

**APPROXIMATE CALCULATION OF THE IMPACT OF MISSILES
ONTO REINFORCED CONCRETE STRUCTURES AND
COMPARISON OF TEST RESULTS**

**(Näherungsweise Berechnung des Aufpralls von Projektilen auf
Stahlbetonbauteile und Vergleich mit Versuchsergebnissen)**

W. JONAS, R. MESCHKAT, H. RIECH, E. RÜDIGER

*Hochtief AG, Zentrale Abt. Kerntechnischer Ingenieurbau,
Bockenheimer Landstrasse 24, D-6000 Frankfurt 1, Germany*

Summary:

When dimensioning structural parts of nuclear plants, loads deriving from impacting projectiles frequently must be taken into consideration. The projectiles may originate from internal failures as well as from external events. The calculation of the impact procedure and the pertinent impact forces is only possible if the behaviour of the impacting projectile as well as that of the structural parts is considered. For simplification reasons normally assessments specially characterizing the individual problem are made, thus allowing the problem to be treated numerically. The mathematical consequences and results of such model studies are compared with test results. In particular, calculation models and numerical results concerning the Research Programme at Meppen are compared with presently available test results.

Die Bauteile von Bauwerken kerntechnischer Anlagen müssen häufig nicht nur für Gebrauchslastfälle dimensioniert werden, sondern auch für die Aufnahme von aufprallenden Projektilen. Die Projektile können sowohl aus inneren Störfällen als auch aus äußeren Einwirkungen herrühren. Zum Beispiel ist für kerntechnische Anlagen mit dem Standort in der Bundesrepublik Deutschland die Berücksichtigung des Lastfalles Flugzeugabsturz vorgeschrieben. Daher müssen Berechnungsmethoden entwickelt werden und experimentell abgesichert werden, die den Aufprallvorgang für die infrage kommenden Projektiltypen beschreiben, wobei im Regelfall auch das Bauteilverhalten zu berücksichtigen ist.

Einfache Berechnungsmethoden benutzen nur die globalen Erhaltungssätze, wie z. B. Sätze über die Energie- und Impulserhaltung. Diese Methoden führen im allgemeinen zu einem erheblichen Baustoffaufwand und vermitteln möglicherweise falsche Vorstellungen über den Ablauf des Aufpralls und die Aufnahme der zugehörigen Stoßkräfte.

Andererseits ist der Aufprall kompakter, nahezu starrer Projektile auf Stahlbetonbauteile z. Z. mit den Hilfsmitteln der Kontinuumsmechanik wohl kaum zutreffend zu beschreiben, weil der Kenntnisstand über das anzusetzende Materialverhalten unzureichend ist. Daher sind empirisch aufgestellte Formeln, die eine Beziehung zwischen den Kenngrößen des Projektils und der erforderlichen Dicke des Stahlbetonbauteiles sowie der zugehörigen Bewehrungsmenge herstellen oder eine Voraussage über das zu erwartende Eindringmaß machen, wesentliche Hilfsmittel für die Dimensionierung der Bauteile. Mit Hilfe ergänzender Modellvorstellungen ist es möglich, aus diesen Formeln weitere Erkenntnisse über die lokale Bauteilfestigkeit (im Sinne einer lokalen Grenztragfähigkeit des Aufprallbereiches), die auftretenden Stoßkräfte sowie über die Stoßdauer abzuleiten.

Zur Beschreibung des Aufpralles deformierbarer Projektile, die einen wesentlichen Teil der kinetischen Anfangsenergie durch irreversible Verformungen in einer Knautschzone absorbieren, wird zur Idealisierung eine Unstetigkeitsfläche eingeführt, die den elastisch deformierten Teil des Projektils vom bereits geknautschten Teil trennt. Die Sprungbedingungen an dieser Unstetigkeitsfläche sowie die mechanischen Grundgleichungen an den restlichen Bestandteilen dieses Modells liefern die Gleichung zur Berechnung des Aufpralles deformierbarer Projektile. Dieses Modell wird mit dem Modell zur Erfassung des Bauteilverhaltens gekoppelt. Bei der mathematisch-mechanischen Beschreibung des Bauteils muß das lokale Verhalten der Aufprallzone unterschieden werden von dem

globalen Verhalten, das mit den Methoden zur Berechnung elastisch-plastischer Flächentragwerke erfaßt wird. Es werden einige der in Meppen erzielten Versuchsergebnisse mit Rechenergebnissen verglichen.

Im Rahmen des vom Bundesministerium für Forschung und Technologie (BMFT) geförderten Forschungsvorhabens RS 149/165 "Kinetische Grenztragfähigkeit" wurden 1977 auf dem Gelände der Erprobungsstelle 91 in Meppen 4 Versuche durchgeführt, in denen deformierbare Projektile auf quasi-starre Stahlbetonblöcke geschossen wurden.

Ziel der Versuche war die experimentelle Bestätigung von theoretisch ermittelten Last-Zeit-Verläufen, die den Aufprallvorgang eines deformierbaren Projektils charakterisieren.

Als wesentliche Meßdaten wurden die Aufprallgeschwindigkeit, der Beschleunigungs-Zeit-Verlauf im Projektilheck und der Kraft-Zeit-Verlauf in den Auflagerkraftmeßdosen registriert. Als weitere Vergleichsgrößen wurden die Restlänge des Projektils sowie die Größe der Knautschzone nach dem Aufprall festgestellt. Der Stoßkraft-Zeit-Verlauf war bei dieser Versuchseinrichtung direkt nicht meßbar.

Der Aufprallvorgang des deformierbaren Projektils wird mit Hilfe eines 1-dimensionalen Rechenmodells erfaßt, zu dessen Beschreibung über die Projektillänge die Massenbelegung und die Berstlast-Verteilung als Maß für Projektilfestigkeit benötigt werden. Während des Aufprallens bildet sich eine mit der Zeit veränderliche Knautschzone endlicher Größe, in der eine Vergrößerung der Massenbelegung stattfindet. Trotz des einfachen Aufbaues sind für die mathematische Formulierung dieses Projektil-Modells Annahmen erforderlich, die sich insbesondere auf die Größe der Berstlast und die Länge und Ausbreitung der Knautschzone beziehen.

Ziel der Vergleichsrechnung ist es, die im Berechnungsmodell enthaltenen Freiwerte so zu bestimmen, daß die rechnerische Untersuchung des Aufprallvorganges mit dem Versuchsergebnis möglichst gut übereinstimmt.

Zur Berücksichtigung des Systemverhaltens der Versuchseinrichtung wird das Projektil-Rechenmodell mit einem Schwingungsmodell gekoppelt, welches das Verhalten des quasi-starren Zielkörpers, der Kraftmeßdosen und des auf dem Baugrund elastisch gebetteten Widerlagers beschreibt.

Alternativ werden Vergleichsrechnungen durchgeführt, in denen das die Versuchseinrichtung beschreibende Schwingungsmodell mit Last-Zeit-Funktionen belastet wird, deren qualitativer Verlauf mit Hilfe des Projektil-Rechenmodells unter der Annahme eines Aufpralls auf eine starre Wand ermittelt wurde.

Weiterhin wurden 6,0 m x 6,0 m große Stahlbetonplatten mit Dicken von 0,70 und 0,90 m beschossen, wobei Projektilе der beschriebenen Art verwendet wurden. Die Aufprallgeschwindigkeiten betragen etwa 170 m/s bis 260 m/s. Nähere Einzelheiten zu den Plattenversuchen werden im Beitrag J 8/5 mitgeteilt. Bei diesen Plattenversuchen zeigte es sich, daß das Problem der Bauteilfestigkeit im unmittelbaren Aufprallbereich wegen der Gefahr des Durchstanzens vor dem Erreichen der Biege-Traglast mit besonderer Aufmerksamkeit sowohl experimentell als auch theoretisch untersucht werden muß. Auf theoretischem Wege allein ist dieses Problem in naher Zukunft wohl kaum zu lösen, weil die kontinuumsmechanische Beschreibung des Baustoffes Stahlbeton unter Berücksichtigung von Bruchbedingungen und dynamischen Einflüssen sehr schwierig ist.

Daher wird vorgeschlagen, die von französischen Ingenieuren entwickelte CEA-EDF-Formel [1] zur Beschreibung der lokalen Bauteilfestigkeit heranzuziehen.

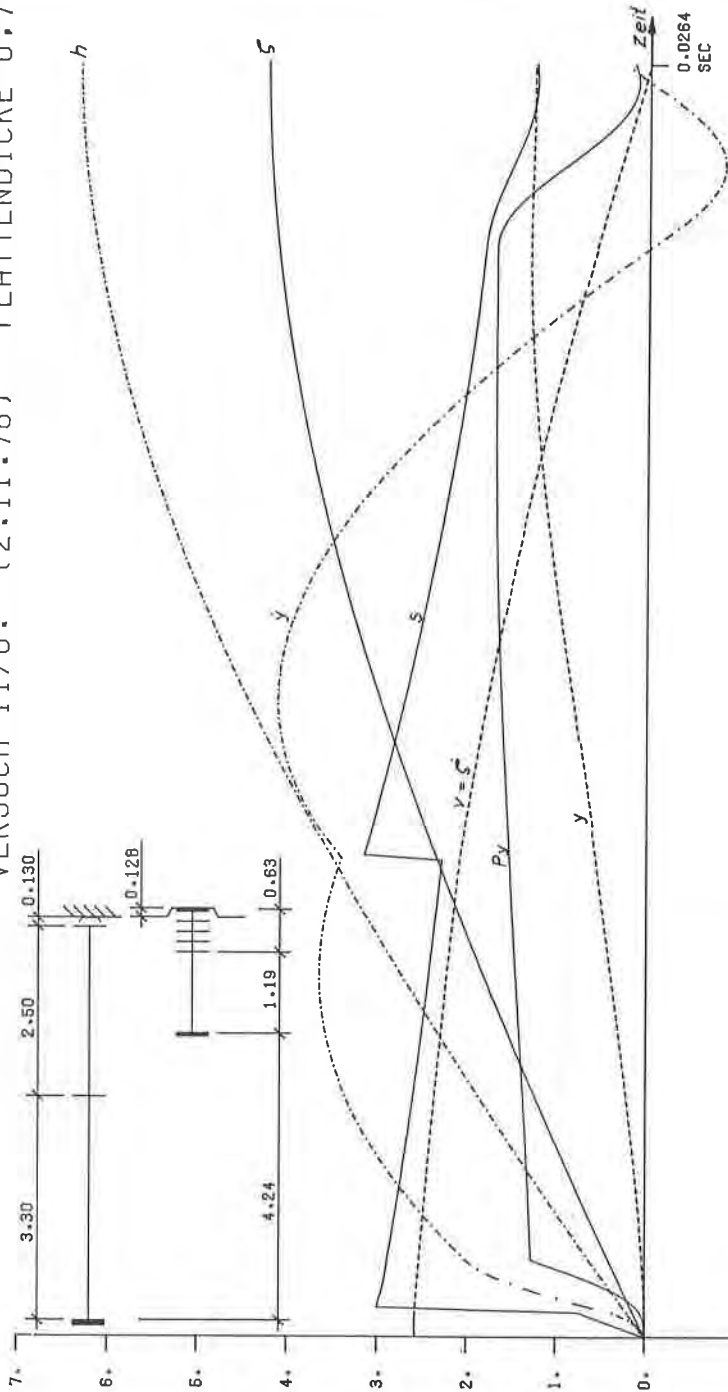
In den Abbildungen 1 und 2 sind Rechenergebnisse für den Aufprall des beschriebenen Projektils auf Stahlbetonplatten dargestellt. Die dargestellten Ergebnisse werden anhand eines Modells ermittelt, bei dem das deformierbare Projektil mit einem nichtlinearen Ein-Massenschwinger zur alleinigen Berücksichtigung des lokalen Bauteilverhaltens gekoppelt wurde. Das Projektil wurde starr-plastisch angenommen.

In Abb. 3 sind die mit Hilfe von Finite-Elemente-Programmen berechneten Verschiebungs-Zeit-Verläufe auf der Plattenrückseite dem Meßwertverlauf gegenübergestellt. Kurve (1) zeigt den Meßwert; Kurve (2) wurde berechnet unter Vernachlässigung des Einflusses der Mittelflächendehnungen mit Hilfe von nichtlinearen Momenten-Krümmungs-Beziehungen; Kurve (3) wurde mit Berücksichtigung der Mittelflächendehnungen und einer Betonzugfestigkeit von $0,35 \text{ KN/cm}^2$ berechnet.

Literatur:

- [1] Berriaud, C., Sokolovsky, A., Gueraud, R., Dulac, J. and Labrot, R., "Local Behaviour of Reinforced Concrete Walls under Missile Impact" SMIRT 4, Paper J 7/9, San Francisco 1977

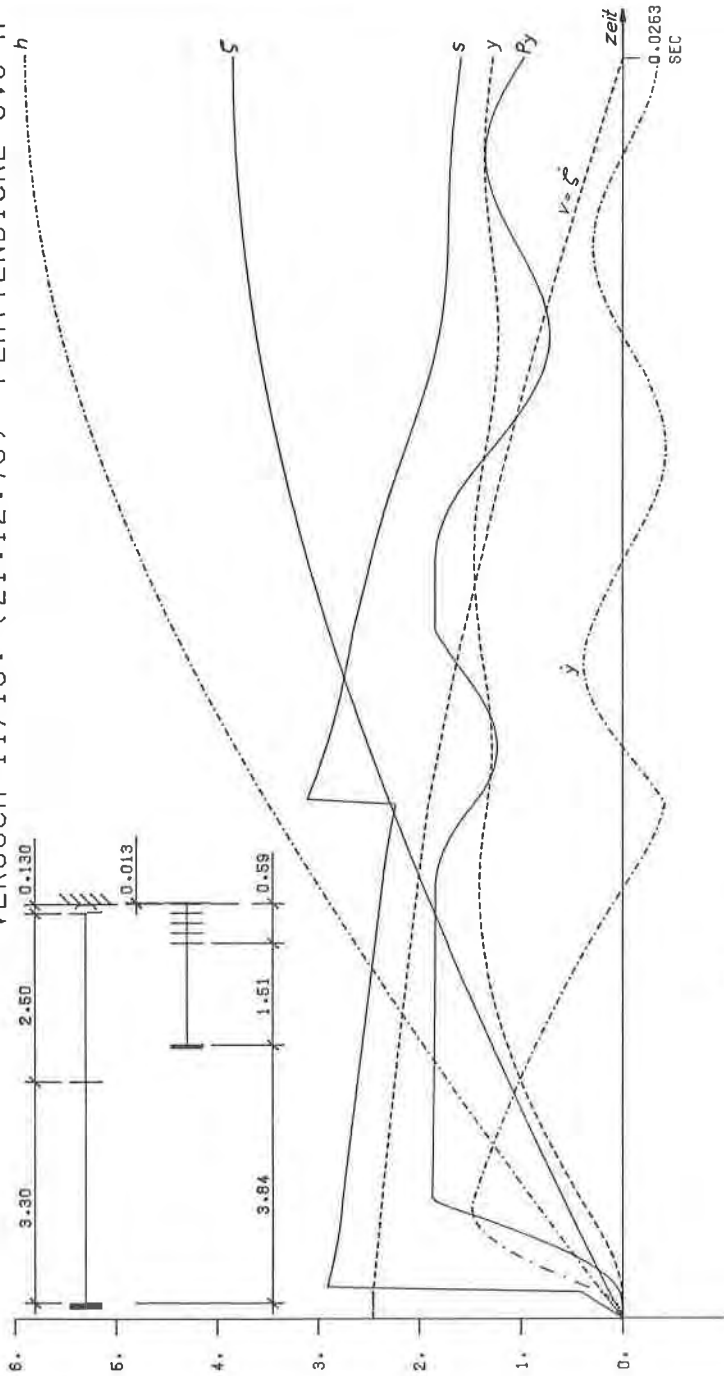
VERSUCH II/6. (2.11.78) PLATTENDICKE 0,7M



KURVENWERT		VERSCHIEBUNG DES HECKS		ZETA (M)		NB1 = -4120. KN	
1	1.000000	1	1.000000	V	(M/S)	2	-6680. KN
2	100.000000	2	100.000000	H	(M)	BETA	6.5
3	10000.000000	3	10000.000000	S	(KN)	PUL	8500. KN
4	100000.000000	4	100000.000000	Y	(M)	DELP	6600. KN
5	1000000.000000	5	1000000.000000	YP	(M/S)	VO	257.6 M/S
6	10000000.000000	6	10000000.000000	IN BAUTEIL	PY	(KN)	

Abb. 1

VERSUCH II/10. (21.12.78) PLATTENDICKE 0,9 M



KURVENWERT = 1.000000
 KURVENWERT = 100.000000
 KURVENWERT = 0.100000
 KURVENWERT = 10000.000000
 KURVENWERT = 0.010000
 KURVENWERT = 1.000000
 KURVENWERT = 100000.000000

VERSCHIEBUNG DES HECKS
 GESCHWINDIGKEIT DES PROJEKTILS
 LAENGE DES GEKNAUSCHTEN BEREICHS
 2.5 - FACHE STOOSKRAFT
 VERSCHIEBUNG DES BRUTEILS
 0.5-FACHE GESCHW. DES BRUTEILS
 1.5-FACHE RUECKVERANKERUNGSKRAFT IM BRUTEIL PY (KN)

ZETA (M)
 V (M/S)
 H (N)
 S (KN)
 Y (M)
 YP (M/S)

NB1 = -4440. KN
 NB2 = -6330. KN
 BETA = 7.5
 PUL = 12500. KN
 DELP = 1250. KN
 VD = 245.6 M/S

J 8/6

Abb. 2

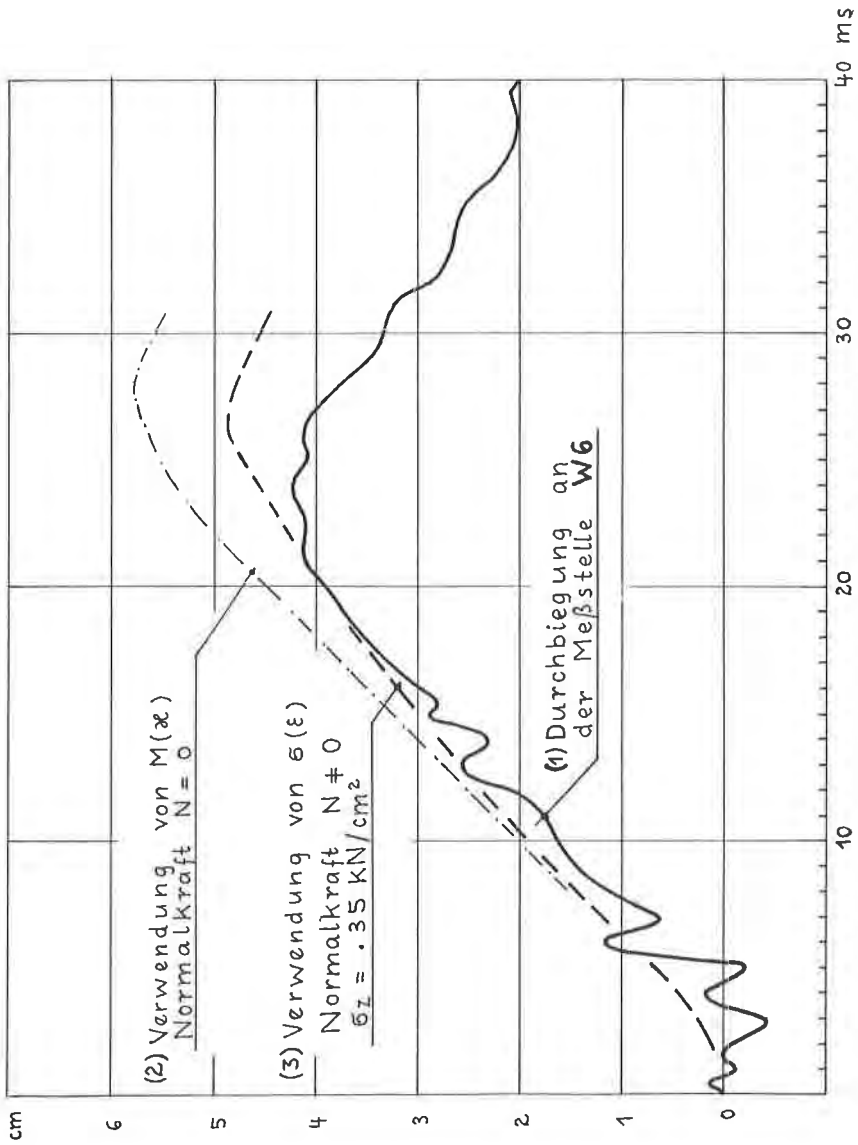


Abb.3 : Versuch II-4 : Vergleich der berechneten Verschiebungen mit dem zugehörigen Meßwert