

---

**Stahlbetonbauteile unter kombinierten  
statischen und detonativen  
Belastungen in Experiment, Simulation  
und Bemessung**

**Reinforced-Concrete Members under  
Combined Static and Detonative  
Loading Conditions in Experiment,  
Simulation and Design**

Andreas Bach

---

## Zusammenfassung

Detonationen können zu einer starken Belastung von Bauteilen führen, wodurch diese mitunter bis zum Verlust ihrer Tragfähigkeit beansprucht werden. Die mögliche Folge dieses Bauteilversagens ist ein Einsturz des Tragwerks in Teilbereichen oder in Gänze. Zum Schutz von Personen und Sachgütern sind daher Lösungen zu entwickeln, welche eine sichere Auslegung von Tragwerken gegenüber Detonationsbelastungen ermöglichen. Als Werkstoff hierzu ist Stahlbeton geeignet, da dieser Widerstandsfähigkeit, Duktilität und eine hohe Masse mit im Bezug zu Baustahl vergleichsweise geringen Kosten vereint.

Für Detonationsbelastungen an Stahlbetonbauteilen sind zwar unterschiedliche Untersuchungen bekannt und für den Fernbereich zusätzlich Bemessungsansätze verfügbar. Jedoch sind diese auf reale Bauteile nur eingeschränkt übertragbar, da diese eine statische Belastung vernachlässigen. Obwohl ein jedes Bauteil stets mindestens durch sein Eigengewicht und in der Regel noch durch weitere Lasten beansprucht wird. Weitergehend kommen bei der Bemessung keine oder lediglich pauschale Sicherheitsbeiwerte zum Einsatz, für welche die erreichte Zuverlässigkeit nicht bekannt ist. Dies steht im Widerspruch zu einer Bemessung gegenüber Regelbelastungen, bei der ein definiertes Zuverlässigkeitsniveau durch die Anwendung des EUROCODE 0 erreicht wird.

Vor diesem Hintergrund wurde in der Arbeit das Verhalten von Stahlbetonbauteilen unter kombinierten statischen und detonativen Belastungen durch numerische und experimentelle Untersuchungen studiert. Hierzu wurden Versuchsstände und Simulationswerkzeuge entwickelt, welche erstmalig sowohl für Stahlbetonplatten im Fernbereich als auch Stahlbetonstützen im Nahbereich eine Kombination aus statischer und detonativer Belastung berücksichtigen.

Für den Nahbereich zeigen die experimentellen Ergebnisse eine erwartungsgemäße starke Reduktion der Tragfähigkeit als Folge der lokalen Schädigung um bis zu 80% auf. Zur numerischen Abbildung der Versuche waren wesentliche Anpassungen am verwendeten Betonmodell (RHT-Modell) erforderlich. Diese umfassten eine Beschreibung des

---

Rissverhaltens auf Basis der Bruchenergie sowie eine verbesserte Beschreibung der mehraxialen Festigkeit. Mittels des angepassten RHT-Modells konnten die Versuchsergebnisse nachvollzogen werden. Sowohl Resttragfähigkeit als auch Schädigung werden in guter Näherung zum Versuch abgebildet. Hierdurch wird aufgezeigt, dass die sonst lediglich für dynamische Belastungen herangezogenen Simulationswerkzeuge des Typs Hydrocode auch für statische Problemstellungen verwendet werden können. Neben Aussagen zur Schädigung können somit zukünftig ebenfalls Fragestellungen der Resttragfähigkeit beantwortet werden.

Die experimentellen Untersuchungen im Fernbereich an Stahlbetonplatten und kombinierter lateraler sowie axialer Belastung zeigen einen deutlichen Einfluss der statischen Belastung auf das dynamische Bauteilverhalten auf. Duktilität und Widerstand werden durch die zusätzliche Belastung beeinflusst. Eine realistische Bewertung des Bauteilverhaltens ist somit nur unter Berücksichtigung der statischen Belastung möglich. Die experimentellen Ergebnisse konnten durch ein neu entwickeltes Simulationsmodell, welches die Festigkeitssteigerung der Werkstoffe und die statische Belastung als Ausgangszustand berücksichtigt, bestätigt werden.

Für die Beantwortung der bestehenden Fragen zur Zuverlässigkeit wurden im Fernbereich Zuverlässigkeitsanalysen durchgeführt. Die durchgeführten Analysen bestehender Sicherheitskonzepte des UFC-3-340-02 sowie gängiger Auslegungsprinzipien in der Praxis belegen eine im Vergleich zu den Anforderungen des EUROCODE 0 unzureichende Zuverlässigkeit. Bei der Bemessung von Stahlbetonbauteilen gegenüber Detonationsbelastungen im Fernbereich wird daher die Verwendung der außergewöhnlichen Bemessungssituation in Verbindung mit einem zusätzlichen Sicherheitsbeiwert  $\gamma_E$  auf der Einwirkungsseite von 1,2 empfohlen.

Die dargestellten Beispiele zur Bemessung einer Stahlbetonplatte im Fernbereich und Stahlbetonstütze im Nahbereich unter kombinierter statischer und detonativer Belastung Bemessung repräsentieren den aktuellen Stand der Auslegung auf Basis der in der Arbeit gewonnenen Erkenntnisse. Sie sollen sowohl der Praxis als auch für zukünftige Untersuchungen als Beispiel dienen und eine kohärente Betrachtung von statischen und detonativen Belastungen ermöglichen.

---

## Abstract

Detonation can cause strong loads to structural members. These loads may reach such high intensities that the structural member reaches its structural capacity. As a consequence, hereto partial or overall collapse of the structure may be observed. Therefore approaches have to be developed which enable a reliable structural design for detonative loads of the building. Herewith people and goods can be protected. A suitable material choice for this purpose is reinforced-concrete, as it combines resistance, ductility and a high mass with, compared to steel, rather low costs.

For the behavior of reinforced-concrete members under detonative loads, different research results are known and for the far range design approaches given. These may, however, not fully be adopted for reinforced concrete members. In fact static loads are consistently neglected for these approaches. Structural members are constantly loaded by their own deadweight and commonly stressed by other static loads as well.

Furthermore the design approaches do not consider any or only a lump safety factor. Therefore the established reliability is unknown. This represents a discrepancy to design for regular loads, where a defined reliability level is reached by the application of the EUROROCDE 0.

In the presence of these coherences within this thesis, the behavior of reinforced concrete members under combined static and detonative loads has been experimentally and numerically investigated. Hereto experimental test setups have been developed, which enable one to investigate the behavior of static loads in combination with detonative loads for reinforced concrete plates in the far range regime and for reinforced concrete columns in the close-in range regime for the first time.

For the experiments in the close-in range, a high reduction of up to 80% of the structural resistance could be observed as a consequence of the local damage of the column. For the numerical simulation of the experiments, essential adjustments have been applied to the used concrete material model (RHT). These adjustments included a description of the tensile behavior based on the fracture energy and an improved depiction of the multi axial material strength. Using the adjusted RHT-

---

model, the experimental results could be simulated accordingly. Damage as well as structural resistance was predicted in good approximation. Herewith it could be shown, that the usually solely for dynamic loads applied Hydrocode simulation technique can be applied to static issues as well. Therefore, in addition to the prediction of structural damage questions regarding structural resistance and remaining capacity can be answered prospectively.

The experimental results in the far-range regime on reinforced-concrete plates under combined axial and lateral loads showed a significant influence of the static load on the dynamic behavior of the structural member. Ductility and resistance are significantly influenced by the acting static forces. A realistic evaluation of the structural behavior is therefore only possible if static loads are considered in addition to the dynamic loads. The experimental results could be reproduced with a newly developed simulation model, which considers static loading conditions and also the increase of material resistance due to strain rate effects.

For the mentioned issues regarding reliability, reliability analyses have been performed in the far range regime. These analyses investigated the reliability of the given safety concept by the UFC-3-340-02 together with commonly applied design approaches. It could be shown that the established structural reliability of these approaches compared with the requirements of the EUROCODE 0 is insufficient.

Therefore it is proposed, that structural members in the far range regime are designed in the accidental load combination together with an additional safety factor  $\gamma_E = 1,2$  for the detonative load.

Based on the results of this thesis, concluding examples for the design of a reinforced concrete plate in the far range and a reinforced concrete column in the close-in range under combined static and detonative loads are given. These should serve as a guidance for prospective studies and the design of structural members. Herewith, a coherent consideration of both static and detonative loads is enabled.