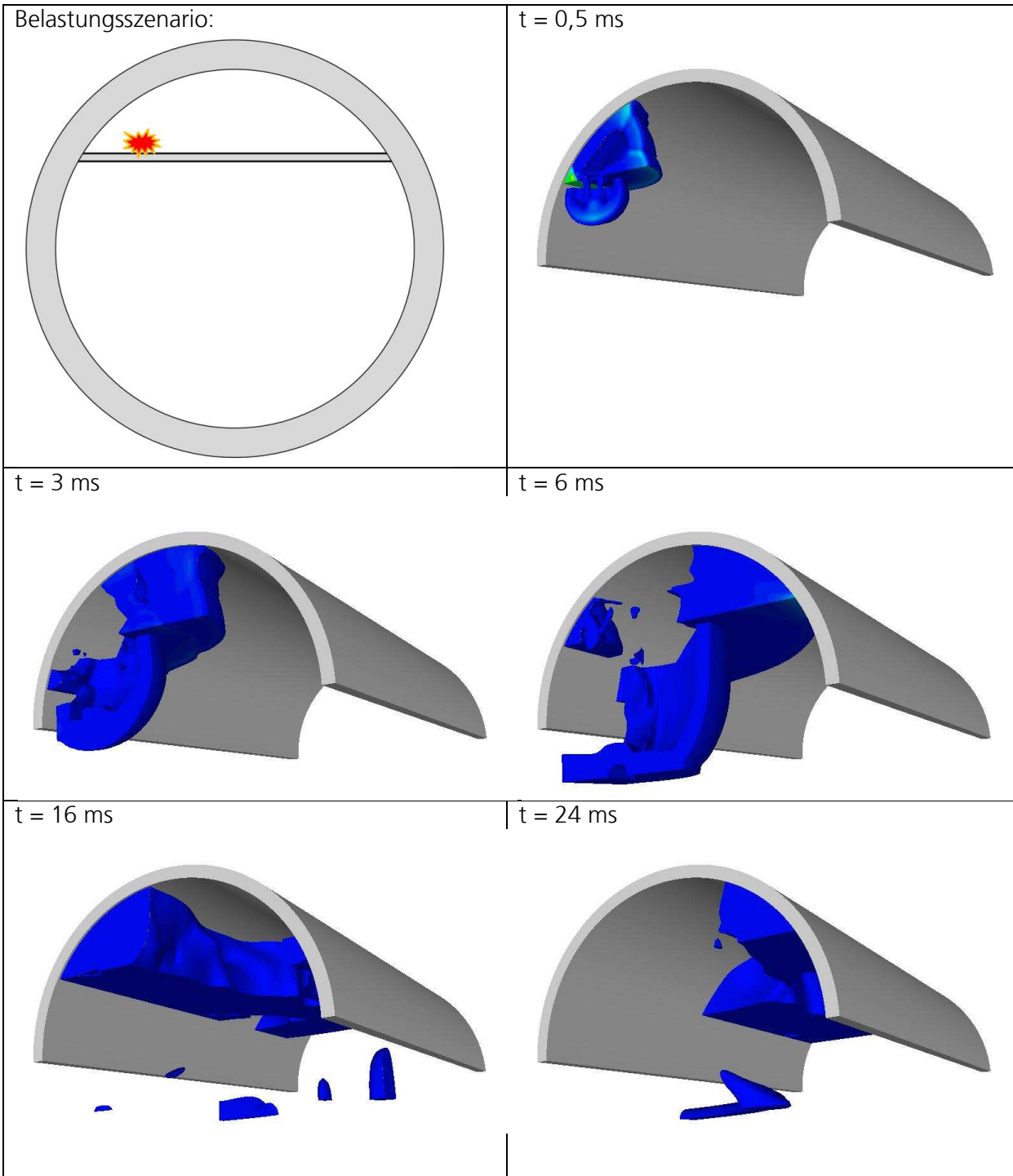


Abbildung 6: Druckwellenausbreitung infolge einer Detonation an der Zwischendecke des Tunnels

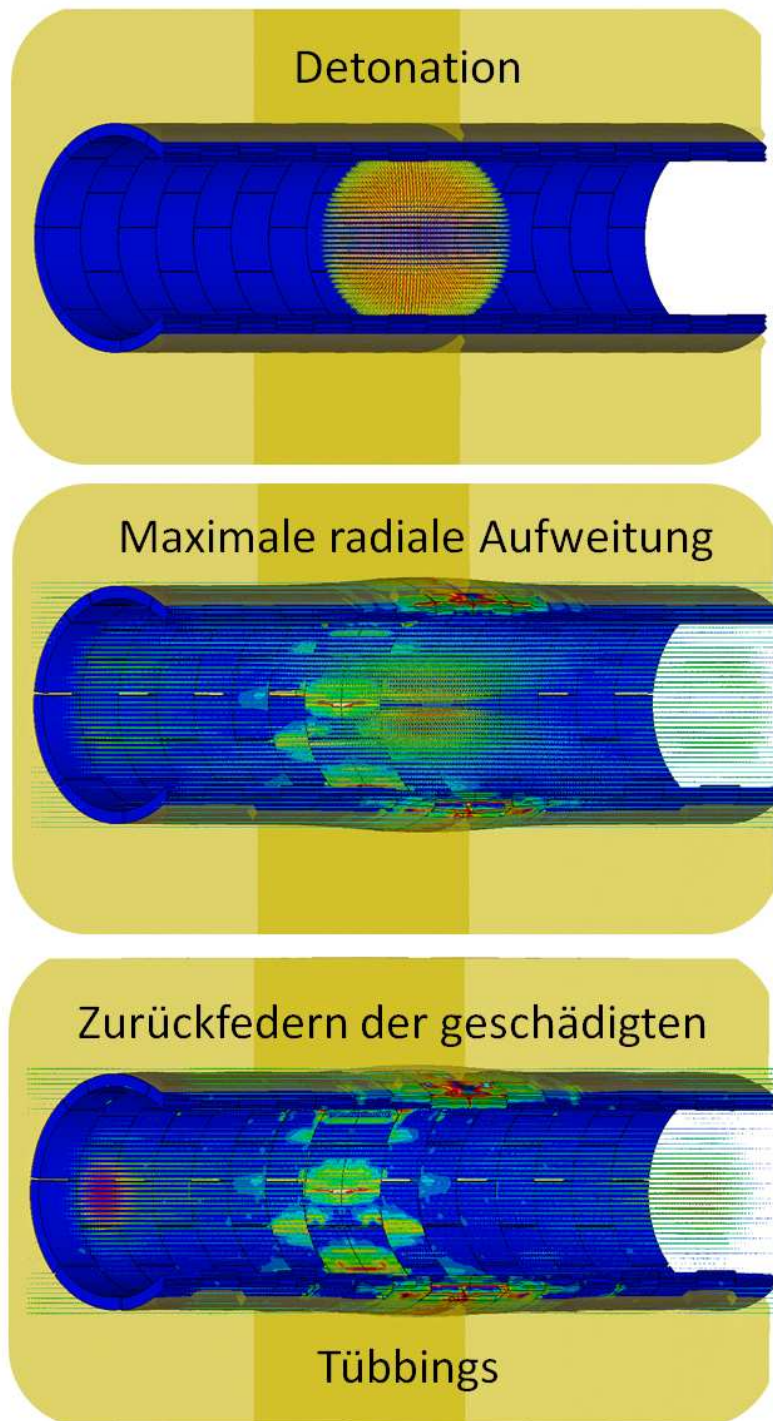


Abbildung 7: Simulation der Belastung eines Tübbingtunnels durch ein Explosionsereignis

### 3. BEWERTUNG VON SCHÄDIGUNG INFOLGE EXPLOSIONEN

Die in Kapitel 2 vorgestellten Berechnungsmethoden bilden die Grundlage für eine Bewertung der Tunnelschädigung. Der lokale Betonausbruch kann in Form von Fehlflächen bzw. verbleibenden Restquerschnitten in statischen Resttragfähigkeitsberechnungen des Gesamttunnelquerschnitts einfließen. Eine realitätsnahe Ermittlung der Resttragfähigkeit des Tunnelquerschnitts ist nur mit Hilfe des Ansatzes der physikalischen Nichtlinearität des Konstruktionsmaterials (Beton, Faserbeton, Bewehrung) und des Baugrunds sinnvoll möglich. Das Ergebnis dieser Resttragfähigkeitsberechnung kann zusammengefasst in Form eines verbleibenden globalen Sicherheitsbeiwertes  $\gamma$  (im Sinne des semi-probabilistischen Teilsicherheitskonzeptes der DIN 1055-100) angegeben werden. Die Größe des Sicherheitsbeiwertes dient gleichzeitig als Kriterium zur Bewertung des globalen Zerstörungsgrads bzw. Restsicherheitsniveaus des Tragwerks im Querschnitt. Im Rahmen des Forschungsvorhabens SKRIBT wird hierfür eine fünfstufige Einteilung in Anlehnung an vergleichbare Einstufungsverfahren etwa nach DIN EN 1991-1-7 gewählt. Im Unterschied zur DIN EN 1991-1-7 können die Ereignisse allerdings, wie eingangs in Kapitel 1 erläutert, nur bedingt mit Eintrittswahrscheinlichkeiten behaftet werden. Neben der reinen Standsicherheitsbewertung dient die Beurteilung des Zerstörungsgrads des Bauwerks dazu, sekundäre Effekte in Hinblick auf den Nutzer und den Betreiber abzuleiten. So führt zum Beispiel eine lokale Zerstörung eines Absenktunnels (Loch in Tunnelaußenwand oder Fugenbereich) zwar unter Umständen nicht unmittelbar zum Versagen des gesamten Tunnelquerschnittes, gefährdet aber die Nutzer und Rettungskräfte durch den unmittelbaren schnellen Wassereintritt.

Zur Berücksichtigung von gleichzeitig zur lokalen Zerstörung auftretenden globalen Belastungen (siehe Kapitel 2) müssen die instationären Last-Zeit-Funktionen der Druckwelle entweder direkt in einer strukturdynamischen Tragwerksberechnung auf Bauwerksebene unter Berücksichtigung der Massenträgheitseffekte und Dämpfungsfaktoren ermittelt werden, oder in Form eines stationären Ersatzdruckes in einer statischen Berechnung auf den Tunnelquerschnitt angesetzt werden. Der stationäre Ersatzdruck kann abhängig von der Eigenfrequenz des Tunnelquerschnitts, der jeweiligen Einwirkungsdauer der (positiven) Impulsphase und dem Verhältnis der plastischen zur elastischen Verformbarkeit des Tragwerks bestimmt werden. Diese Vorgehensweise ermöglicht die „ingenieurmäßige“ Erfassung des Gesamttragverhaltens eines Tunnelquerschnitts unter Berücksichtigung der wesentlichen Merkmale der Einwirkung und der Randbedingungen. Zusammen mit der Berücksichtigung der lokalen Schädigung kann somit eine realitätsnahe Einschätzung der Resttragfähigkeit erfolgen.

### 4. MASSNAHMEN ZUR VERBESSERUNG DER TUNNELSICHERHEIT

Die Untersuchungen von Tunnelbauwerken unter dem Einfluss von außergewöhnlichen Beanspruchungen, wie Explosionen, führt zu der Notwendigkeit Konzepte zu entwickeln, die eine Vermeidung von Zerstörungen und Schäden ermöglichen. Hierbei treten für verschiedene Szenarien mitunter Zielkonflikte auf, wie Tabelle 1 exemplarisch für die Szenarien von außergewöhnlichen Explosions- und Brandereignissen zeigt.

Mikro- und faserbewehrte Hochleistungsbetone erhöhen als Konstruktionsbaustoffe im Neubau, oder als nachträglich aufgebrachte Schutzschicht die Energiedissipationsfähigkeit eines Tragwerks insgesamt, wie experimentelle Studien an Stützen und Wänden bereits gezeigt haben [Sta86, May09]. Die Auswirkung der Schädigung infolge von Explosionsereignissen kann auch bei Tunnelbauwerken potentiell durch diese Maßnahmen verringert werden. Die Brandwiderstandsdauer dieser Betone ist allerdings deutlich reduziert

und kann nur durch Zusatzmaßnahmen, wie etwa die Zugabe von Polypropylenfasern kompensiert werden [Bo07]. Zur Sicherstellung der Eignung mit dieser Zusatzmaßnahme besteht derzeit weiterer Forschungsbedarf etwa hinsichtlich der Brandwiderstandsfähigkeit dieser Hochleistungswerkstoffe unter realitätsnahen Belastungsrandbedingungen.

Tabelle 1 Maßnahmen zur Verbesserung der Tunnelsicherheit. Wirkung bei Explosions- und Brandereignissen

Beschreibung	Eignung Explosion	Eignung Brand
Mikrobewehrter Hochleistungsbeton	+	Forschungsbedarf
Faserbewehrter Hochleistungsbeton	+	Forschungsbedarf
Verkleidung aus mikrobewehrtem Hochleistungsbeton	+	Forschungsbedarf
Brandschutzbeton	o	+
Polymerbeton mit Naturfasern	+	+
Dimensionierung gegen Explosionsbeanspruchung	+	o
Zweischalige Bauweise	+	+
Globale Redundanz	+	+

o – Neutral, + - gut, - schlecht

Klassische Konzepte der Dimensionierung des Tragwerks gegen Explosionseinwirkungen sowie der Ausführung in einer zweischaligen Bauweise sind wirkungsvoll, aber bedingen z.T. erhebliche Mehrmassen. Ein weiteres Konzept zur Erhöhung der Explosionssicherheit ist die Dämpfung der Stoßwellen, die bei einer Explosion auftreten, durch moderat druckfeste hochkompressible Dämpferschichten (Polymerbeton mit Naturfasern).

Die mehrzellige und mehrröhrige Ausführung mit regelmäßig angeordneten Querschlägen führt schließlich auch für außergewöhnliche Ereignisse zu einer signifikant erhöhten Sicherheit (globale Redundanz) für die Nutzer, Rettungskräfte und das Tunnelbauwerk insgesamt im übergeordneten Straßennetz.

Eine übergreifende Maßnahmenwirksamkeitsanalyse wird im Rahmen des weiteren Projektfortschrittes eine fundierte Grundlage zur Beurteilung der aufgeführten Schutzmaßnahmen liefern.

## 5. ZUSAMMENFASSUNG

Die zuvor beschriebenen durchgeführten Untersuchungen bilden die Grundlage für ein deterministisches Beurteilungsverfahren zur lokalen und globalen Standsicherheitsbeurteilung von Tunnelkonstruktionen bei Explosionsereignissen und ermöglichen eine Bewertung von Maßnahmen zur Verbesserung der Tunnelsicherheit. Die vorgestellten Untersuchungsverfahren bieten die Möglichkeit einer experimentell validierten, realitätsnahen Auslegung von Tunnelstrukturen, Schutzmaßnahmen mit klassischen und High-Tech-Werkstoffen und die Bewertung der Resttragfähigkeit bestehender Bauwerke.

## 6. QUELLENVERZEICHNIS

- [Bo07] R. Bornemann, M. Schmidt, C. Vellmer, Brandverhalten ultra-hochfester Betone, in UHPC-10-Years of research and development, Schriftenreihe Baustoffe und Massivbau, Heft 7, 2007, 418-422
- [Sta86] F. Stangenberg, Stahlfaserbeton als hervorragender Baustoff für Stoßbeanspruchte Bauteil, Bauingenieur 61, 1986, 339-345
- [Smi94] P. D. Smith and J. G. Hetherington, Blast and Ballistic Loading of Structures. 1994, Oxford: Butterworth Heinemann.

- [Geb04] N. Gebekken, S. Greulich, and F. Landmann, The Engineering-Tool XploSim to determine the effects of explosive loading reinforced and fibre reinforced concrete structures, in 18th Symposium of Military Aspects of Blast and Shock, U.o.t.G.A. Forces, Editor. 2004: Bad Reichenhall, Germany.
- [May96] C. Mayrhofer, Druckausbreitung von Räumen - Dipole East; E 05/96, Fraunhofer Institut für Kurzzeitdynamik, Ernst-Mach-Institut, Efringen-Kirchen, 1996.
- [May09] C. Mayrhofer, Untersuchung an Betonstützen und deren Verstärkungsmöglichkeiten bei Explosionseinwirkungen, EMI A-Bericht Nr. 29/09
- [Bak83] W.E. Baker, and P.A. Cox, Explosion hazards and evaluation, Amsterdam [u. a.]: Elsevier Scientific Publishing Company, 1983.