



Gesellschaft für
Reaktorsicherheit (GRS) mbH

GRS-Bericht

Auswirkungen der mechanischen
Belastungen von Leistungs-
exkursionen auf den Reaktortank

Nachrechnung des zweiten
Schusses im 1/6-Modelltank des
SNR-300 mit SEURBNUK-2

S. Meier



Gesellschaft für Reaktorsicherheit (GRS) mbH

GRS-Bericht

**Auswirkungen der mechanischen
Belastungen von Leistungs-
exkursionen auf den Reaktortank**

**Nachrechnung des zweiten
Schusses im 1/6-Modelltank des
SNR-300 mit SEURBNUK-2**

Sigurd Meier

GRS-46 (Juni 1982)

Anmerkung:

Dieser Bericht ist von der GRS im Auftrag des Bundesministers des Innern erstellt worden. Er ist inhaltsgleich mit dem Auftragsbericht GRS-A-621 (Juli 1981). Die darin enthaltenen Arbeitsergebnisse müssen nicht mit der Auffassung des Auftraggebers übereinstimmen.

Keywords/Deskriptoren

Chemische Ladung - Fluid/Struktur-Wechselwirkung - Leistungsexkursion - Mechanische Belastung - Modelltank - Programm-Verifikation - Schnelle Reaktoren, SNR-300

KURZFASSUNG

Rechenprogramme, die die Fluid- und Strukturmechanik gekoppelt behandeln, werden seit ca. 10 Jahren entwickelt und besonders zur Lösung von Problemen der Reaktorsicherheit eingesetzt. Um diese Rechenprogramme zu verifizieren, werden Versuche in Modellen durchgeführt, die maßstabsgerecht die reale Reaktorgeometrie widerspiegeln. Dabei sollen sowohl die Fluidbewegungen als auch die Dehnungen in der Struktur von der gleichen Größenordnung sein, wie sie auch beim Störfall im Reaktortank erwartet werden. Der zweite Schuß im 1/6-Modelltank des SNR-300, durchgeführt im Joint Research Center (JRC), Ispra, erfüllt diese Bedingungen. Die Nachrechnung dieses Versuches mit SEURBNUK demonstriert die Anwendbarkeit des Programmes anhand der guten Ergebnisse bei allen wesentlichen Größen. Wegen der Unsicherheit des Ladungsverhaltens während des Experimentes ist dieser Versuch und dementsprechend auch die Nachrechnung nicht zur vollständigen Verifizierung des Programms ausreichend.

ABSTRACT

Coupled fluid dynamics/structural mechanics codes are developed since 10 years to solve problems in the field of reactor safety. Experimental programmes devised to validate these codes should include scaled models that closely resemble real reactor geometries. During tests with these models, fluid movements as well as the structural strains should be comparable to those arising in the reactor tank under accident conditions. The second shot in the 1/6 scaled model of the SNR-300 fits these conditions. The SEURBNUK post shot calculation demonstrates the capability of the code with adequate results for all salient physical values. But the experiment and consequently the calculation is for validation purposes only suited in a limited way because of the uncertainty of the charge behaviour during the shot.

INHALT

	<u>Seite</u>
1. Einleitung	1
2. Aufbau des 1/6-Versuches	2
2.1 Geometrie des Modelltanks	2
2.2 Die chemische Ladung	3
2.3 Instrumentierung des Modelltanks	3
2.4 Materialkennlinien	4
3. Rechenprogramm SEURBNUK-2, E4	4
3.1 Allgemeine Beschreibung	4
3.2 Letzte Weiterentwicklungen	5
4. Details der Rechnung	6
4.1 Einfluß der Zustandsgleichung der chemischen Ladung	6
4.2 Modellierung des 1/6-Versuches	7
5. Analyse der Rechenergebnisse	8
6. Zusammenfassung	10
Schrifttum	11
Abbildungen	13

1. EINLEITUNG

Für das Genehmigungsverfahren des Schnellen Brutreaktors SNR-300 müssen die mechanischen Belastungen auf das Tanksystem als Folge einer unterstellten Leistungsexkursion mit 370 MJ Energiefreisetzung untersucht werden. Dazu werden vom Hersteller (Interatom), aber auch von entsprechenden Stellen in allen anderen Ländern, in denen Brutreaktoren geplant werden, seit ca. 10 Jahren gekoppelte fluid- und strukturdynamische Rechenprogramme entwickelt und angewendet. Diese müssen vor ihrer Anwendung auf die reale Reaktorgeometrie verifiziert werden. Da das nicht am Reaktor selbst und aus Kostengründen auch nicht an Modellen im Maßstab 1:1 möglich ist, wird schrittweise auf einem anderen Weg vorgegangen. Dabei sind zunächst die einzelnen Teile: Fluid, Struktur und Koppelung jeweils für sich allein an Benchmark-Problemen oder auch an analytischen Lösungen zu testen, bevor die Nachrechnung von zunächst sehr einfachen Versuchen in Modellen im kleineren Maßstab erfolgen kann. Nach entsprechenden Programmverbesserungen und -erweiterungen werden komplizierter aufgebaute Versuche vor- und nachgerechnet, bis schließlich am Ende der Reihe ein Versuch steht, der alle wichtigen Tankeinbauten enthält. Durch eine chemische Ladung (Sprengstoff) werden Tankeinbauten und Außentank etwa ebenso stark verformt, wie es auch beim wirklichen Reaktortank zu erwarten ist.

Diesen Weg der Verifizierung hat das Rechenprogramm SEURBNUK durchlaufen. Als ein gewisser Abschluß sollte der 1/6-Modellversuch des SNR-300 dienen. Zwei Schüsse wurden in diesem Modelltank in der Gemeinsamen Forschungsstelle Ispra gezündet. Der erste, im Dezember 1976 durchgeführte, Versuch ergab nur maximale Umfangsdehnungen am Außentank von 0,4 %, die mindestens um den Faktor 10 unter den am SNR-Tank erwarteten Verformungen lagen. Daraufhin wurde im April 1979 ein zweiter Versuch in dem leicht vorverformten Tank mit einem neuen und dünneren Innentank gefahren, der bleibende Dehnungen von mehr als 3 % am Außentank hervorrufen sollte. Die erreichte Maximaldehnung von 2,3 % entsprach nicht ganz den Erwartungen; sie rechtfertigte andererseits nicht die erheblichen Kosten für einen neuen Versuch.

Dieser Bericht beschreibt die numerische Simulation des zweiten Schusses im 1/6-Modelltank mit dem gekoppelten Fluid-Strukturprogramm SEURBNUK-2 (Ca, al. 77); (St, Ye 79) und (Ke, al. 79). Der Code wurde gemeinsam von der Atomic Energy Establishment (AEE) Winfrith (UK) und dem EURATOM-Joint Research Center Ispra (Italien) entwickelt. Die Rechenergebnisse sind als Druck- und Dehnungszeitverläufe an repräsentativen Stellen des Reaktortankes dokumentiert und mit den entsprechenden experimentellen Kurven verglichen.

Eine ausführliche Beschreibung des Versuchsaufbaues folgt in Kapitel 2. Die Strukturen, die im Versuch während der Belastungsphase und bei der Lastabtragung eine wesentliche Rolle spielen, werden durch das Rechenmodell erfaßt. Es handelt sich dabei um den Außentank mit Halbkugelboden, den Innen- und Schildtank, der nach unten von der perforierten Gitterplatte begrenzt und über die perforierte Gitterplattenabstützung mit dem Halbkugelboden des Außentanks verbunden ist. Unter der Gitterplatte, innerhalb der Gitterplattenabstützung, ist das geschlossene Einlaufplenum

oder der untere Sammelbehälter (USB) befestigt. Nach oben hin stützt sich oberhalb des Schildtanks die vom Wasser bedeckte, perforierte Tauchplatte über die Tauchplattenabstützung gegen den in sich starren, aber flexibel aufgehängten Deckel ab. Diese Beweglichkeit wird durch die plastisch deformierbaren Deckelbolzen ermöglicht, die ihrerseits den Deckel mit dem sehr massiven und steifen Tanktragegerüst verbinden.

Kapitel 3 gibt eine kurze Übersicht über den SEURBNUK-2 Code mit Hinweisen auf spezielle Verbesserungen und Erweiterungen, die für diese Problemstellung notwendig waren und die Rechnung erst ermöglichten. Es handelt sich dabei um die Erweiterung auf deformierbare, perforierte Strukturen, eine allgemeine Formulierung von Strukturverbindungen und eine bessere Behandlung von Multifluidzellen im hydrodynamischen Teil.

Die durchgeführte Rechnung wird im Detail in Kapitel 4 dargelegt. In der rechnerisch erfaßten Problemzeit von ca. 6 ms sind die wesentlichen Belastungsvorgänge abgeschlossen oder haben fast überall die Maximalwerte erreicht.

Gitterbilder im zeitlichen Abstand von 1 ms zeigen die Entwicklung der Ladungsblase, des Geschwindigkeits- und Druckfeldes im Fluid und die Verformung der Strukturen.

Kapitel 5 enthält eine kritische Analyse der Rechenergebnisse und den Vergleich mit den experimentellen Daten. Die Ergebnisse mit den Schlußfolgerungen werden in Kapitel 6 zusammengefaßt.

2. AUFBAU DES 1/6-VERSUCHES

2.1 Geometrie des Modelltanks

Der Modelltank besteht aus einer 10 mm dicken, zylindrischen Wand mit kugelförmigem Boden. Der äußere Durchmesser des Tanks beträgt 1100 mm und die gesamte Höhe 2750 mm, inklusive Deckel, der den Behälter nach oben abschließt. Aus Ähnlichkeitsgründen befinden sich im oberen Bereich der zylindrischen Wand sechs Rohrstützen, welche die Ein- und Austrittsleitungen simulieren. Alle Einzelheiten des Versuchsaufbaues, der Meßinstrumentierung und der Materialdaten sind in dem übersichtlichen, vollständigen Versuchsbericht (JO 79) zusammengestellt. Er enthält weiter alle Angaben, die über das Meßprotokoll hinaus für eine Nachrechnung notwendig sind.

Der Tank wird über eine Flanschverbindung am Deckel mittels eines Auflagerings hängend in einer Stützkonstruktion arretiert. Diese besteht aus einem Verbund von sechs Doppel-T-Trägern. Konstruktive Details sind Bild 1 (S. 15) zu entnehmen.

Die Einbauten bestehen aus einem Schildtank, der Gitterplatte und Gitterplatten-Abstützung, dem unteren Sammelbehälter, der Tauchplatte und der chemischen Ladung.

Der Schildtank hat einen äußeren Durchmesser von 795 mm bei einer Dicke von 4 mm und einer Höhe von 1140 mm. Er ist mit der Gitterplatte und dem unteren Sammelbehälter verschraubt, die ihrerseits über die Gitterplattenabstützung am Halbkugelboden fixiert sind. Die Gitterplatte ist 70 mm dick und im inneren Bereich perforiert. Das Öffnungsverhältnis beträgt für diesen Bereich 5 %. Diese Bohrungen ermöglichen eine Strömung vom Core-Bereich in den unteren Sammelbehälter. Die Abstützung - an den Halbkugelboden angeschweißt - ist aus Montagegründen geteilt und über einen Flanschring mit der Gitterplatte verbunden. Daher kann das Fluid die Abstützung an der Stelle des Flansches durchströmen. Die bereits erwähnte Tauchplatte befindet sich über dem Schildtank, jedoch noch unterhalb des Wasserspiegels. Sie ist 40 mm dick und weist eine Perforation über der gesamten Fläche mit einem Öffnungsverhältnis von 21 % auf. Über einen zylindrischen Ring am äußeren Rand und einen zentralen Bolzen ist die Tauchplatte an der Unterseite des Deckels befestigt.

2.2 Die chemische Ladung

Die Energiefreisetzung wurde durch einen von Belgo Nucleaire entwickelten Sprengstoff bewirkt. Die Ladung hatte eine Masse von 8 kg und eine kugelförmige Geometrie. Sie war unterhalb der Mitte des Schildtanks im fiktiven Core-Mittelpunkt aufgehängt, wie aus Bild 1 zu ersehen ist.

Eine Druck-Volumen(p-V)-Beziehung für diese Ladung wurde in fünf Kalibrierversuchen ermittelt. Die Anzahl dieser Versuche zeigte die Reproduzierbarkeit des Ladungsverhaltens. Alle Ladungen besaßen die gleiche Zusammensetzung. Der Verlauf der p-V-Beziehung ist in Bild 3 (S. 17) dargestellt, gekennzeichnet mit "I". In dieser Abbildung ist ebenfalls die aus den Kalibrierversuchen für den 1. Schluß ermittelte Beziehung aufgetragen. Auf eine weitere, mit "II" gekennzeichnete, Beziehung wird unter Kapitel 4 näher eingegangen.

2.3 Instrumentierung des Modelltanks

Am Modelltank wurden drei verschiedene Größen aufgenommen:

- Druckmessung

Diese Messungen wurden mit piezoelektrischen und Turmalin-Aufnehmern durchgeführt. Die stecknadelkopfgroßen Turmalin-Aufnehmer waren am Schildtank angebracht, da die geringe Wandstärke für eine Montage der größeren piezoelektrischen Aufnehmer nicht ausreichte, bzw. das Verhalten der Schildtankwand nicht beeinflusst werden sollte.

- Dehnungsmessung

Die Dehnungen wurden mittels Dehnmeßstreifen aufgenommen.

. Wegmessung

Mit elektromagnetischen Wegaufnehmern wurde die vertikale Bewegung des Auflageringes und die horizontale Bewegung des Tanks in der Nähe des Halbkugelbodens aufgezeichnet.

Die Position aller Meßwertaufnehmer ist in Bild 2 (S. 16) dargestellt. Weitergehende Informationen enthält (JO 79).

Um zu einer Abschätzung der Fehlerbandbreite der Messungen zu gelangen, wurden umfangreiche Tests mit den Meßwertaufnehmern vorgenommen. Dies führte zu einer Eingrenzung des Meßfehlers, inklusive der Datenverarbeitung, von $\pm 9\%$ für Druckspitzen, $\pm 5\%$ für Impulsraten und maximal $\pm 4\%$ für die Dehnungen.

2.4 Materialkennlinien

Für die verwendeten Materialien wurden in statischen Zerreiversuchen Spannungs/Dehnungs-Beziehungen ermittelt und zusätzlich die Materialien, für die im Versuch eine plastische Verformung zu erwarten war, einer dynamischen Spannungs/Dehnungs-Messung unterzogen (JO 79). Dies sind der Schildtank, der Außentank und die Dehnschrauben, die den Deckel mit dem Auflagering verbinden. Bild 4 (S. 18) zeigt die für die SEURBNUK-Rechnung verwendeten Kurven. Es sind nur die Kurvenzüge einer Dehnrate $\dot{\epsilon}$ dargestellt, wie sie maximal während des Versuchs auftritt. Für den Schildtank ist dies $\dot{\epsilon} = 10 \text{ s}^{-1}$, für den Außentank $\dot{\epsilon} = 4 \text{ s}^{-1}$ und für die Dehnbolzen ebenfalls $\dot{\epsilon} = 4 \text{ s}^{-1}$.

Wie in der Einleitung bereits erwähnt, war der Außentank durch den ersten Versuch leicht vorverformt. Die maximale Umfangsdehnung betrug dabei 0,4 %. Diese Vorverformung und die Abhängigkeit von der Dehngeschwindigkeit wurde durch eine leichte Erhöhung der Materialkennlinie im plastischen Bereich um 25 N/mm^2 in der Rechnung berücksichtigt. Der geometrische Einfluß (Aufweitung) und die etwas größere Istwandstrke gegenüber dem Sollma (10 bis 11 mm) des Auentanks wurde vernachlässigt.

Neben dem im ersten Versuch verformten Schildtank und den Deckelbolzen wurde im zweiten Test auch die Tauchplatte mit Abstützung ausgetauscht.

3. RECHENPROGRAMM SEURBNUK-2, E4

3.1 Allgemeine Beschreibung

Das Fluid/Struktur-Programm SEURBNUK-2 wurde von der Atomic Energy Establishment (AEE) Winfrith (UK) gemeinsam mit dem EURATOM-Joint Research Center Ispra (Italien) zur Analyse von Sicherheitsproblemen bei Schnellen Reaktoren entwickelt. Eine genaue Beschreibung des Codes und seiner Möglichkeiten ist in der Literatur (Ca, al. 77), (St, Ye 79), (Ke, al. 79) dargelegt. Es wird daher hier im wesentlichen auf die Weiterentwicklungen eingegangen, die für diese speziellen Problemstellungen notwendig waren.

SEURBNUK-2 ist ein zweidimensionaler Euler-Code, in dem die hydrodynamischen Gleichungen nach einem numerischen Verfahren gelöst werden, das auf der ICE-Methode (Implicit Continuous-fluid Eulerian Technique) von Harlow und Amsden (Ha, Am 68), (Ha, Am 71) basiert. Die nichtlinearen zeitabhängigen Differentialgleichungen für das Fluid werden zusammen mit den Gleichungen, die das elastisch-plastische Verhalten von dünnen Schalen beschreiben, mit einem impliziten Differenzenverfahren gelöst, wobei Effekte der Kompressibilität des Fluids berücksichtigt werden. Das Schalenmodell kann Behälter beliebiger Form (zweidimensional) behandeln. Der Zeitschritt für die Schalenberechnung ist in SEURBNUK unabhängig vom Zeitschritt für die Fluidrechnung wählbar. Dadurch ist für die Fluidrechnung ein sehr viel größerer Zeitschritt möglich als er für die Struktur notwendig ist, wobei die Kopplung zwischen Struktur und Fluid zu jedem Fluid-Zeitschritt gewährleistet ist.

3.2 Letzte Weiterentwicklungen

Die Weiterentwicklungen in SEURBNUK-2, die zu einer Rechnung dieses Versuchs notwendig waren, sind:

- Erweiterung auf deformierbare, perforierte Strukturen,
- allgemeine Formulierung von Strukturverbindungen und
- bessere Behandlung von Multifluidzellen.

Die Behandlung von nichtdeformierbaren, perforierten Strukturen in SEURBNUK-2 ist schon seit längerer Zeit möglich (St, Ye 79) und hat sich zur Beschreibung der Strömung durch poröse Strukturen bewährt. Die Anwendbarkeit wird durch die starre und räumlich feste Simulation der Struktur begrenzt, da auf diese Weise keine Kopplung Fluid-Struktur und folglich auch keine Lastabtragung über die Stützkonstruktionen berechnet werden kann. Dies führte zur Verbesserung des Codes hinsichtlich beweglicher, deformierbarer und perforierter Schalen und Platten (Sm 81), die im vorliegenden Fall an der Tauchplatte, der Gitterplatte und der Gitterplattenabstützung realisiert wurde.

Der Druckverlust über eine Platte kann nach Smolderen (Sm, al. 79) in der Form

$$\Delta p = \xi' \rho \frac{\delta w}{\delta t} + \frac{1}{2} \xi \rho w/w/ \quad (1)$$

berücksichtigt werden. Darin ist ξ' eine gleichwertige Beschleunigungslänge, deren Definition auf Trägheitsbetrachtungen beruht (Sm, al. 79), (Sm 80). Die Größe ξ ist ein dimensionsloser Reibungsbeiwert der (Id 66) entnommen werden kann. Die Geschwindigkeit w in obiger Gleichung ist definiert als die Relativgeschwindigkeit des Fluids in den Poren. Für ein gegebenes Perforationsverhältnis stellt Gleichung (1) einen Zusammenhang zwischen der Strömungsgeschwindigkeit in den Poren und dem augenblicklichen Druckverlust über der Plattendicke dar. Das Kräftegleichgewicht an der Struktur führt nach Gleichung (2) zu einer Verbindung von aktueller Druckdifferenz mit der Belastung der Schale oder Platte.

$$\Delta p = \sigma \frac{\partial u}{\partial t} + F_n \quad (2)$$

Hier ist σ die Masse der Platte pro Flächeneinheit, u die Relativgeschwindigkeit der Platte normal zur Oberfläche und F_n die Rückstellkraft, resultierend aus dem Spannungszustand derⁿStruktur. Gleichung (2) wird in SEURBNUK-2 innerhalb des "Dünne Schalen-Prozessors" in der gleichen Weise gelöst, wie für eine unperforierte Schale. Ist die Geschwindigkeit der Platte einmal bekannt, kann mittels Gleichung (1) die Fluidgeschwindigkeit in den Poren ermittelt werden. Die Kopplung Fluid-Struktur ist damit gegeben.

Die Verbindungspunkte 8, 9, 14, 17 und 21 bis 23 in Bild 6a (S. 20) beinhalten jeweils drei Anschlüsse, die je eine Dünne Schale mit Lagrange-Charakter darstellen. Eine solche Anordnung kann zu der Situation führen, daß eine Zelle drei Fluide enthält, die nicht miteinander in Verbindung stehen.

Die Berechnung der richtigen Belastung der drei Schalen aus dem Druck, der dem jeweiligen Fluid zugeordnet wird, führte zu umfangreichen Ergänzungen im Code. Ein erheblicher Programmieraufwand war weiterhin notwendig, um die korrekte Behandlung einer Multi-Fluidzelle in allgemeiner Form sicherzustellen.

Bei den Strukturverbindungen wurde ergänzend zu Typ 3, der gelenkig ist, die Wahl eines Typs 13 ermöglicht, der Biegemomente überträgt. Entsprechend der konstruktiven Ausbildung wurden die zuvor genannten Verbindungspunkte als Typ 13 modelliert.

4. DETAILS DER RECHNUNG

Die Nachrechnung wurde bis zu einer Problemzeit von 5,5 ms durchgeführt. Zu diesem Zeitpunkt sind alle wesentlichen Belastungsvorgänge abgeschlossen oder haben fast überall die Maximalwerte erreicht.

4.1 Einfluß der Zustandsgleichung der chemischen Ladung

Von allen Parametern, die während des Versuches die Belastung des Tanks beeinflussen, ist der Verlauf der Energiefreisetzung durch die chemische Ladung bei weitem der ausschlaggebende. Wie in Abschnitt 2.2 beschrieben, wurde von Belgo Nucleaire in einer Serie von fünf Kalibrierschüssen eine Zustandsgleichung für die Ladung ermittelt. Für den Versuch wurden dann zwei identische Ladungen hergestellt, von denen eine am Tag vor dem zweiten Schuß als letzte Überprüfung dem Kalibrierversuch unterzogen wurde. Die so ermittelte p-V-Beziehung für den Sprengstoff ist in Bild 3 eingezeichnet und mit "I" gekennzeichnet.

Diese Beziehung wurde als Eingabe für eine Vorausrechnung sowohl in SEURBNUK-2 als auch in zwei weiteren Codes mit anderen numerischen Verfahren benutzt. Die Rechnungen wurden unabhängig von

drei verschiedenen Instituten durchgeführt und zeigten ähnliche Ergebnisse für die maximalen Dehnungen an Schild- und Außentank. Das Experiment wies jedoch aus, daß hier die berechneten Dehnungen um den Faktor 2 über den tatsächlichen Dehnungen lagen. Dies stand im Widerspruch zu den Rechnungen für den 1. Schuß, die wesentlich besser mit den Experimenten übereinstimmten. Die Unstimmigkeiten legten den Verdacht nahe, daß sich die Ladung während des Experiments anders verhielt, als bei den Kalibrierversuchen gemessen wurde. Eine mögliche Ursache für dieses Verhalten kann im dünneren Schildtank gesehen werden, der - wie in Kapitel 1 beschrieben - zu größeren Verformungen führen sollte. Da die Ladung bei den Kalibrierversuchen von einer stärkeren Ummantelung umgeben war, könnte durch den dünnen Schildtank eine leichtere Zerstäubung und damit eine unvollkommene Deflagration der Hauptladung verursacht worden sein.

Für die Rechnung bedeuten diese Abweichungen, daß der Verlauf der Energiefreisetzung neu bestimmt werden muß. Eine Möglichkeit zur besseren Beschreibung ist die Rückrechnung mittels eines Containment-Codes aus dem Versuchsverlauf selbst. Dieses Verfahren, dessen Genauigkeit noch sehr fragwürdig ist, wurde hier jedoch nicht angewendet. Stattdessen wurde eine neue p-V-Beziehung abgeschätzt und als Eingabe in SEURBNUK-2 verwendet. Der so berechnete Versuchsablauf und die bleibenden Verformungen, verglichen mit dem Experiment, galten als Maß für die Güte der Abschätzung. Unter diesen Voraussetzungen kann die Nachrechnung des 2. Schusses jedoch keinen Anspruch mehr auf Code-Verifikation erheben. Dennoch zeigte die Rechnung die prinzipielle Anwendbarkeit des Programms auf komplexe Geometrien, die großen Verformungen unterliegen. Es ist nicht trivial, daß mit einem Programm auch nur annähernd richtig das zeitliche Zusammenspiel von Druckwellenausbreitung, Fluidbewegung zusammen mit Spannungen und Dehnungen in der Struktur berechnet wird.

Die nach dem oben genannten Verfahren ermittelte p-V-Beziehung ist in Bild 3 (S. 17) mit "II" gekennzeichnet. Beim Vergleich mit der Kalibrierkurve "I" ist zu erkennen, daß im wesentlichen der Bereich der starken Volumenexpansion bei nur geringer Druckabsenkung auf ein niedrigeres Druckniveau verschoben wurde. Dies läßt sich mit der vorhin beschriebenen, flexibleren Umgebung der Ladung erklären.

4.2 Modellierung des 1/6-Versuches

Die Modellierung des 1/6-Tanks in SEURBNUK-2 ist den Bildern 5a), b) und 6a), b) (S. 19, 20) zu entnehmen. Ein Vergleich des Eingabe-Modells mit der Konstruktionszeichnung in Bild 1 ermöglicht eine einfache Zuordnung der rechnerischen Grenzlinien zu den konstruktiven Details, zeigt aber auch die Abweichungen auf, die im wesentlichen auf die Grenzen des Codes zurückzuführen sind.

Der Punkt FP kennzeichnet den rechnerischen Fixpunkt, an dem Außentank (B4) und Dehnbolzen (B21) angebunden sind. Dadurch wird in der Rechnung eine mögliche Bewegung der Auflage- und Stützkonstruktion nicht erfaßt. Die Auflagekonstruktion der Gitterplattenabstützung im Halbkugelboden wird als einfacher Zylinder

modelliert. Ein perforiertes Teilstück (B13) simuliert die Schlitze in diesem Bereich, die einer Druckentlastung des Zwischenraumes dienen. Die perforierte Tauchplatte wird mittig und am Rand von Zylindern mit der richtigen Festigkeit unterstützt. Diese sind aber für das Fluid unsichtbar und erlauben daher einen Austausch zwischen innerem und äußerem Bereich. Der ca. 560 mm dicke Deckel und die 70 mm dicke Gitterplatte müssen entsprechend den Fähigkeiten des Programms als dünne Schalen modelliert werden. Diesen Schalen wird die korrekte Masse zugeordnet, jedoch eine dem Dickenverhältnis entsprechend erhöhte Dichte und Steifigkeit.

Der Außentank, der durch den 1. Schuß geringfügig vorverformt worden war, wird in der Rechnung als unverformt angesehen. Eine mögliche Verfestigung des Materials wird pauschal durch eine geringe Erhöhung der Materialkennwerte berücksichtigt. Ovalitäten, Wanddickenänderungen, Abweichungen von der axialen Symmetrie oder auch die sechs Rohranschlüsse können in SEURBNUK-2 nicht berücksichtigt werden. Die aufgezählten Vereinfachungen werden für die Nachrechnung als unwesentlich angesehen.

5. ANALYSE DER RECHENERGEBNISSE

Von den 80 Druck- und Dehnungsmeßstellen am Experiment wurden einige an Schlüsselpositionen zum Vergleich mit der Rechnung herangezogen. Diese Vergleichsmeßstellen sind in Bild 2 (S. 16) mit den Zahlen 1-10 gekennzeichnet. Die Gegenüberstellung Rechnung-Experiment ist in den Bildern 7-29 (S. 21-43) festgehalten. Die Bilder 7-22 zeigen den Druck- und Impuls-Vergleich an den Meßstellen 1 bis 8, die Bilder 23-29 den Vergleich der meridionalen und der Umfangsdehnungen an den Positionen 1, 3, 4a, 5, 9 und 10.

In den Druckverläufen ist für alle Meßpositionen ein charakteristisches Verhalten festzustellen. Die Druckspitzen werden von der Rechnung nicht wiedergegeben; der gesamte rechnerische Druckverlauf ist "verschmiert". Das erste Druckmaximum erscheint zeitlich richtig, wird in der Amplitude jedoch unterschätzt. Für nachfolgende größere Problemzeiten wird im wesentlichen der mittlere Druckverlauf durch eine geglättete Kurve nachvollzogen. Besonders bemerkbar macht sich dieser Effekt bei den hochfrequenten Druckschwingungen. Ein solches Verhalten ist für Euler-Codes, wie SEURBNUK-2, charakteristisch, denn durch die endliche Diskretisierung der Erhaltungsgleichungen entsteht eine numerisch bedingte Unschärfe. Daß der Verlauf im Mittel richtig wiedergegeben wird, ist aus dem Vergleich des zeitlichen Integrals des Drucks, dem Impuls, zu erkennen. Die Übereinstimmung fällt hier zufriedenstellend aus und zeigt teilweise sogar Deckungsgleichheit.

Eine signifikante Abweichung in Richtung zu großer Werte tritt lediglich an Position 8, im unteren Sammelbehälter (USB), auf. Der Druck im USB wird im wesentlichen durch zwei physikalische Vorgänge beeinflusst, nämlich durch das Durchströmen der Gitterplatte und durch deren Durchbiegung. Die Durchströmung wird offensichtlich annähernd richtig wiedergegeben, da der Impuls auf

der Gitterplatte eine gute Übereinstimmung mit dem Experiment zeigt. Die Berechnung der Durchbiegung kann hingegen nicht genau ausfallen, da - wie eingangs erwähnt - die Gitterplatte als dünne Schale simuliert werden muß. Dies führt durch das rechnerisch weichere Verhalten der Gitterplatte zu einer stärkeren Durchbiegung und, daraus resultierend, zu einer Überschätzung des Drucks im USB.

Die in Bild 23-29 aufgetragenen Dehnungen sind die direkten Reaktionen auf die beschriebenen Druckbelastungen zusammen mit den Materialdaten und den jeweiligen elasto-plastischen Kennlinien. Bild 23 vergleicht die Dehnungen des Innentanks in Ladungshöhe sowohl in Umfangs- als auch in Meridionalrichtung. Die Umfangsdehnung wird mit noch vertretbarer Abweichung nachvollzogen, die Meridionaldehnung hingegen weist eine Überschätzung bis zu 75 % auf. Abweichungen dieser Art wurden bereits bei Nachrechnungen früherer Experimente mit offenem, einseitig eingespanntem Zylinder festgestellt. Es kamen dabei verschiedene numerische Methoden zur Anwendung. Für die gegebene Geometrie erscheint eine starke Kontraktion, wie in Bild 23 gerechnet, zwar vorstellbar, es besteht jedoch kein Anlaß dafür, an der Genauigkeit der gemessenen Werte zu zweifeln. Eine mögliche Erklärung für die starke Abweichung in diesem Fall könnte in der Anwendbarkeit der Stoffgesetze bei starker dynamischer Belastung zu suchen sein. Vorstellbar ist, daß die Struktur unter diesen Bedingungen nicht dem Mises-Fließkriterium und den Prandtl-Reusz-Gesetzen folgt, wie sie in SEURBNUK-2 Anwendung finden. Alle Unzulänglichkeiten im Modell der plastifizierten Struktur machen sich zuerst dort bei den axialen Dehnungen bemerkbar, wo die Effekte der Biegung am stärksten zum Tragen kommen.

Die Umfangs- und Meridionaldehnungen am Außentank in Position 4a zeigen eine gute Übereinstimmung mit den gemessenen Werten (Bild 26). Dies kann in qualitativer Hinsicht auch für die Dehnung an Position 5 am Außentank (Bild 27) und für die der Gitterplattenabstützung an Position 9 (Bild 28) gesagt werden. Die meridionale Dehnung in Position 5 steigt im Experiment und bei der Rechnung auf ca. 0,2 % an und fällt dann wieder ab. Für das Experiment ist der weitere Abfall nicht mehr eingezeichnet. In der Rechnung fällt ein frühzeitiger Anstieg auf, der dem im Experiment um ca. 1,5 ms vorausläuft. Dies läßt sich möglicherweise durch die starr angenommene Auflage- und Tragkonstruktion erklären, die in der Realität ebenfalls elastisch reagiert und das experimentell registrierte Maximum in dieser Weise verzögern könnte. Die Umfangsdehnungen an diesem Punkt wurden nicht geplottet, weil sie nur geringfügig von Null abweichen. Beim Vergleich der Dehnungen der Gitterplattenabstützung an Position 9 ist zu beachten, daß diese sehr klein und nur mit einer stark gespreizten Ordinate darstellbar sind. Tendenziell wird in Experiment und Rechnung der gleiche Verlauf beobachtet, nämlich der anfängliche Abfall auf ein relatives Minimum, gefolgt vom Anstieg auf ein Maximum, dann wieder ein Abfall und ein Anstieg. Das Maximum tritt aber auch hier in der Rechnung ca. 1 ms zu früh auf und wird etwas überschätzt.

Die Unterschätzung der Dehnungen der Deckelbolzen in Bild 29 widerspricht der bisherigen, qualitativ guten Übereinstimmung.

Hier kann ein Einfluß des nur ungenau bekannten Ladungsverhaltens vorliegen; mit Sicherheit aber trägt die ungenügende Modellierung der Deckelstruktur als dünne Schale zu dieser Abweichung bei. Eine solche Simulation führt zu einem stärkeren Energieumsatz bei der Durchbiegung des Deckels, die in der Realität nicht auftritt und deshalb der dabei verbrauchte Energieanteil bei der Berechnung der Deckelbolzendehnung nicht mehr zur Verfügung steht.

Die Bilder 30 - 34 (S. 44-48) zeigen die Gitterplots zur Rechnung mit der sich ausdehnenden Gasblase und der verformten Struktur. In die linke Hälfte des Plots ist das Geschwindigkeitsfeld, in die rechte Hälfte das Druckfeld eingezeichnet. Deutlich sind die verschiedenen Phasen der Belastung zu erkennen. Zunächst tritt die kugelförmige Ausdehnung der ersten Druckwelle auf, dann baut sich der Druck im USB und über der Gitterplatte auf mit entsprechender Abbremsung der Fluidbewegung nach unten. Nachfolgend findet eine im wesentlichen nach oben gerichtete Fluidbewegung gegen die Tauchplatte und den Deckel statt. Die Größe der Geschwindigkeitsvektoren deutet in der letzten Phase auf eine sensitive Region zwischen dem Ende des Schildtanks und dem Rand der Tauchplatte hin.

Eine Gegenüberstellung der Verformungen über die Länge für den Außen- und Schildtank ist in Bild 35 (S. 49) nach 5 ms gegeben. Auch hier zeigt sich wieder eine qualitativ gute Übereinstimmung.

Die Rechnung wurde nach 5,5 ms abgebrochen, als das Wasser die Unterseite des Deckels erreichte. Es treten zwar nachfolgend noch weitere Dehnungen auf, die aber von untergeordneter Bedeutung sind, da die Hauptdehnungen der Tanks schon stattgefunden haben. Das gilt nicht für die Dehnschrauben des Deckels, denn hier ist die Problemzeit zu kurz, um die Hauptdehnungen zu erfassen.

Es ist geplant, in SEURBNUK-2 ein neues Modell für die Behandlung des Deckels zu integrieren, das dann eine Rechnung über die bisherige Problemzeit hinaus ermöglicht.

6. ZUSAMMENFASSUNG

Die Resultate der SEURBNUK-2-Nachrechnung des SNR-300 1/6-Versuches zeigen in allen wesentlichen Punkten eine annehmbare, teilweise sehr gute Übereinstimmung mit den experimentell gemessenen Werten. Die größte Unsicherheit besteht in der angenommenen Zustandsgleichung der chemischen Ladung, die sich während des Versuches anders verhielt, als bei den vorhergehenden Kalibrierversuchen festgestellt wurde.

Die Rechnung veranschaulicht dennoch die Fähigkeit des Programms SEURBNUK-2, große Fluidbewegungen in komplizierten Strukturen unter Einbeziehung starker Dehnungen und Verformungen realistisch zu berechnen.

SCHRIFTTUM

- (Ca, al. 77) Cameron, G. et al:
The Computer Code SEURBNUK-2 for Fast Reactor
Explosion Containment Studies
4th Int. Conf. on SMIRT, Paper B2/1, SF,
Aug. 1977
- (Ha, Am 68) Harlow, F.H. and A.A. Amsden:
Numerical Solutions of Almost Incompressible
Flow
I. Comp. Phys. 80, 1968
- (Ha, Am 71) Harlow, F.H. and A.A. Amsden:
A Numerical Fluid Dynamics Calculation Method
for All Flow Speeds
I. Comp. Phys. 8(1971)197
- (Id 66) Idel'chick:
Handbook of Hydraulic Resistance: Coefficients
of Local Resistance and Friction
AEC-tr-6630(1966)
- (JO 79) Experimental Results of Second SNR 1:6 Scale
Explosion Test
Joint Research Center Ispra, ID-NR. 53.03783.6,
Oct. 1979
- (Ke, al. 79) Kendall, K.C. et al:
Experimental Validation of the Containment
Codes ASTARTE and SEURBNUK
5th Int. Conf. on SMIRT, Paper E4/1, Berlin,
Aug. 1979
- (Sm, al. 79) Smolderen, J.J. et al:
Theoretical and Experiment Study of the Un-
steady Flow Through Perforated Structures
5th Int. Conf. on SMIRT, Paper B3/10, Berlin,
Aug. 1979
- (Sm 80) Smith, B.L.:
Transient Fluid Flow Through Flexible Perfor-
ated Structures
Ispra Course on Computation of Transient
Fluid-Structure Problems, JRC Ispra, 13.-17.
Oct. 1980
- (Sm 81) Smith, B.L.:
The Introduction of Deforming Perforated
Plates in SEURBNUK-2
6th Int. Conf. on SMIRT, Paper B8/4, Paris,
Aug. 1981

(St, Ye 79)

Staniforth, R. and A. Yerkess:
The Computer Code SEURBNUK-2, Recent Develop-
ments
5th Int. Conf. on SMIRT, Paper E1/1, Berlin,
Aug. 1979

ABBILDUNGEN

- Bild 1: 1/6 Reaktortankmodell SNR-300 komplett
- Bild 2: Lage der Druck- und Dehnungsmeßstellen
- Bild 3: Druck/Volumen-Beziehung für die Ladung
- Bild 4: Spannungs/Dehnungs-Kennlinien
- Bild 5: SEURBNUK-Modell vom 1/6-Versuch
- Bild 6: SEURBNUK-Modell vom 1/6-Versuch
- Bild 7: Druck am Innentank, Ladungshöhe, Pos. 1
- Bild 8: Impuls am Innentank, Ladungshöhe, Pos. 1
- Bild 9: Druck am Innentank, unter Ladungshöhe, Pos. 2
- Bild 10: Impuls am Innentank, unter Ladungshöhe, Pos. 2
- Bild 11: Druck am Innentank, über Ladungshöhe, Pos. 3
- Bild 12: Impuls am Innentank, über Ladungshöhe, Pos. 3
- Bild 13: Druck auf Außentank, Ladungshöhe, Pos. 4
- Bild 14: Impuls auf Außentank, Ladungshöhe, Pos. 4
- Bild 15: Druck auf Außentank, Höhe Tauchplatte, Pos. 5
- Bild 16: Impuls auf Außentank, Höhe Tauchplatte, Pos. 5
- Bild 17: Druck auf Tauchplatte, Unterseite, Pos. 6
- Bild 18: Impuls auf Tauchplatte, Unterseite, Pos. 6
- Bild 19: Druck auf Gitterplatte, Pos. 7
- Bild 20: Impuls auf Gitterplatte, Pos. 7
- Bild 21: Druck im Einlaufplenum, Seite, Pos. 8
- Bild 22: Impuls im Einlaufplenum, Seite, Pos. 8
- Bild 23: Dehnung am Innentank, Ladungshöhe, Pos. 1
- Bild 24: Umfangsdehnung am Innentank, über Ladungshöhe, Pos. 3
- Bild 25: Meridionale Dehnung am Innentank, über Ladungshöhe, Pos. 3
- Bild 26: Dehnung am Außentank, unter Ladungshöhe, Pos. 4A
- Bild 27: Dehnung am Außentank, Höhe Tauchplatte, Pos. 5
- Bild 28: Dehnung der Kernabstützung, Pos. 9
- Bild 29: Dehnung der Deckelbolzen, Pos. 10
- Bild 30: Gitterplot der SEURBNUK-2-Rechnung zum 1/6-Modell zur Zeit $T = 0$ ms
- Bild 31: Gitterplot der SEURBNUK-2-Rechnung zum 1/6-Modell zur Zeit $T = 1$ ms
- Bild 32: Gitterplot der SEURBNUK-2-Rechnung zum 1/6-Modell zur Zeit $T = 2$ ms
- Bild 33: Gitterplot der SEURBNUK-2-Rechnung zum 1/6-Modell zur Zeit $T = 3$ ms

Bild 34: Gitterplot der SEURBNUK-2-Rechnung zum 1/6-Modell
zur Zeit $T = 4$ ms

Bild 35: Umfangsdehnung am Innen- und Außentank zur Zeit
 $T = 5$ ms

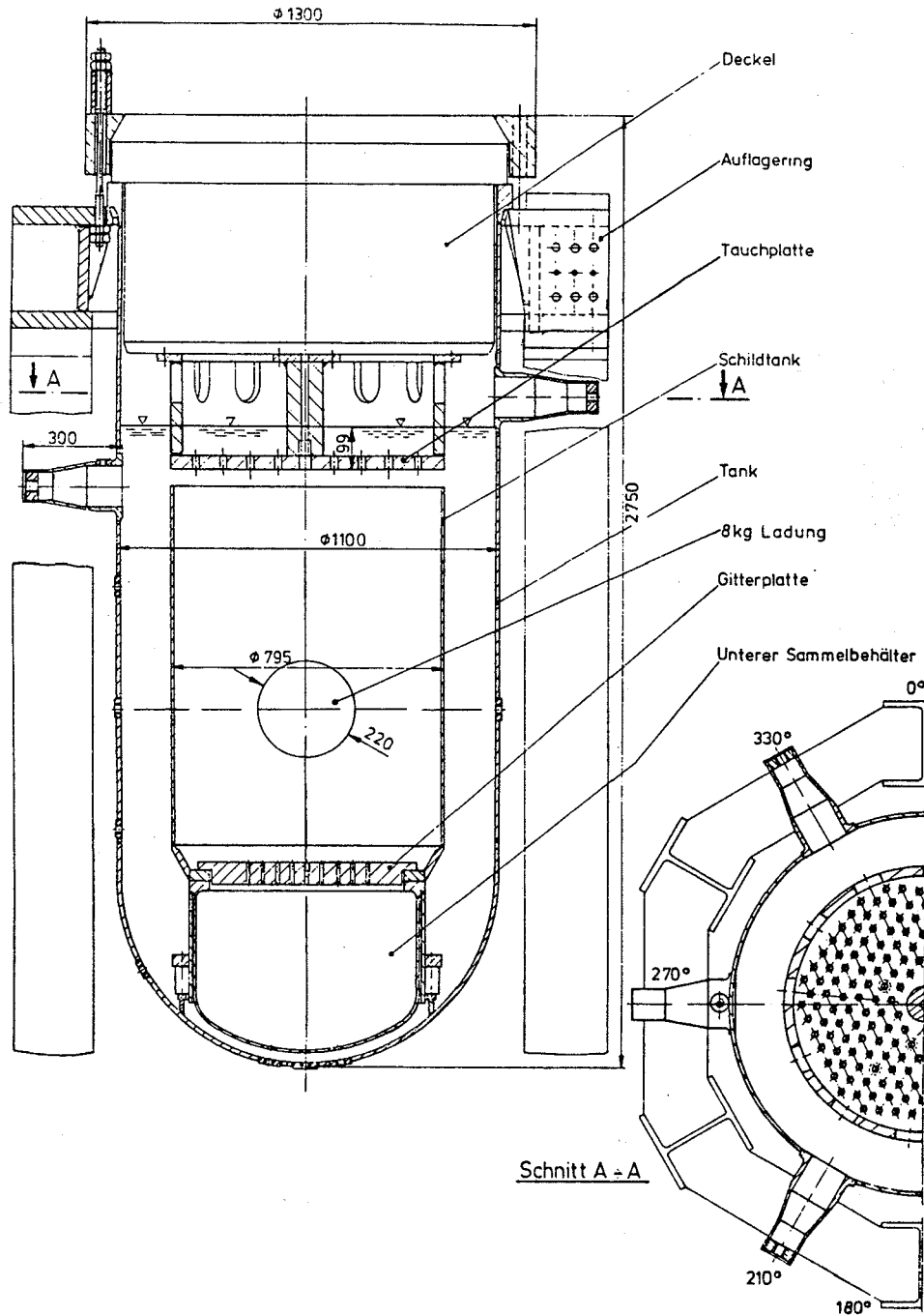


Bild 1:
Reaktortankmodell SNR-300 komplett

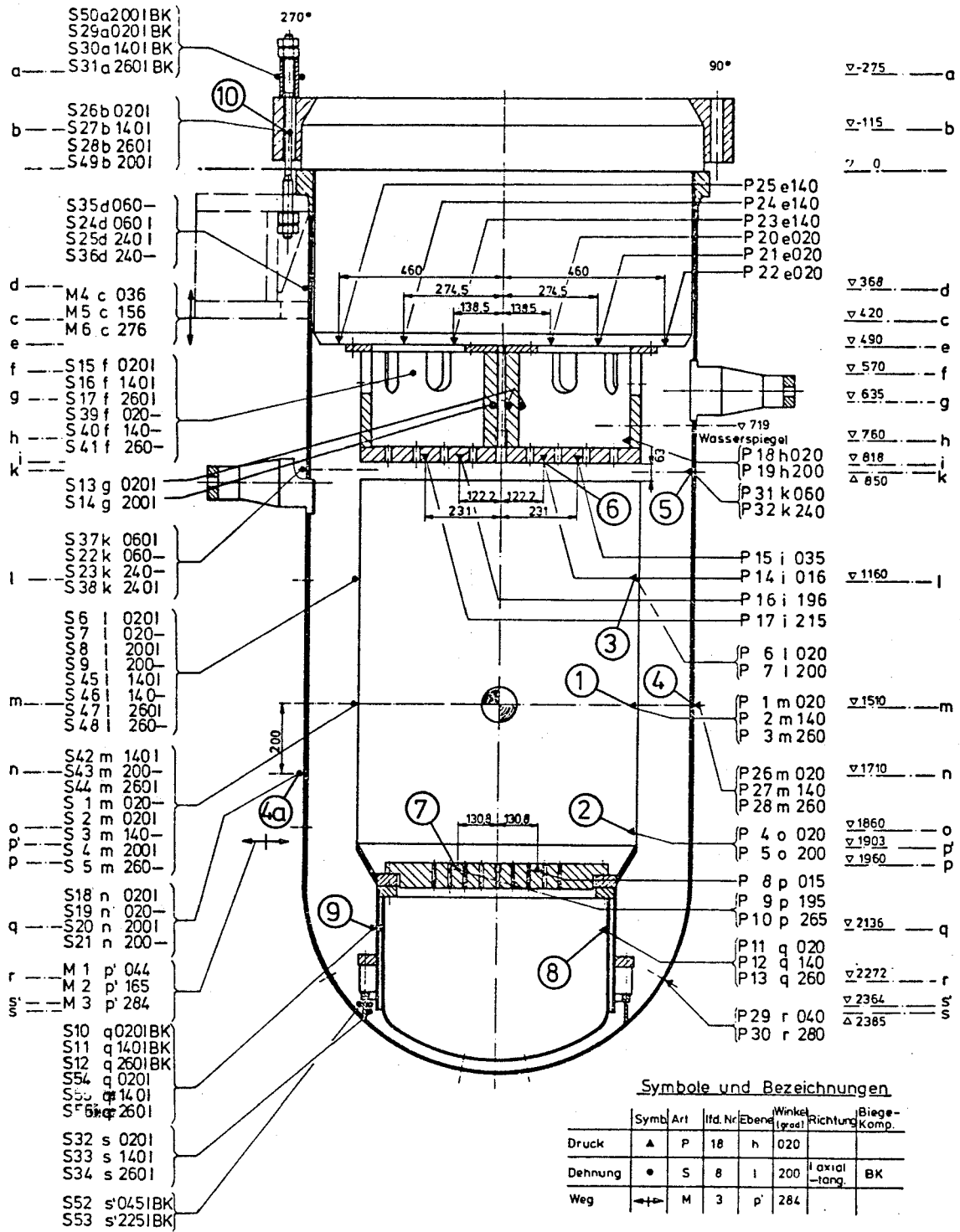


Bild 2:
Lage der Druck- und Dehnungsmeßstellen

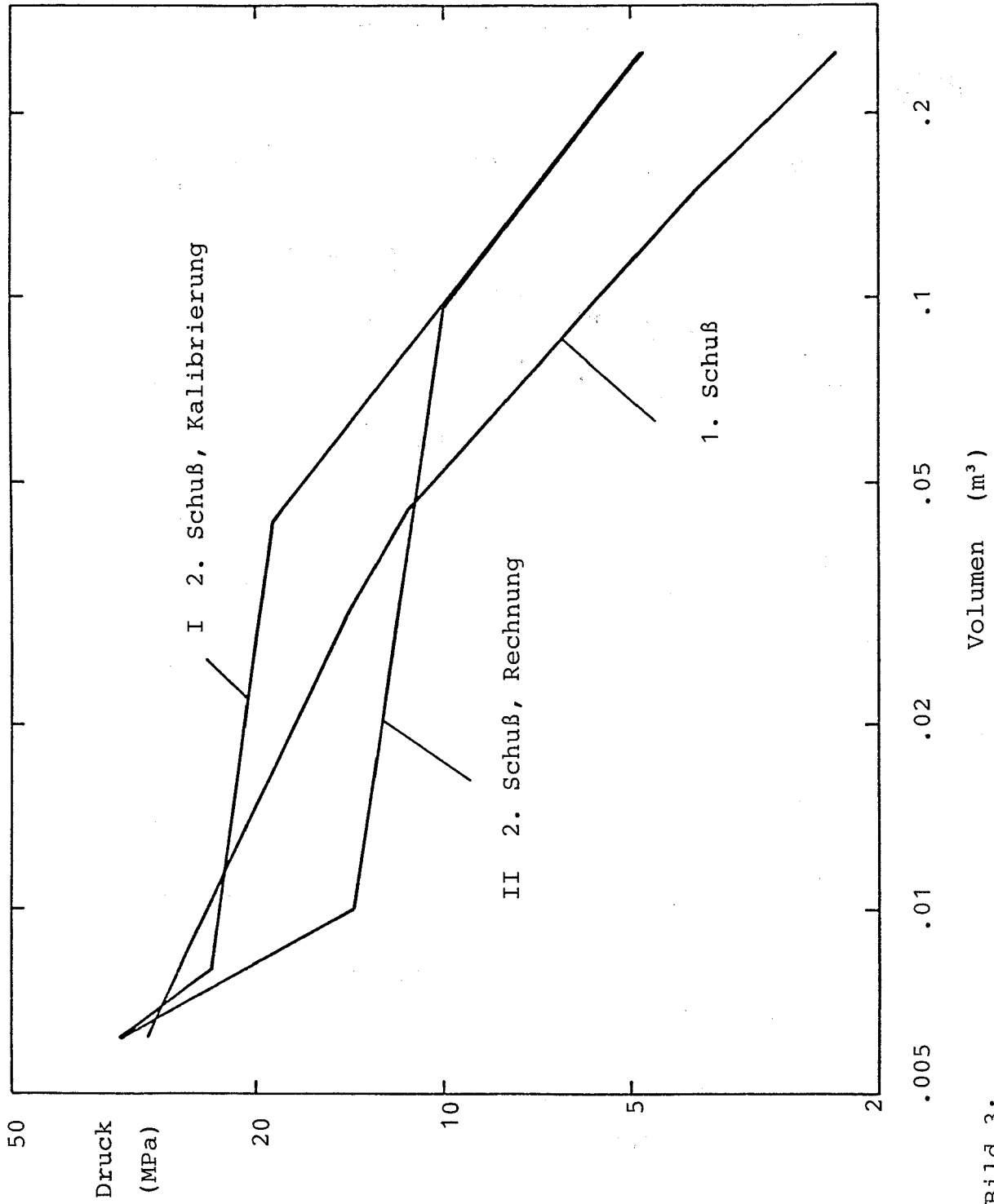


Bild 3:

Druck/Volumen-Beziehung für die Ladung

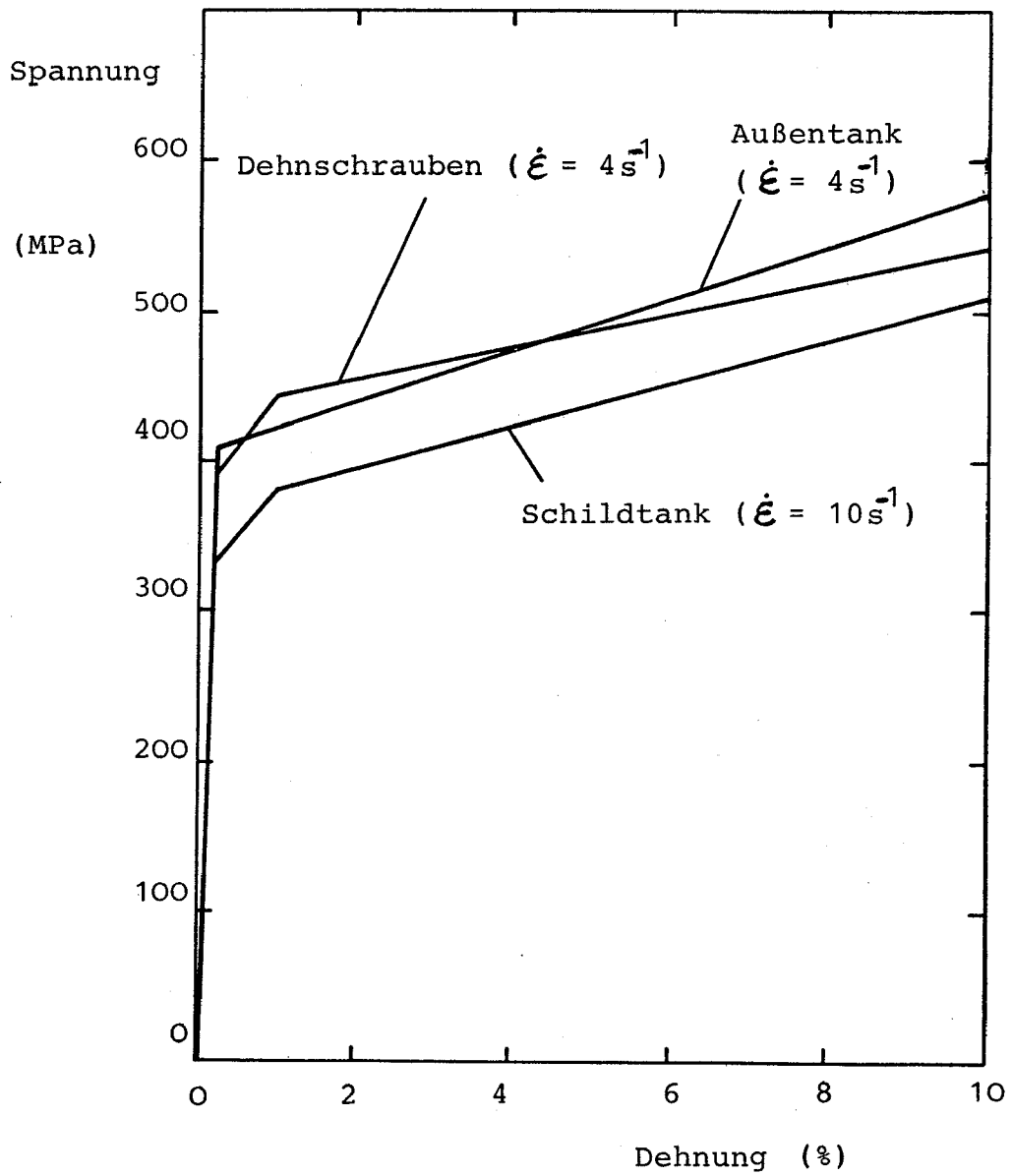


Bild 4:
Spannungs/Dehnungs-Kennlinien

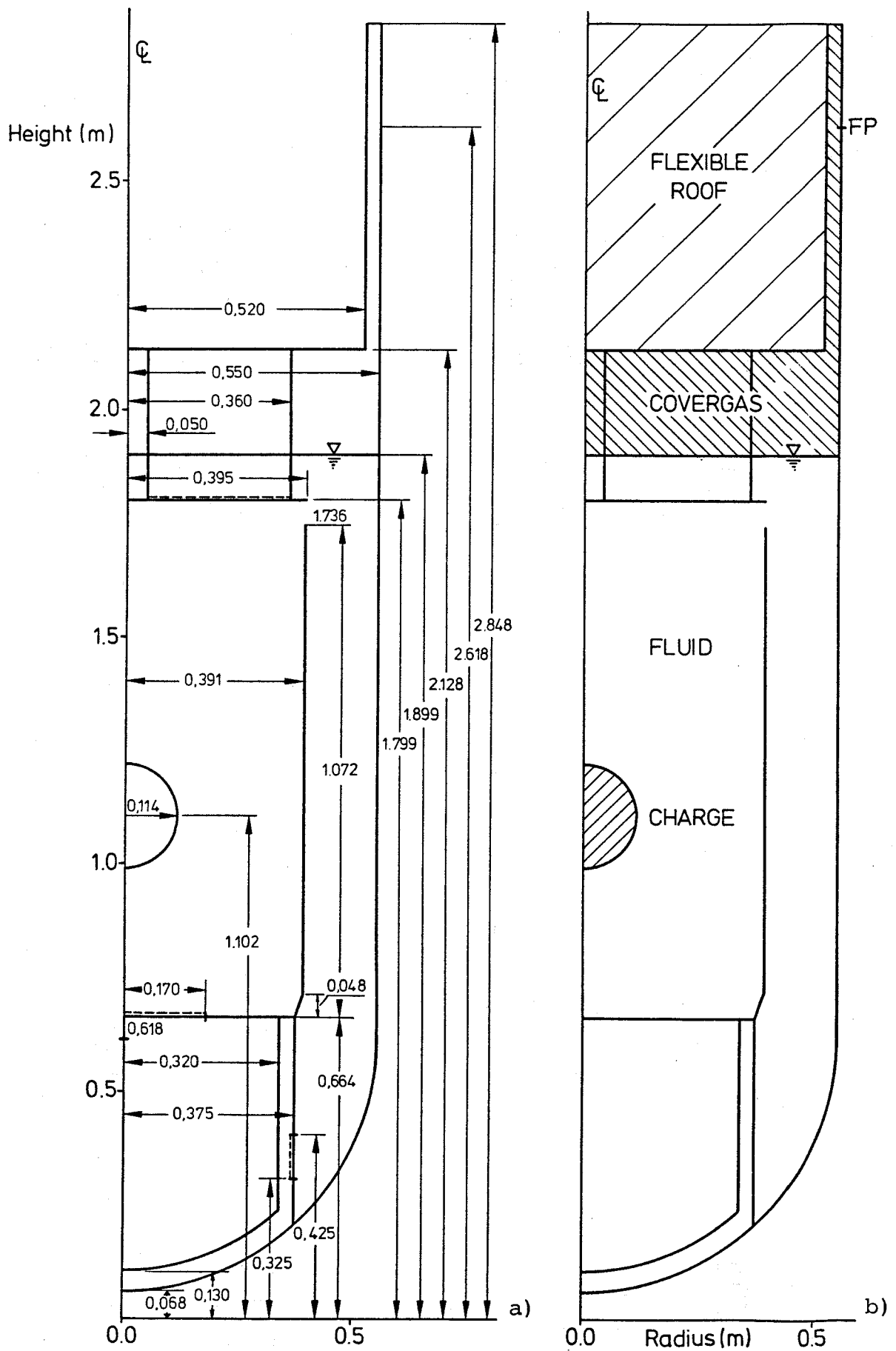


Bild 5:
SEURBNUK-Modell vom 1/6-Versuch

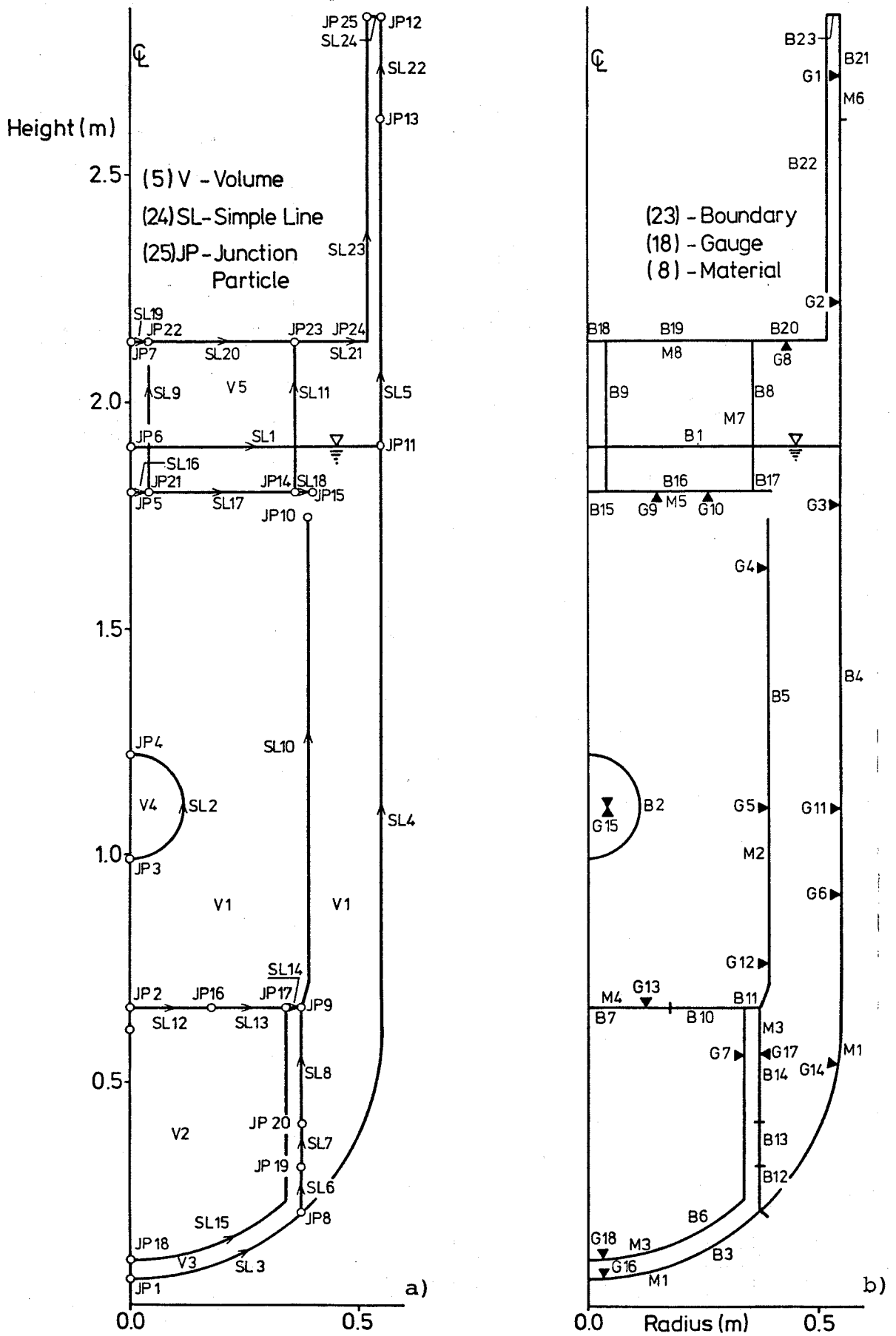


Bild 6:
SEURBNUK-Modell vom 1/6-Versuch

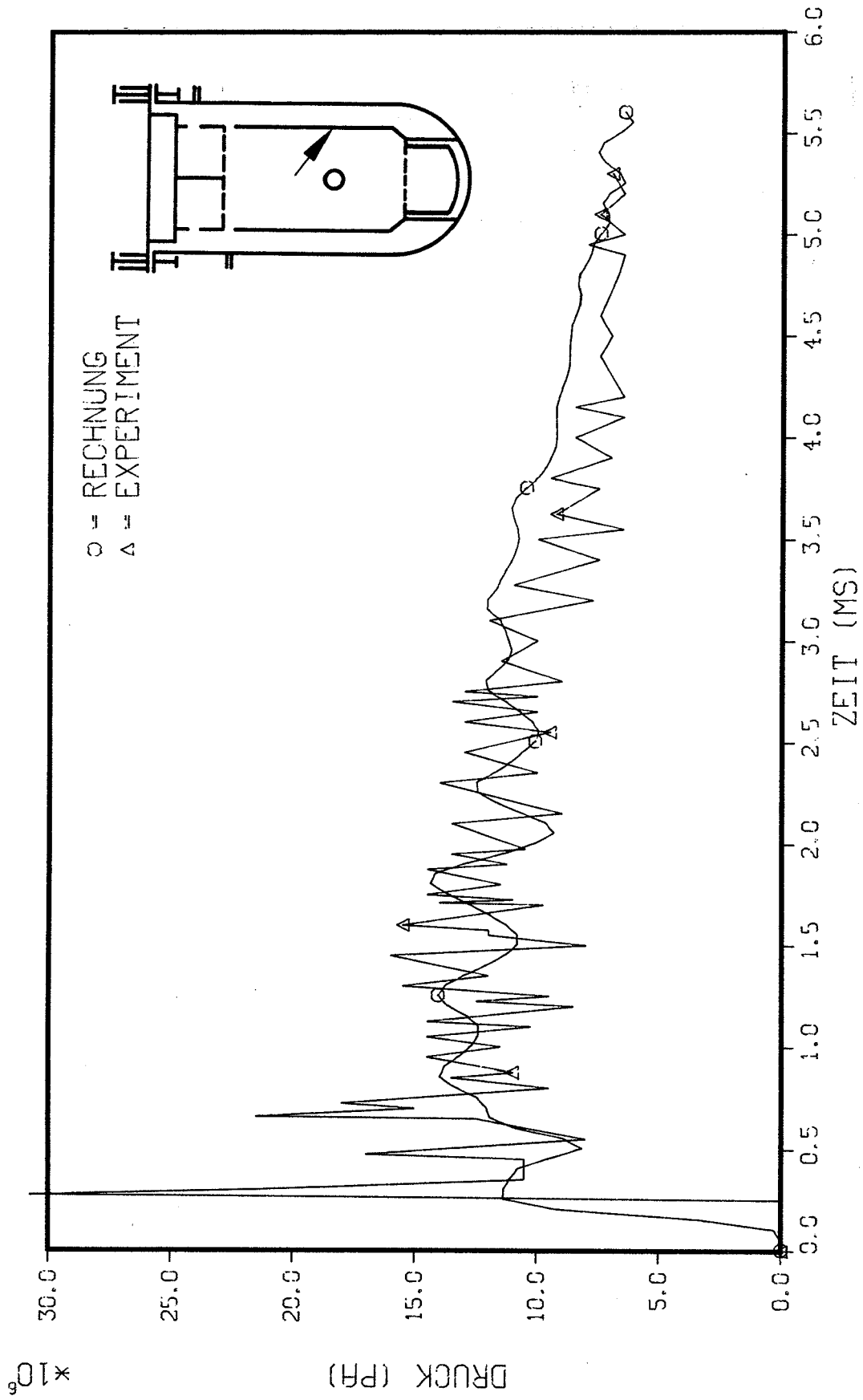


Bild 7:
Druck am Innentank, Ladungshöhe, Pos. 1

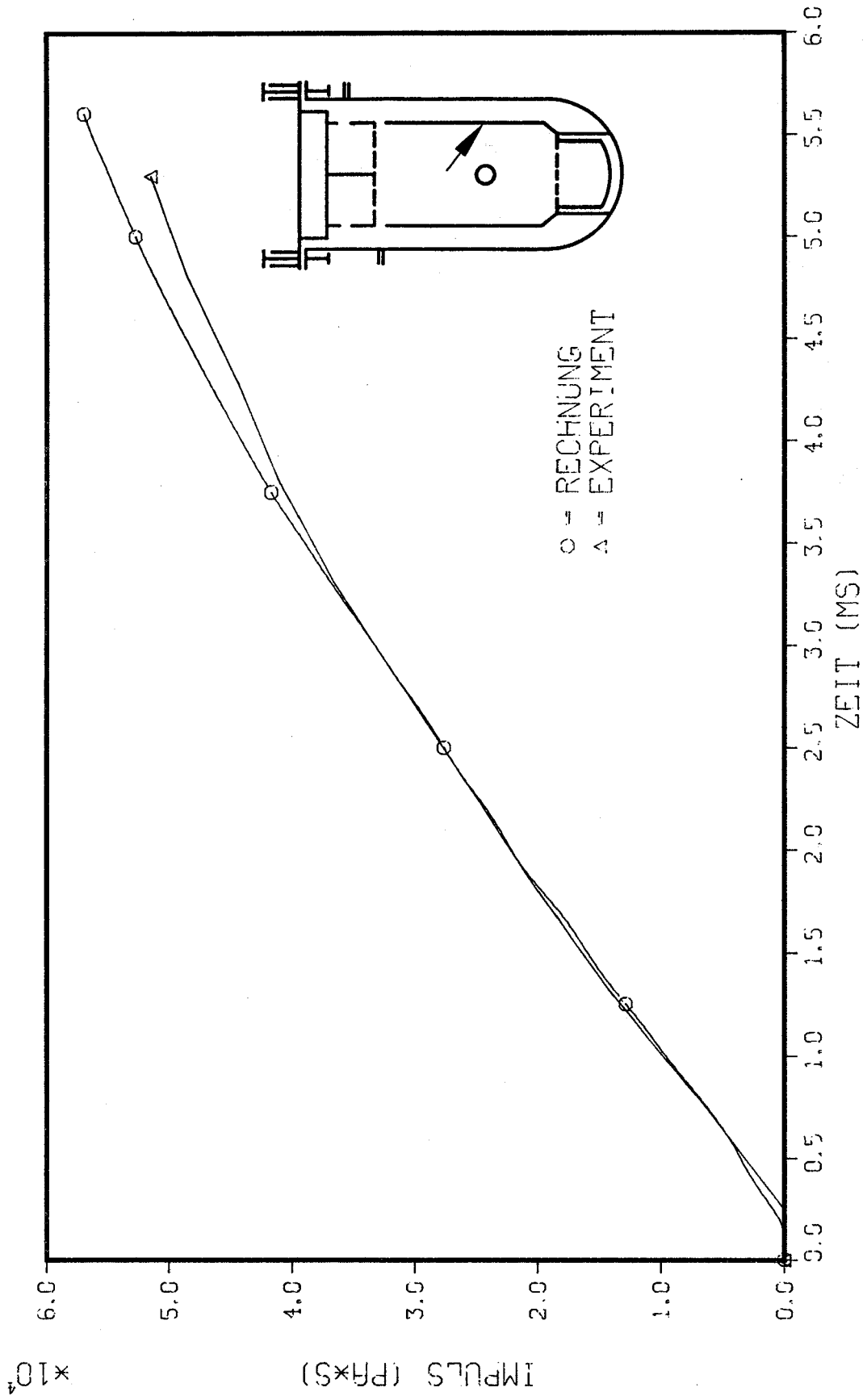


Bild 8:
Impuls am Innentank, Ladungshöhe, Pos. 1

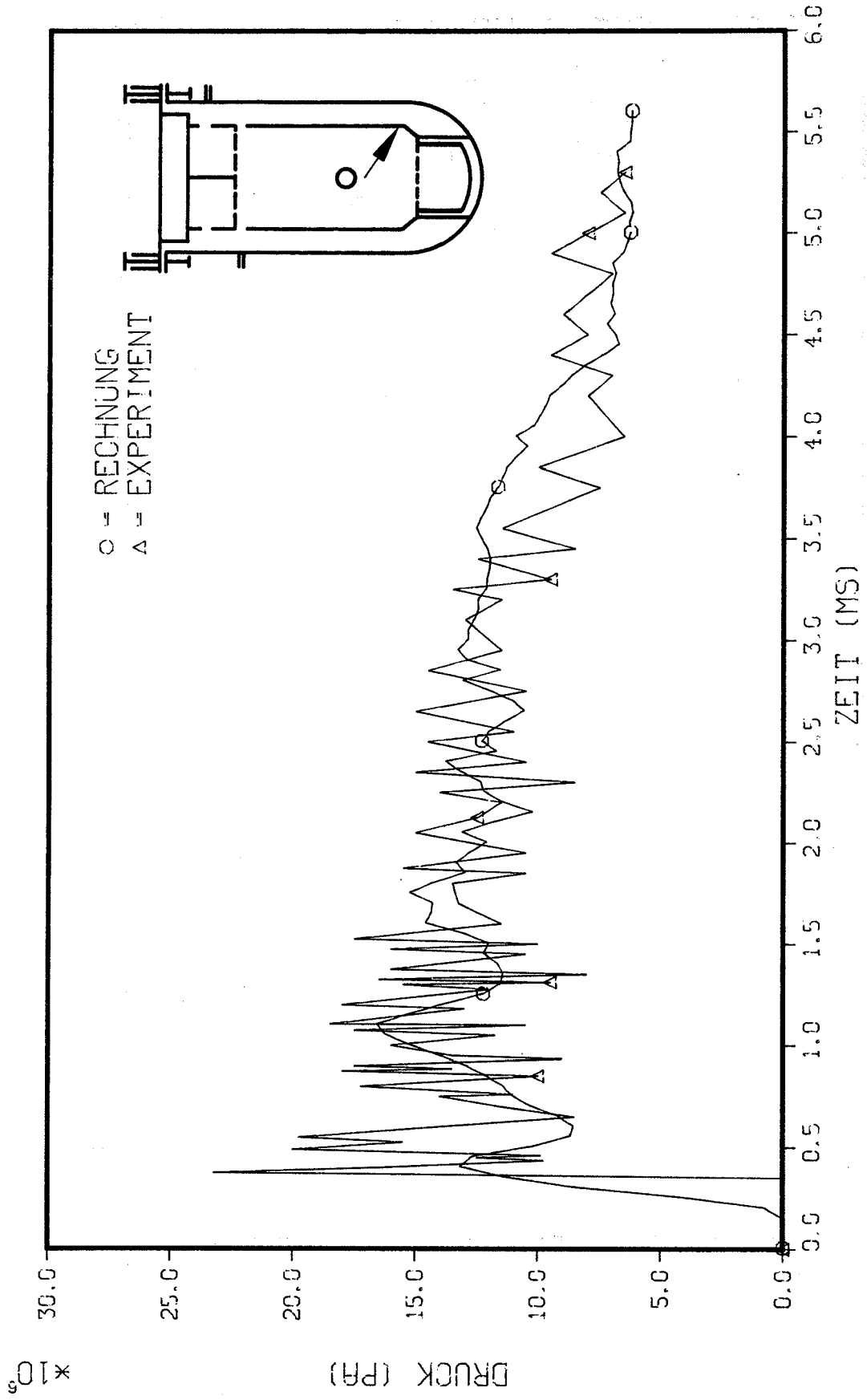


Bild 9:
Druck am Innentank, unter Ladungshöhe, Pos. 2

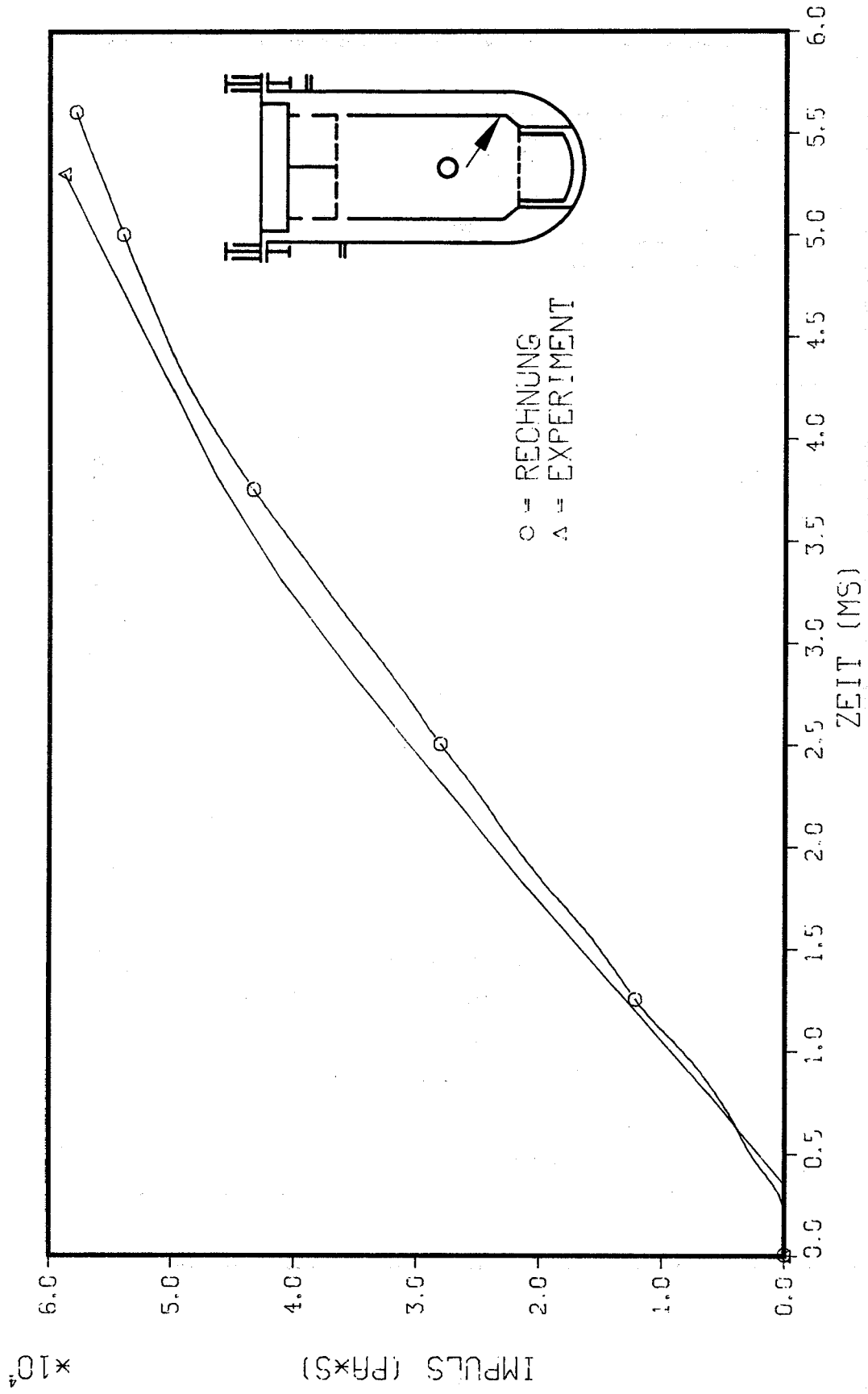


Bild 10:

Impuls am Innentank, unter Ladungshöhe, Pos. 2

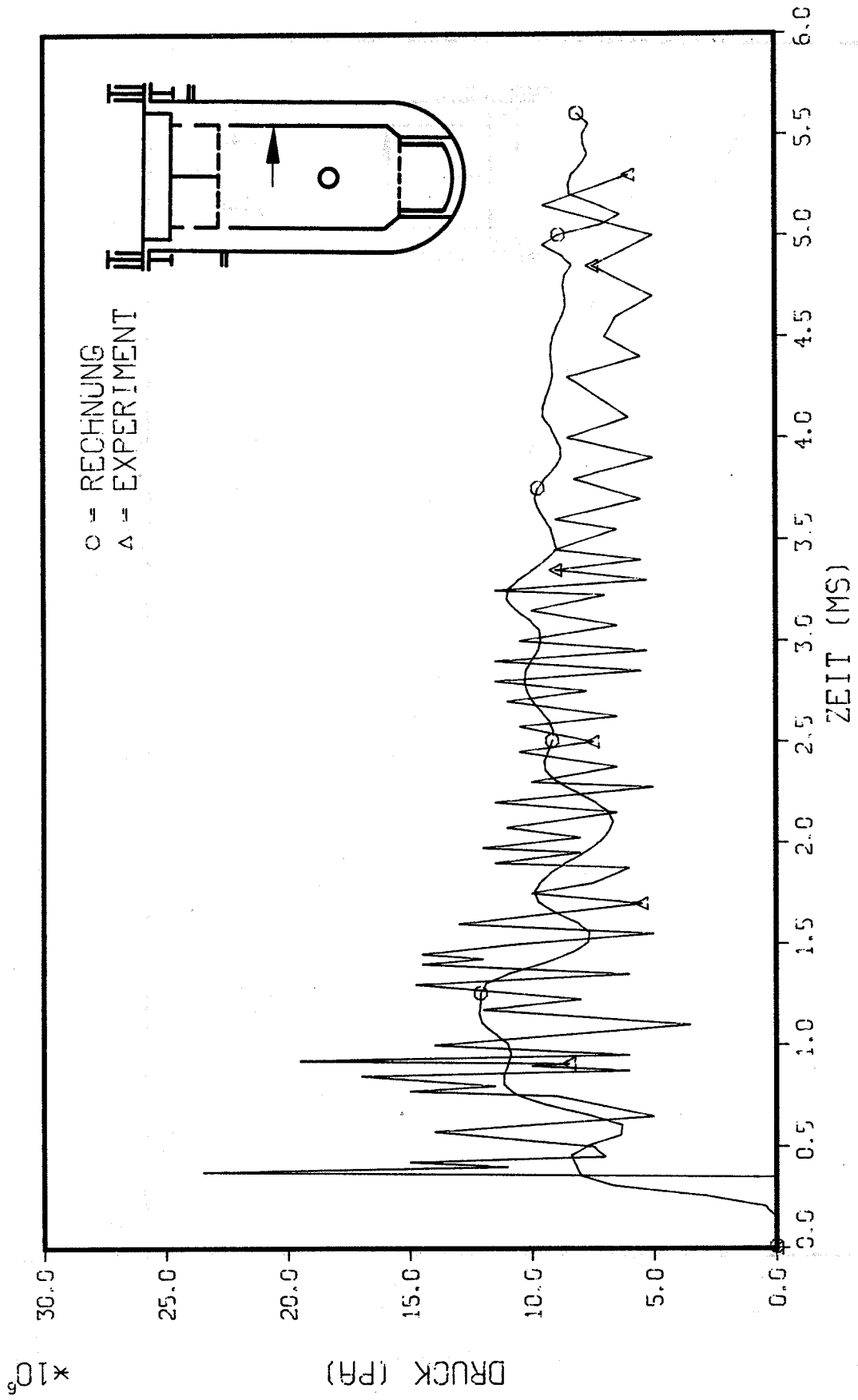


Bild 11:

Druck am Innentank, über Ladungshöhe, Pos. 3

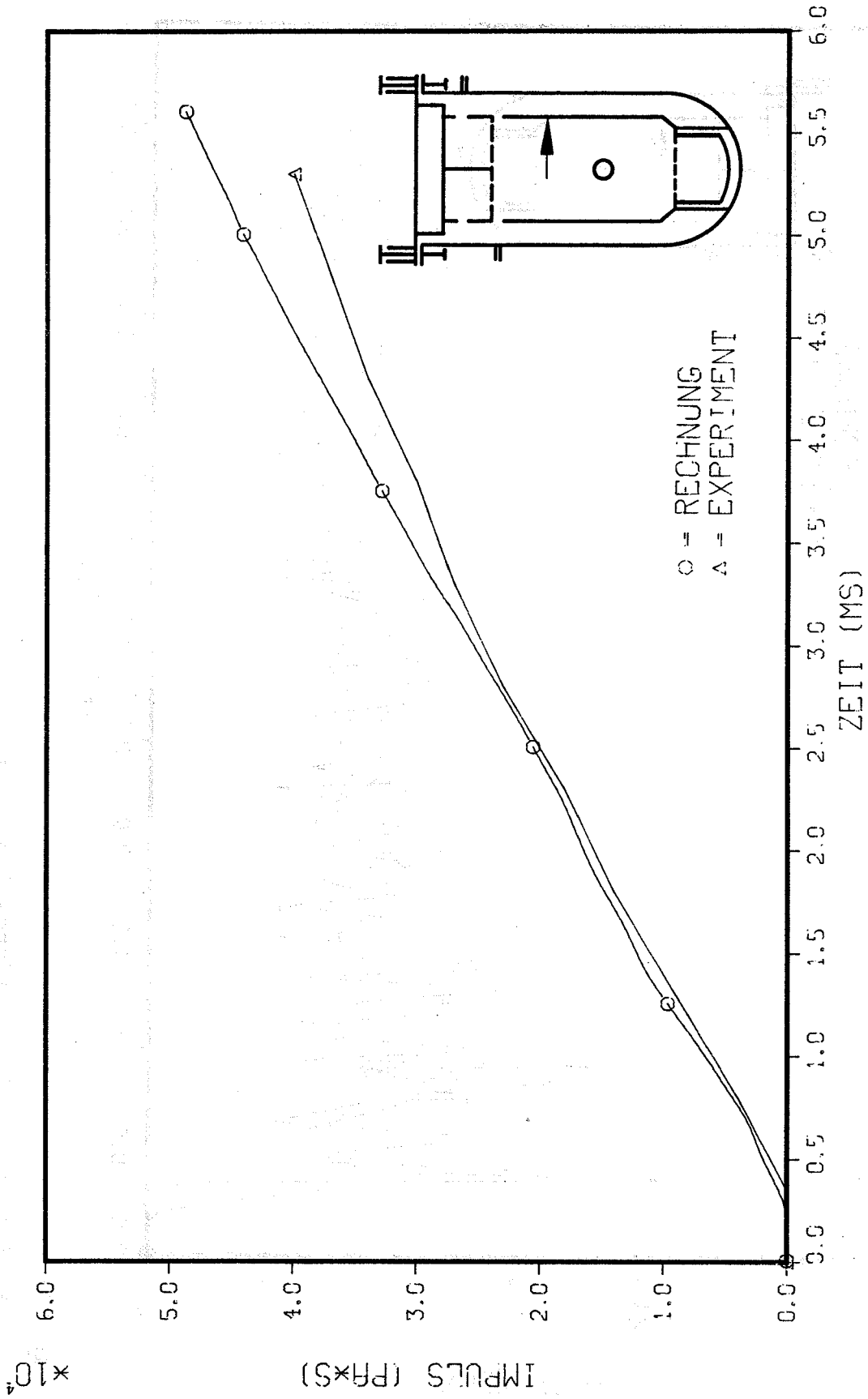


Bild 12:
Impuls am Innentank, über Ladungshöhe, Pos. 3

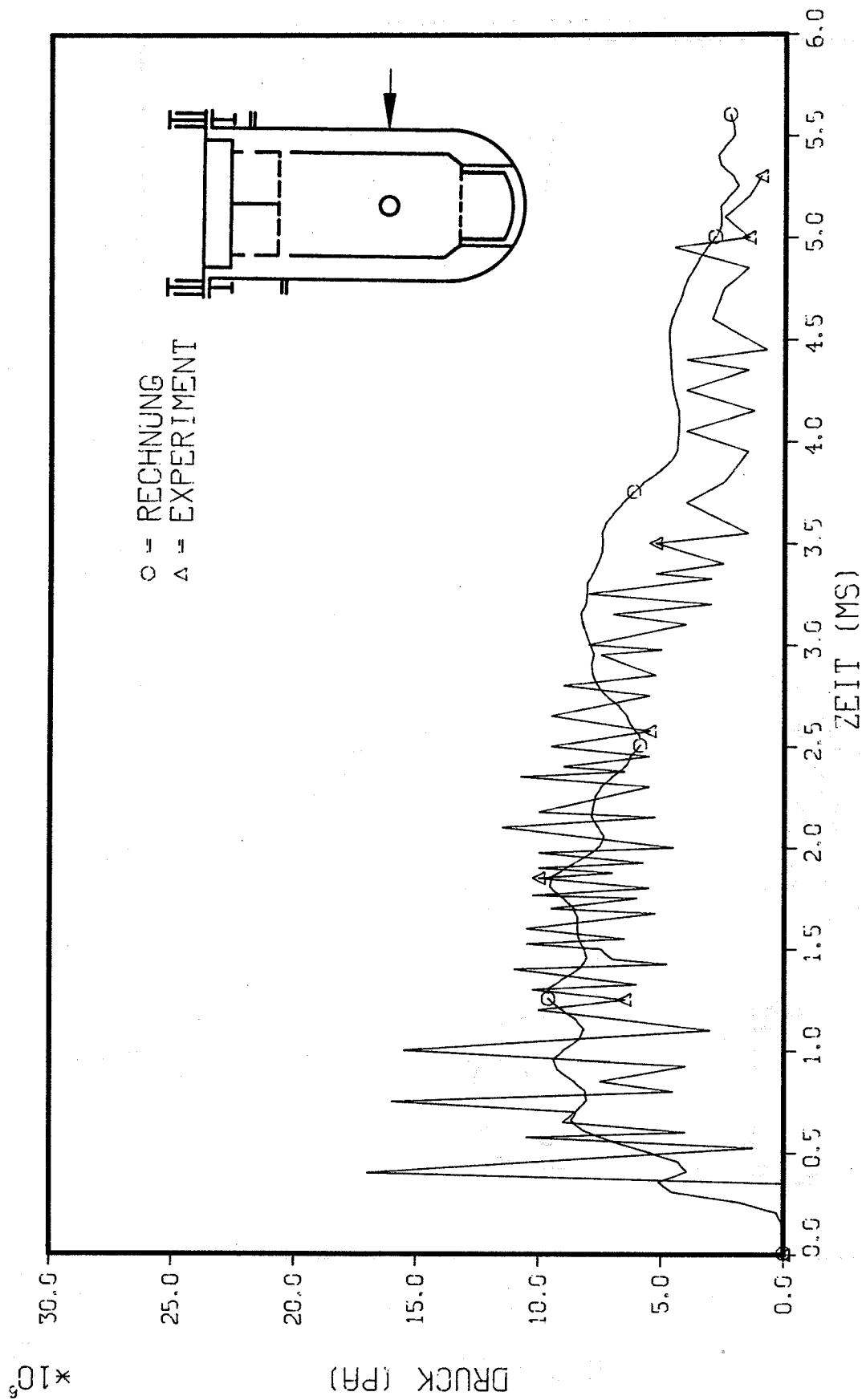


Bild 13:
Druck auf Außentank, Ladungshöhe, Pos. 4

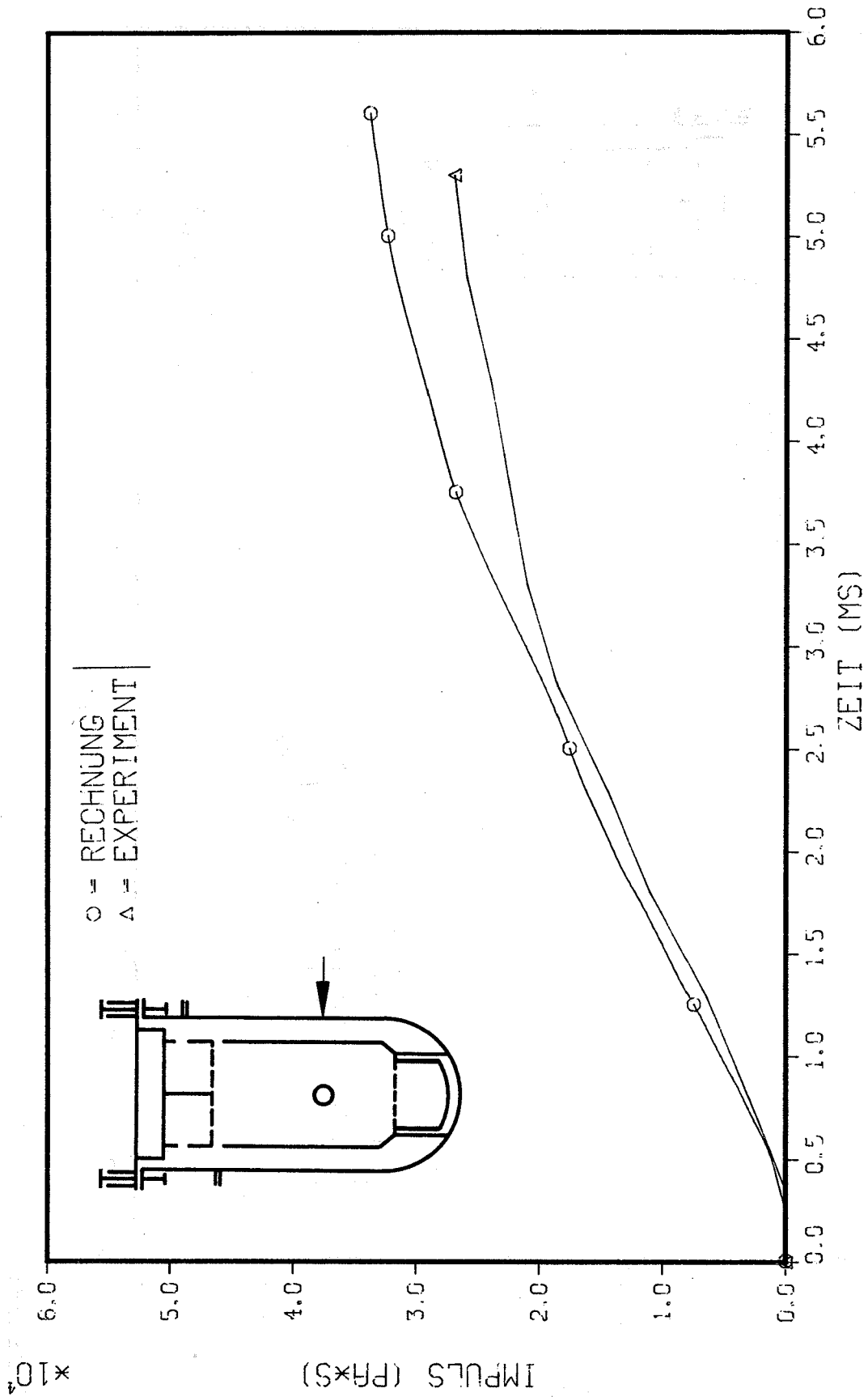


Bild 14:
Impuls auf Außentank, Ladungshöhe, Pos. 4

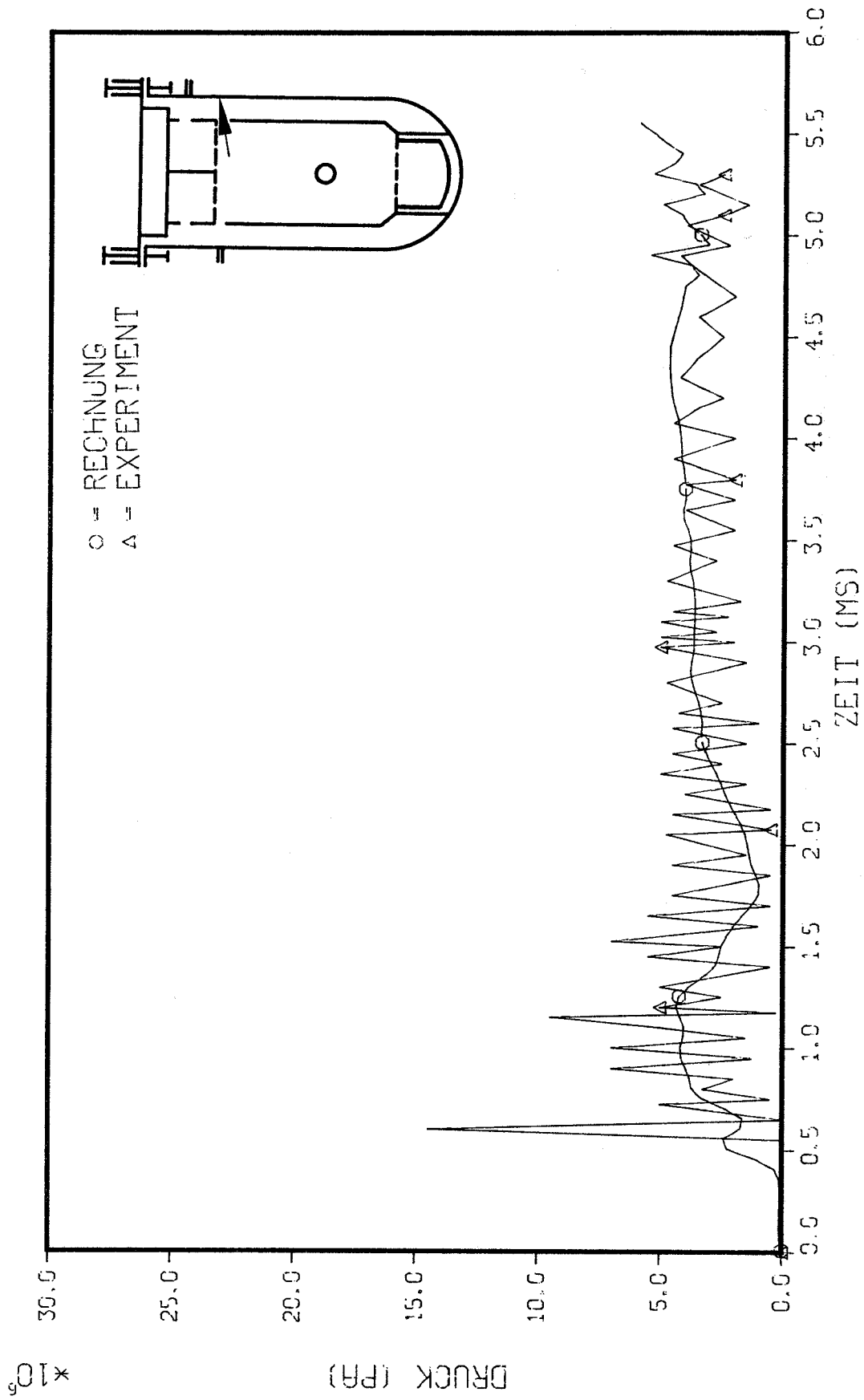


Bild 15:
Druck auf Außentank, Höhe Tauchplatte, Pos. 5

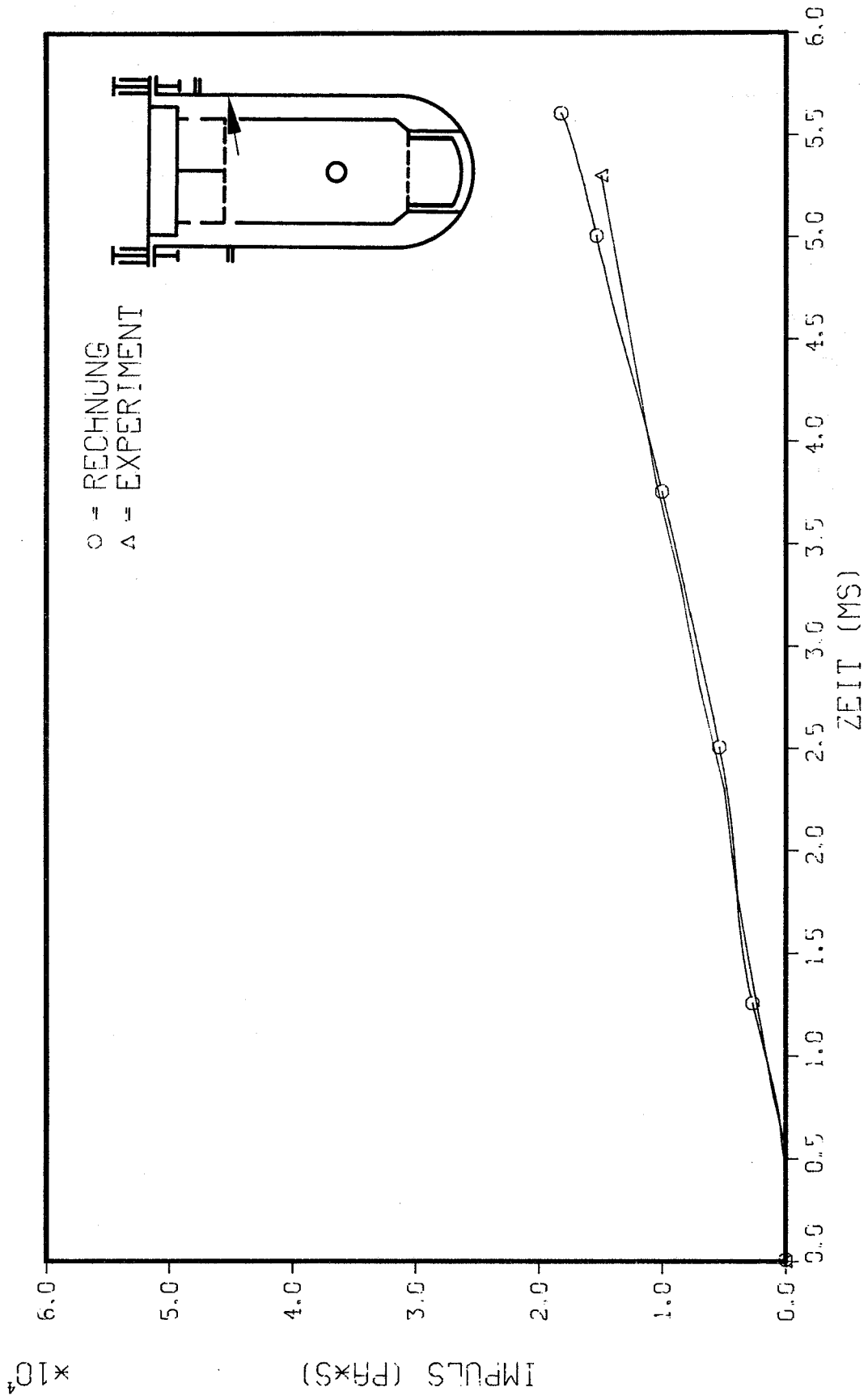


Bild 16:
Impuls auf Außentank, Höhe Tauchplatte, Pos. 5

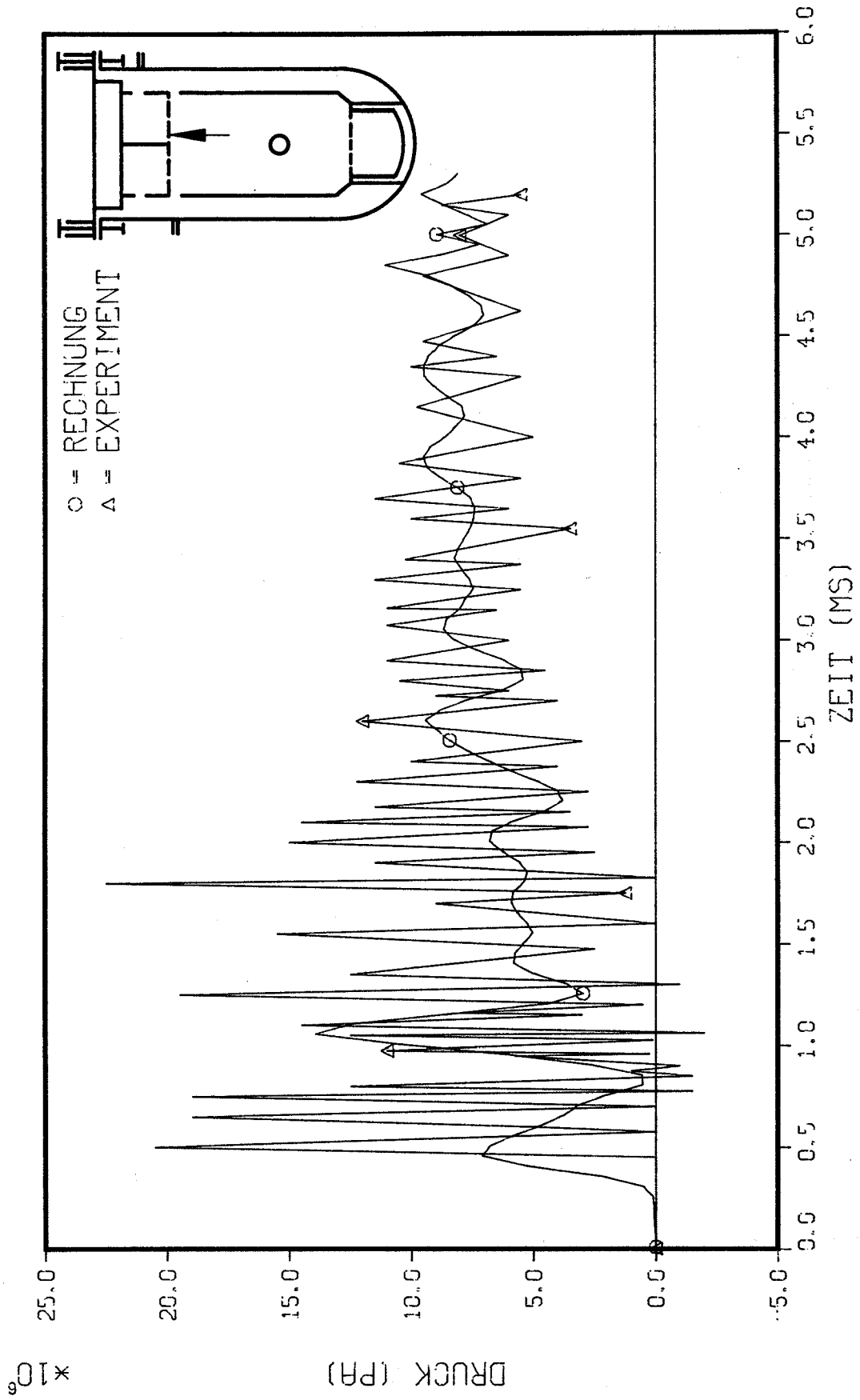


Bild 17:

Druck auf Tauchplatte, Unterseite, Pos. 6

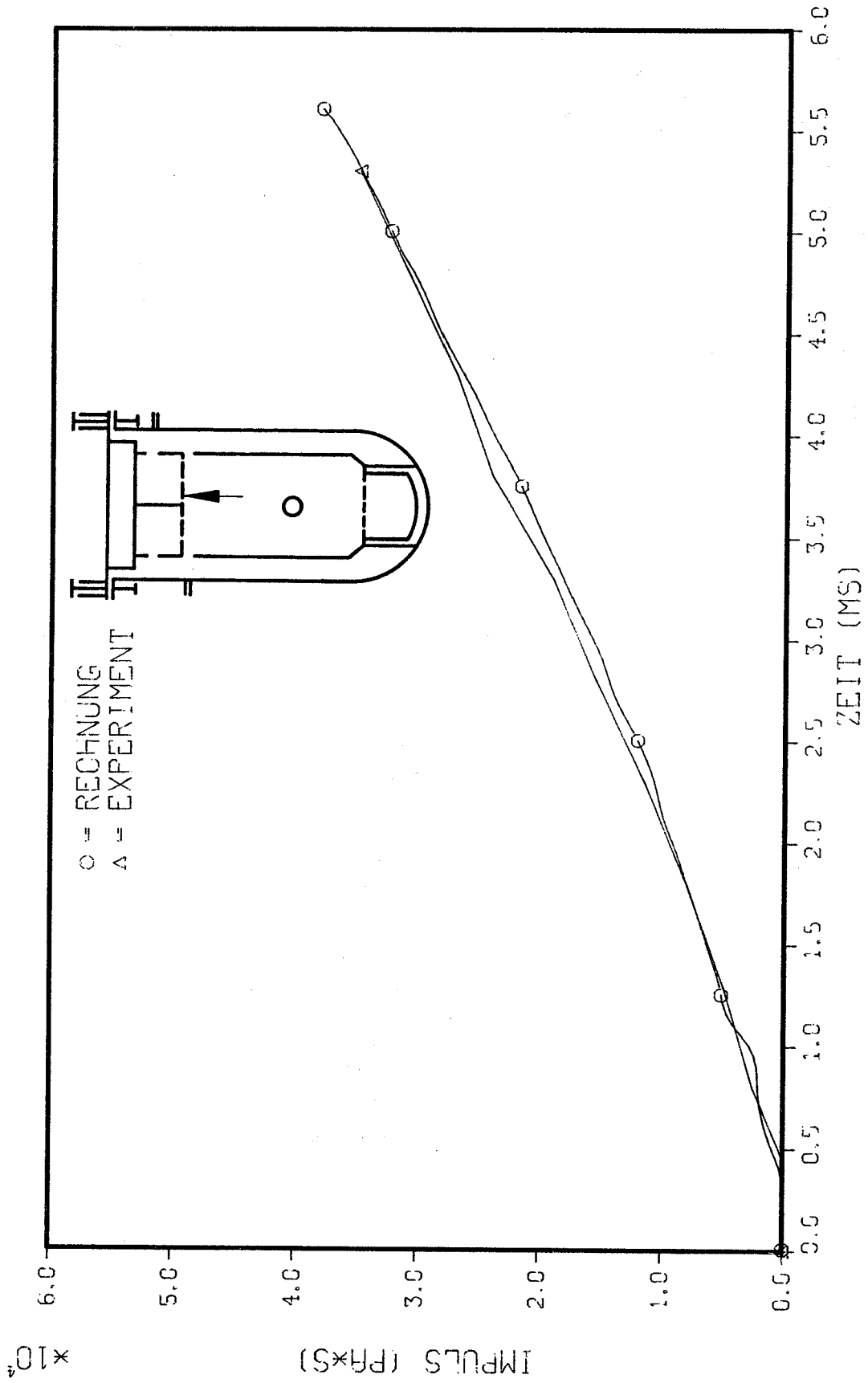


Bild 18:
Impuls auf Tauchplatte, Unterseite, Pos. 6

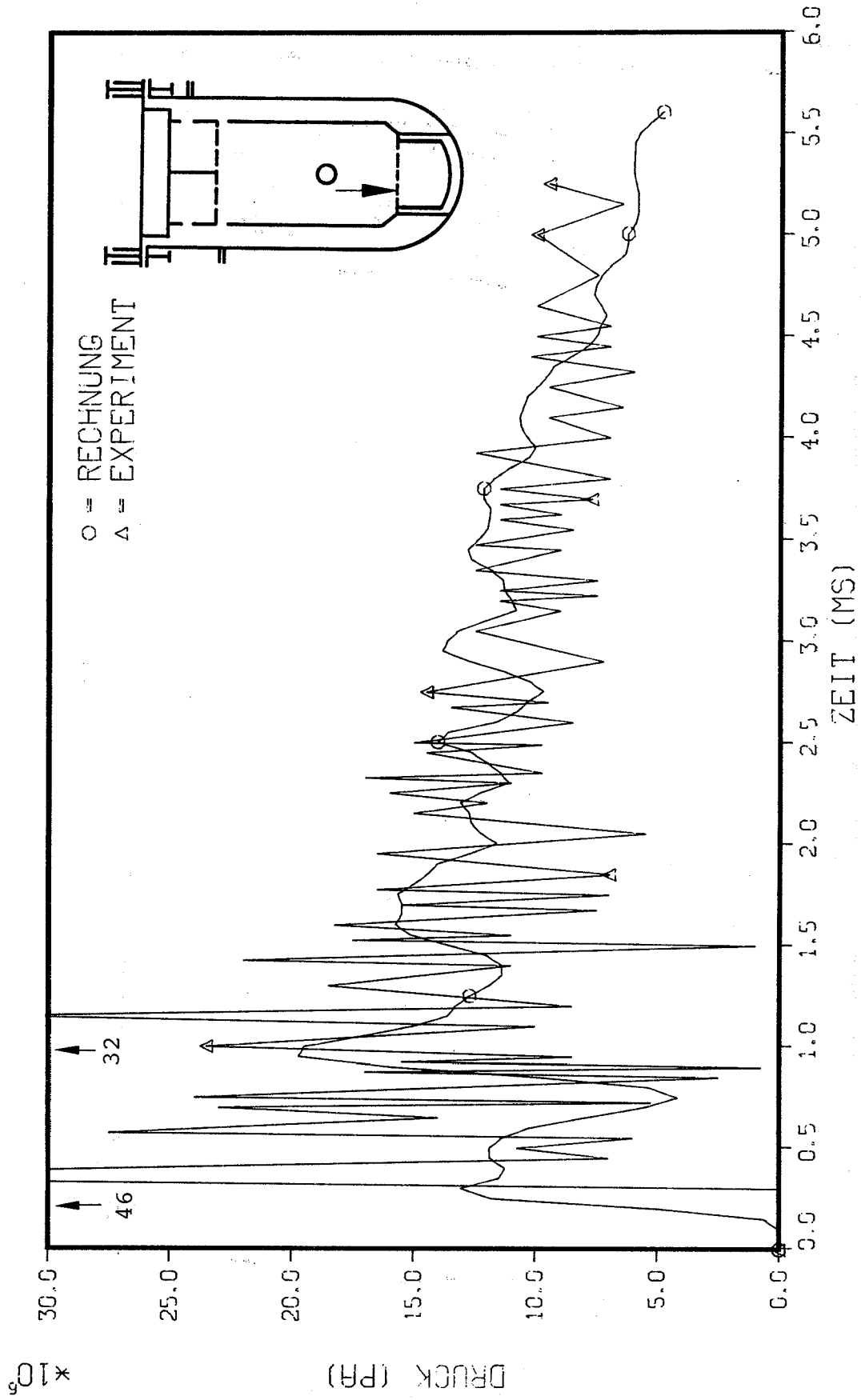


Bild 19:

Druck auf Gitterplatte, Pos. 7

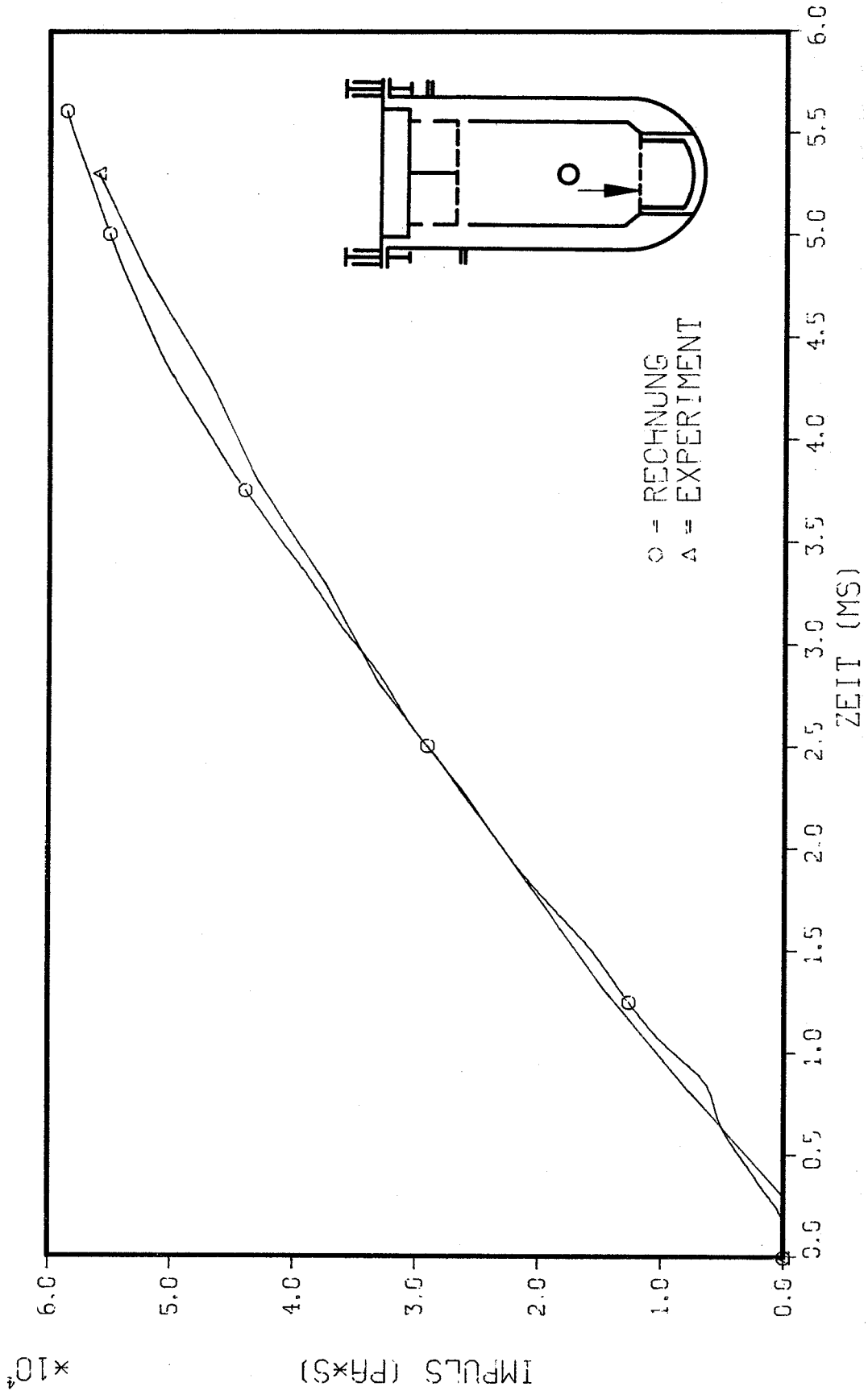


Bild 20:
Impuls auf Gitterplatte, Pos. 7

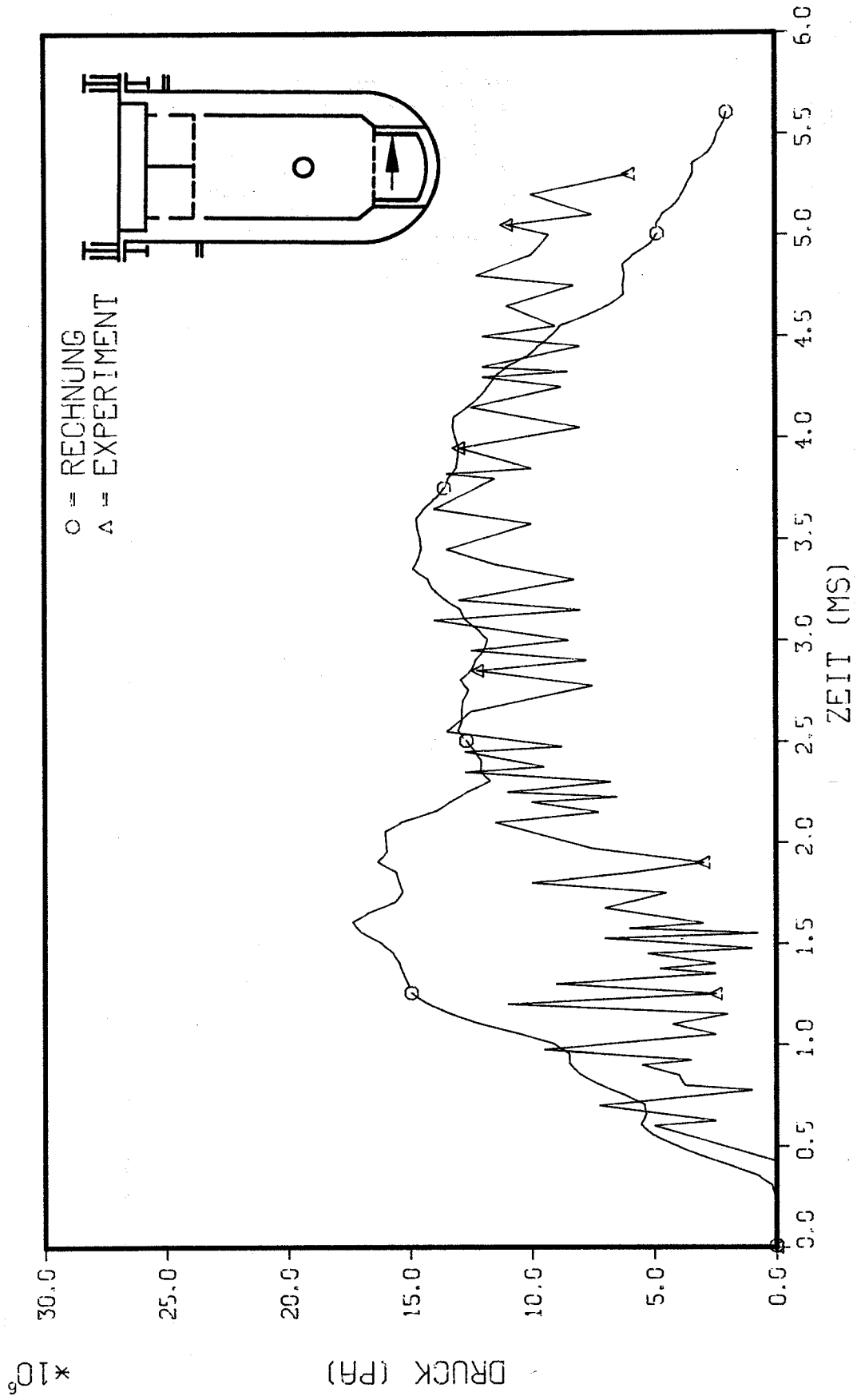


Bild 21:
Druck auf Einlaufplennum, Seite, Pos. 8

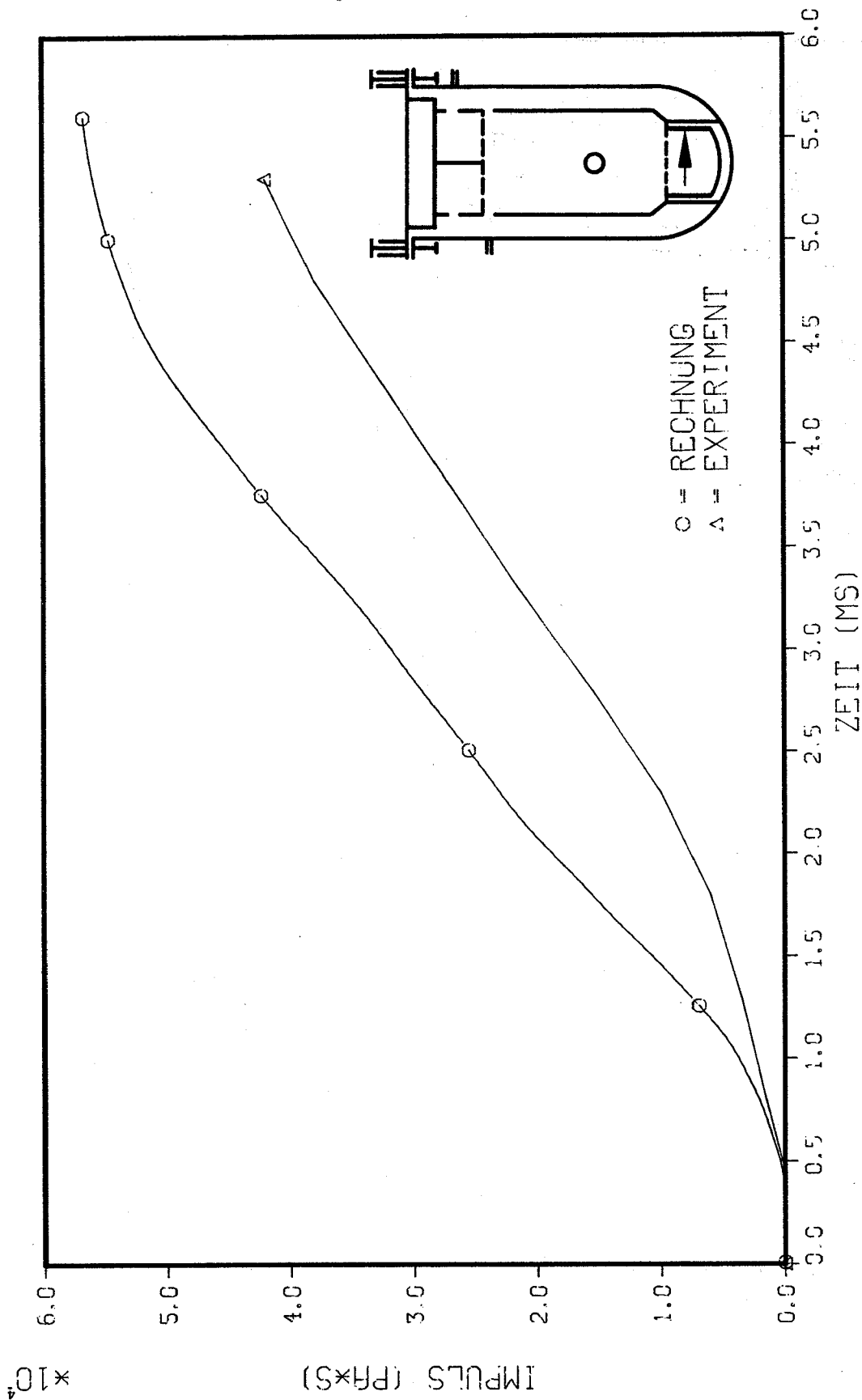


Bild 22:
Impuls im Einlaufplenum, Seite, Pos. 8

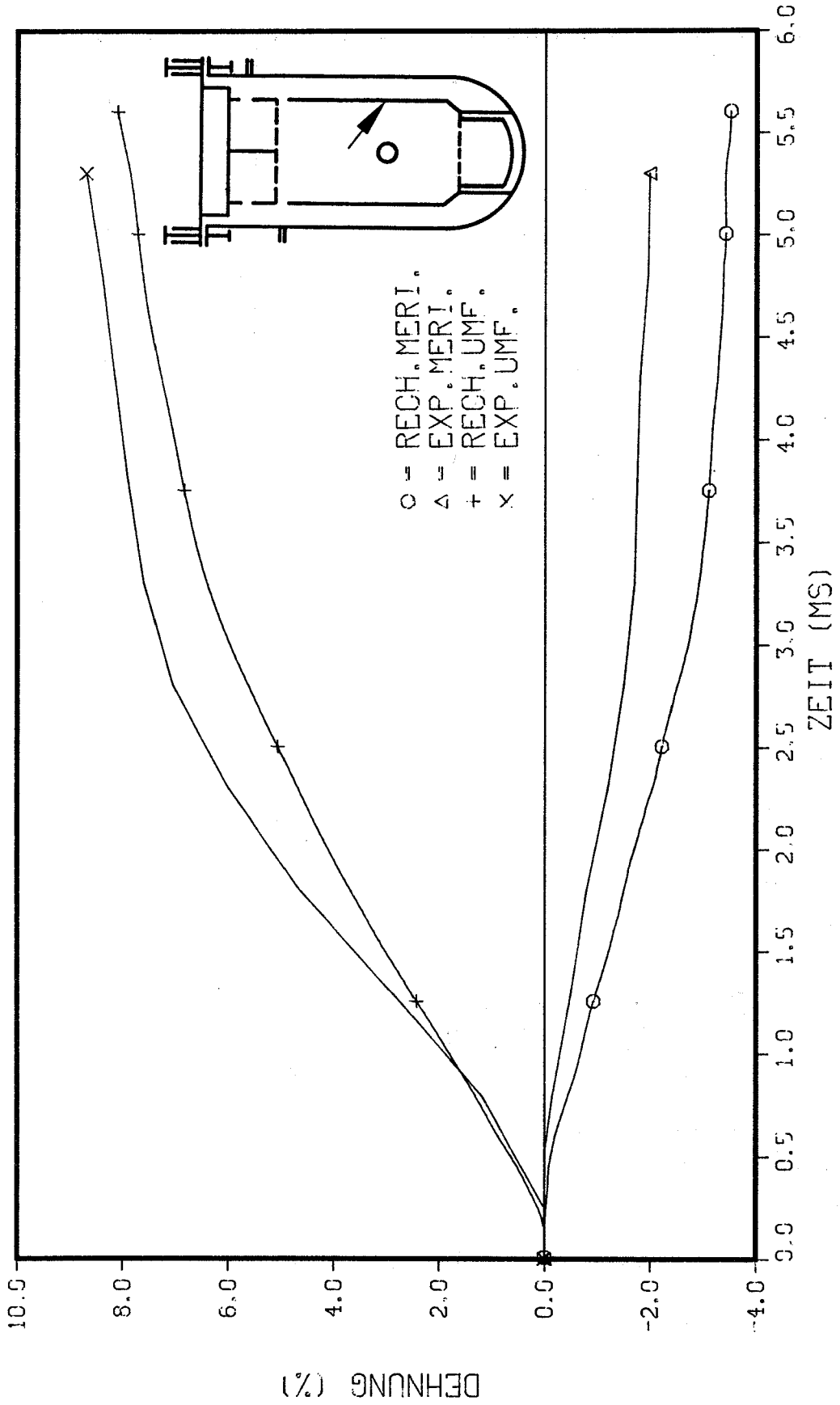


Bild 23:
Dehnung am Innentank, Ladungshöhe, Pos. 1

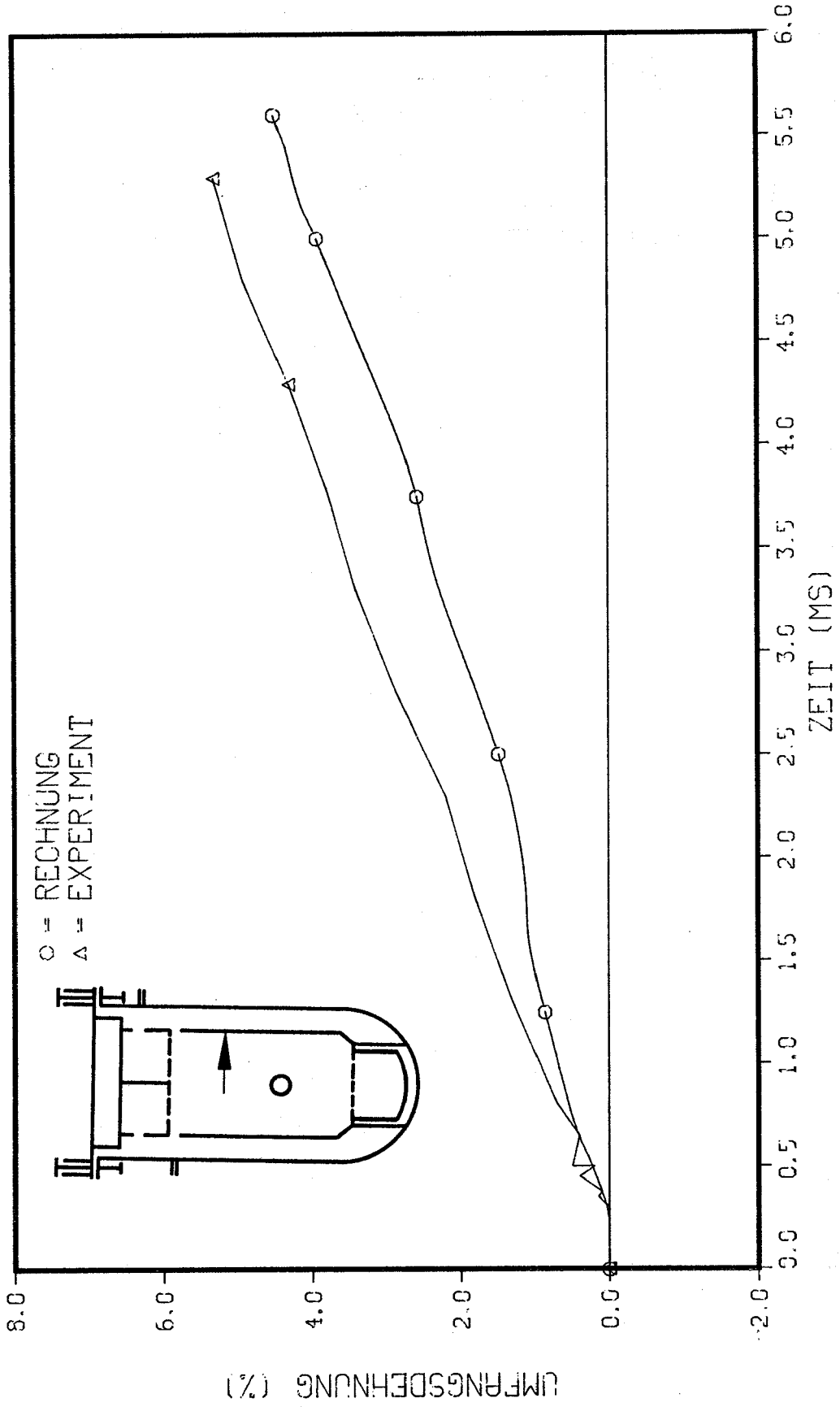


Bild 24:
Umfangsdehnung am Innentank, über Ladungshöhe, Pos. 3

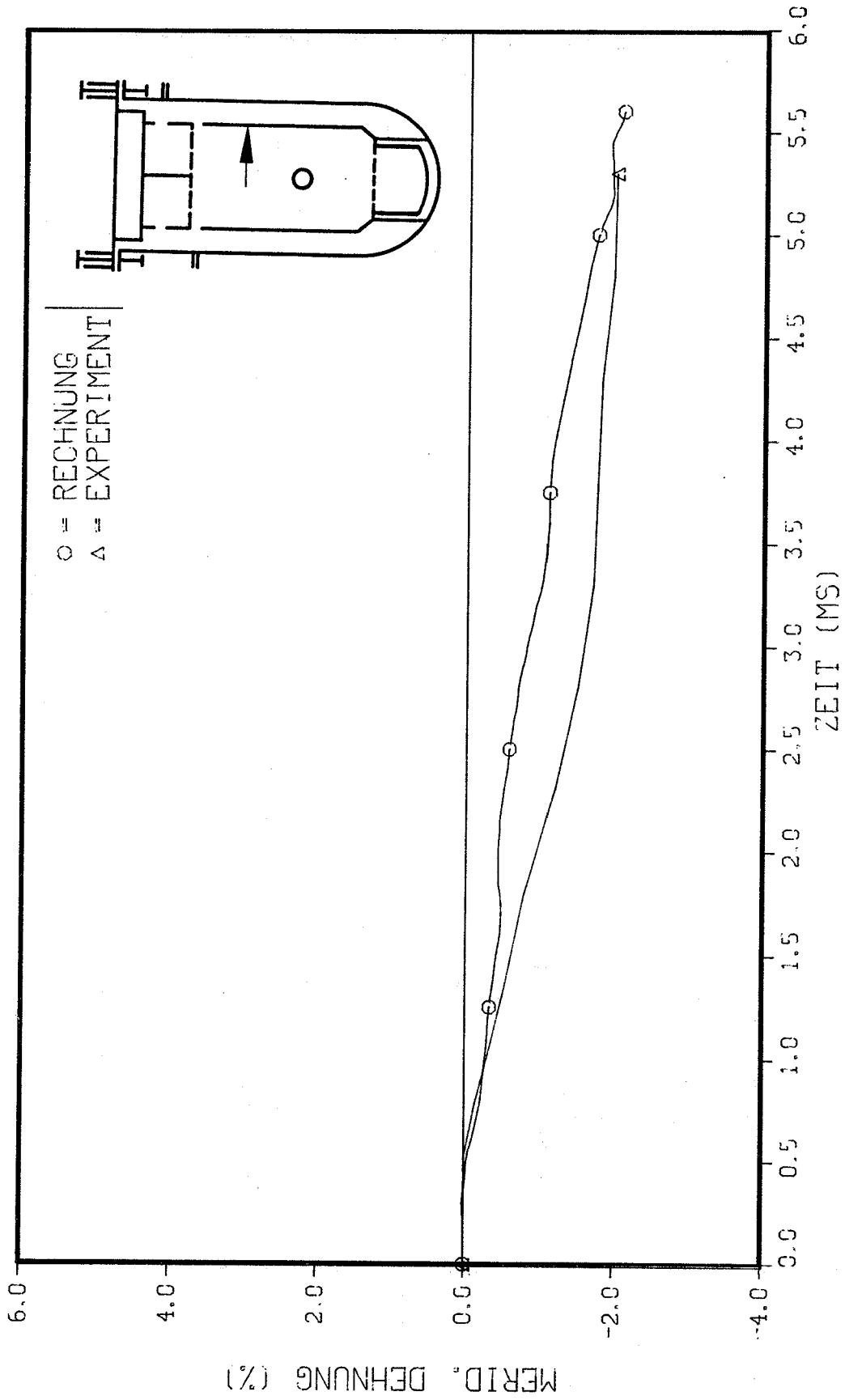


Bild 25:
Meridionale Dehnung am Innentank, über Ladungshöhe, Pos. 3

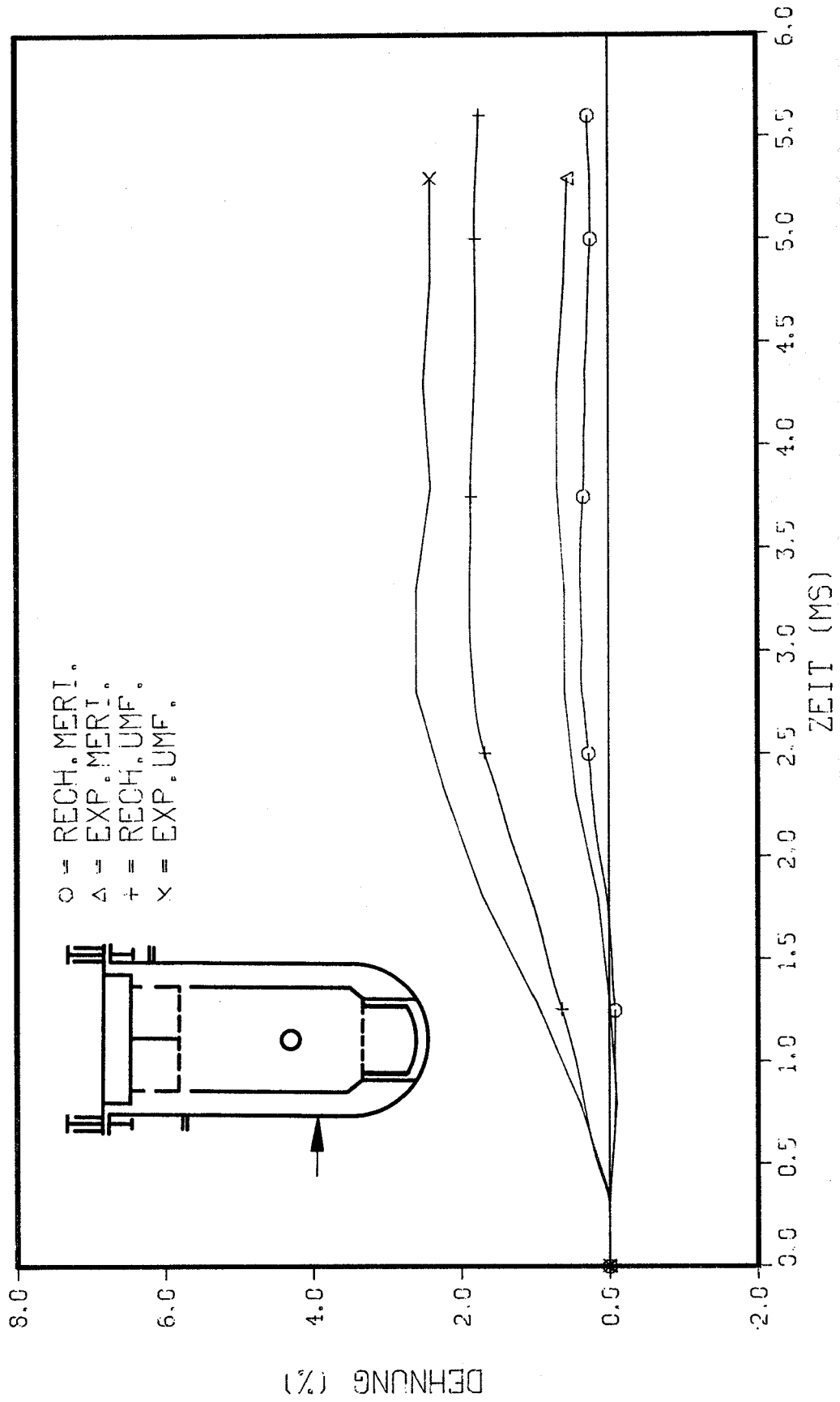


Bild 26:

Dehnung am Außentank, unter Ladungshöhe, Pos. 4A

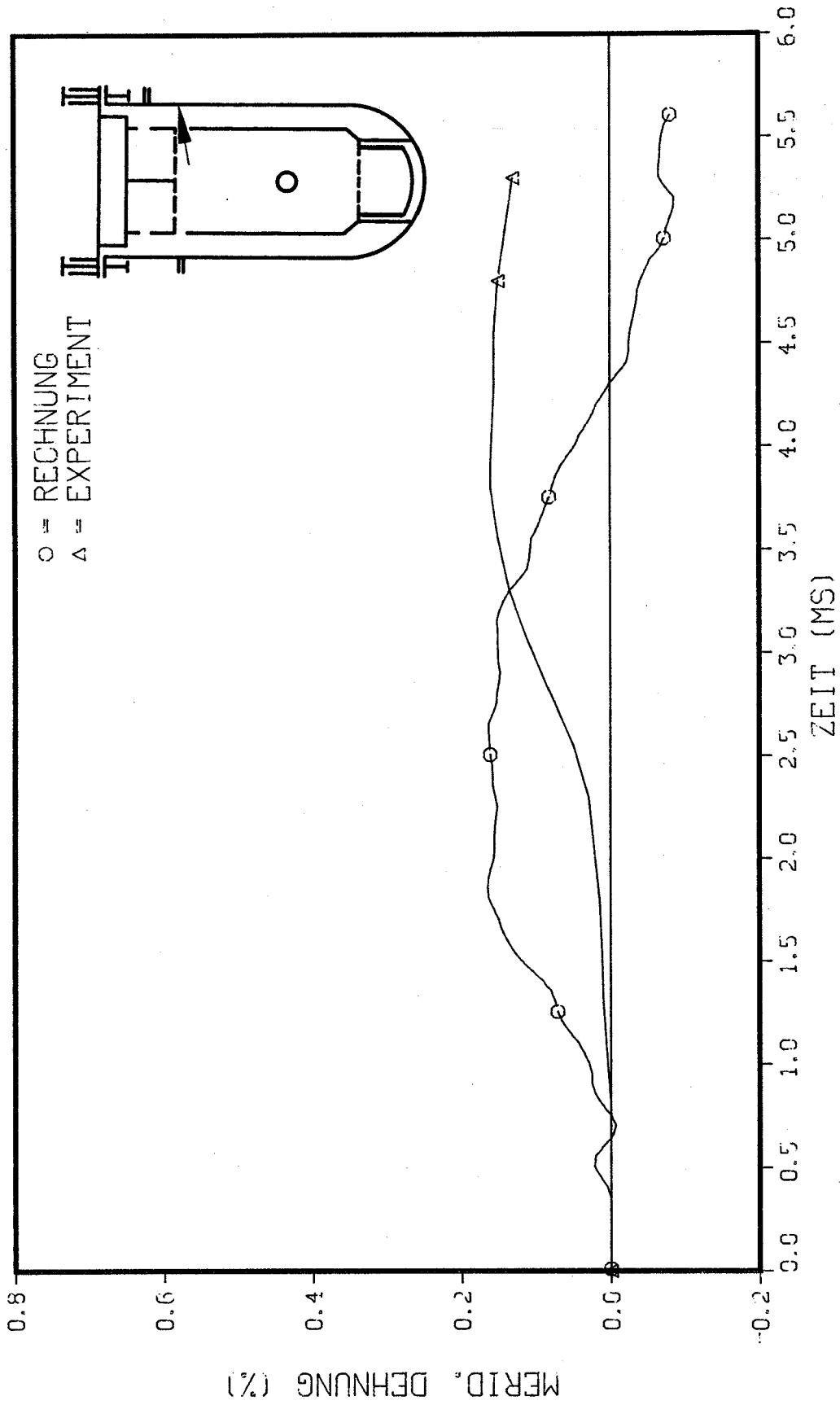


Bild 27:
Dehnung am Außentank, Höhe Tauchplatte, Pos. 5

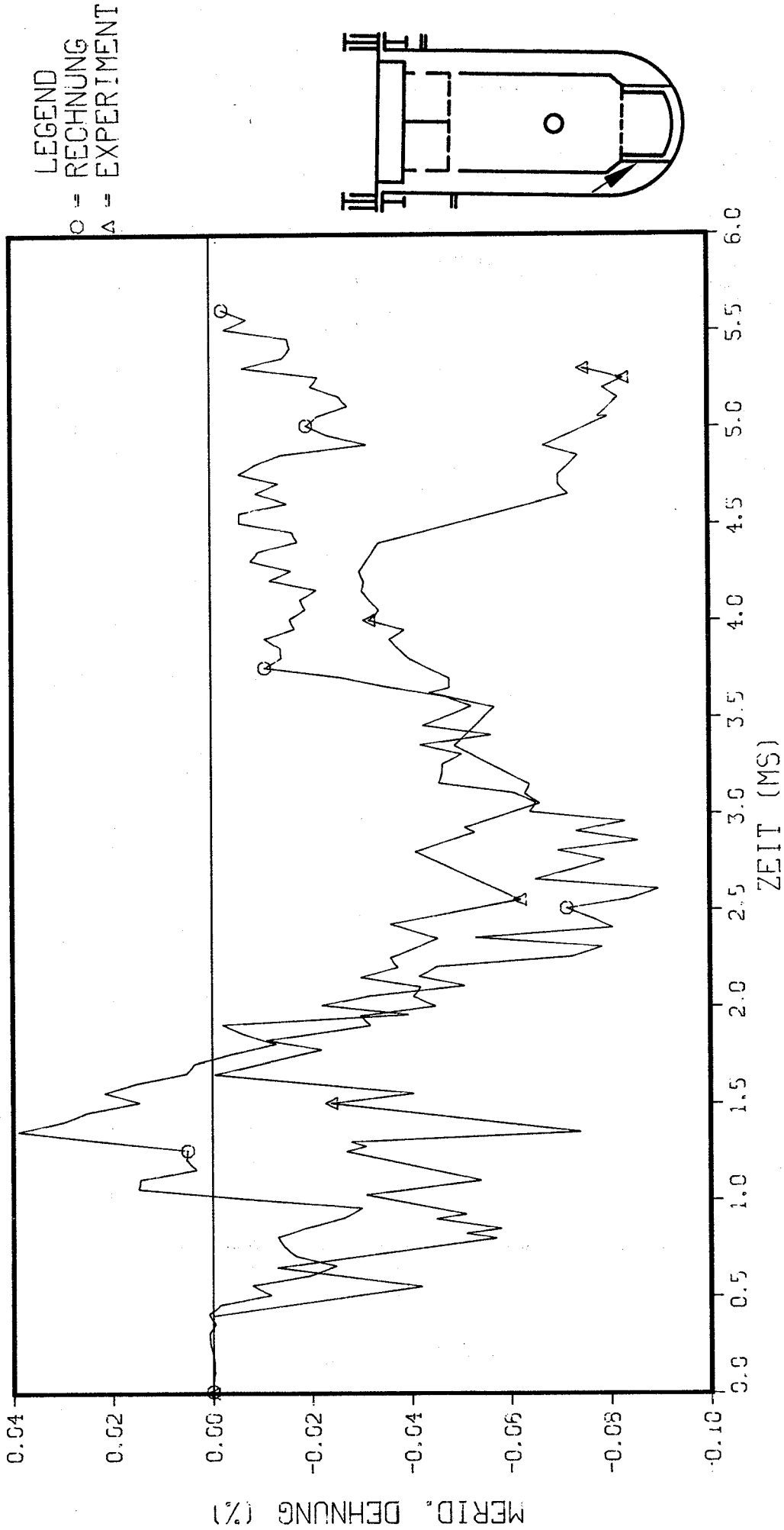


Bild 28:
Dehnung der Kernabstützung, Pos. 9

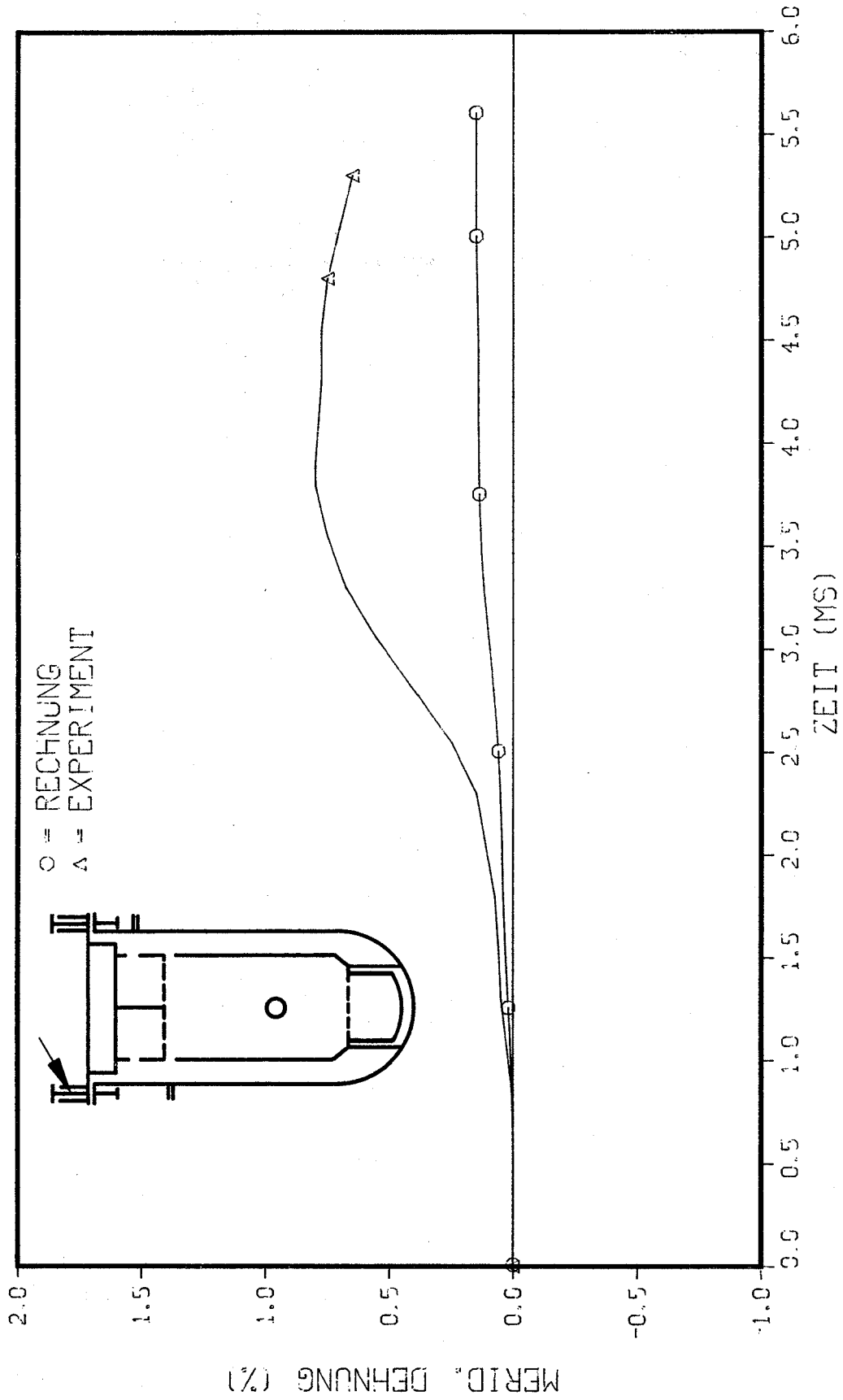


Bild 29:
Dehnung der Deckelbolzen, Pos. 10

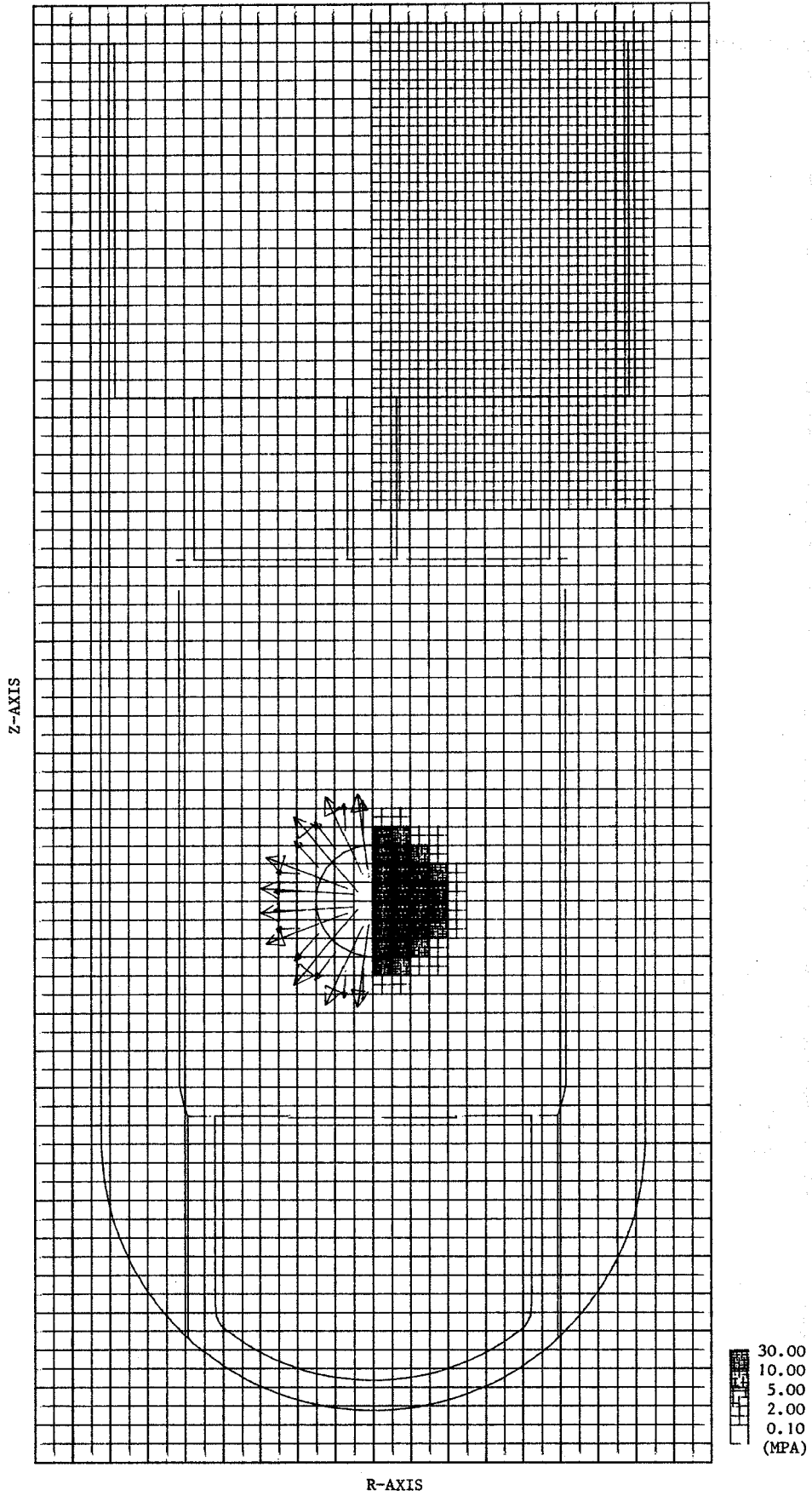


Bild 30:

Gitterplot der SEURBNUK-2-Rechnung zum 1/6-Modell
zur Zeit $T = 0$ ms

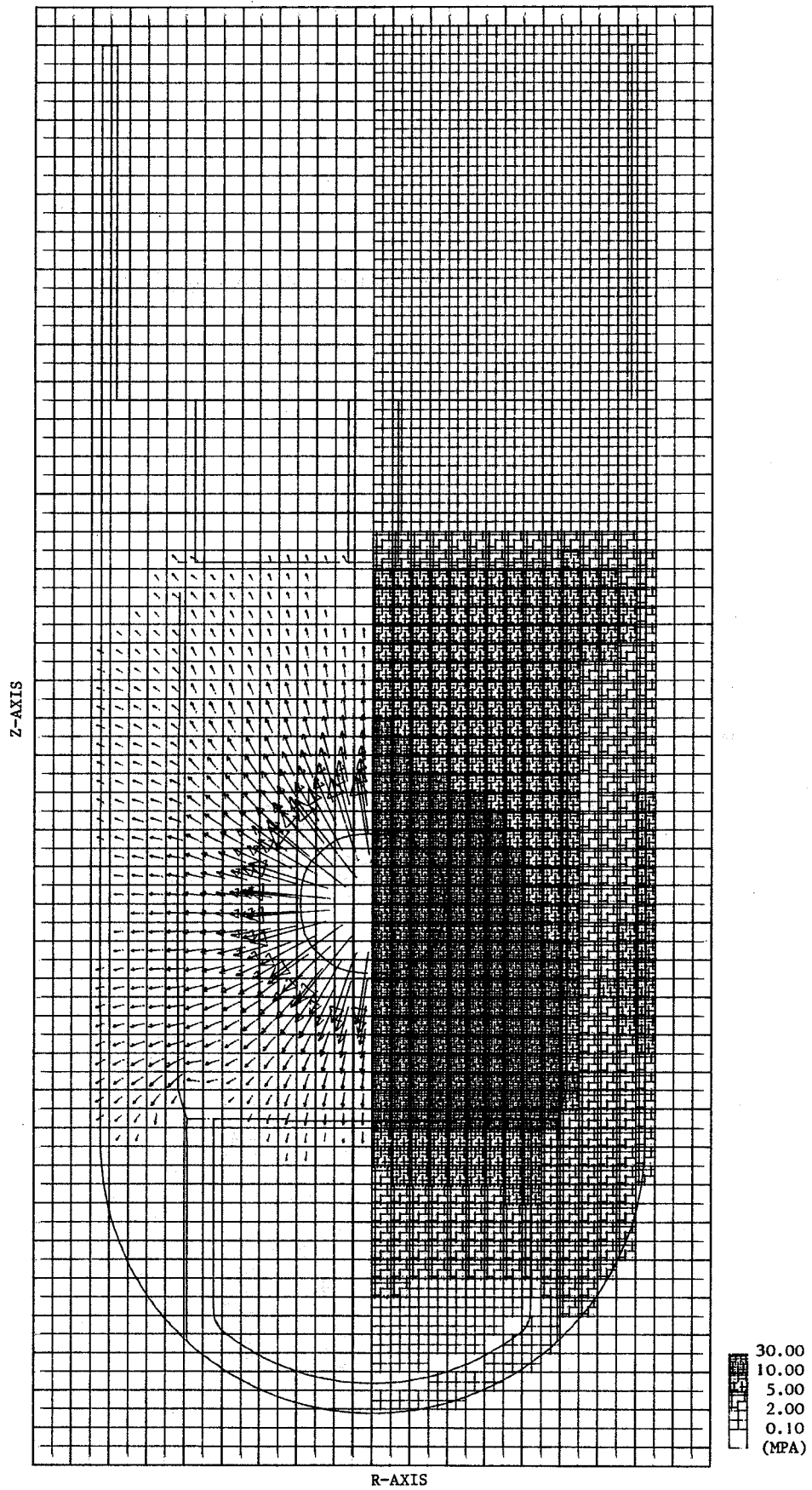


Bild 31:
Gitterplot der SEURBNUK-2-Rechnung zum 1/6-Modell
zur Zeit $T = 1 \text{ ms}$

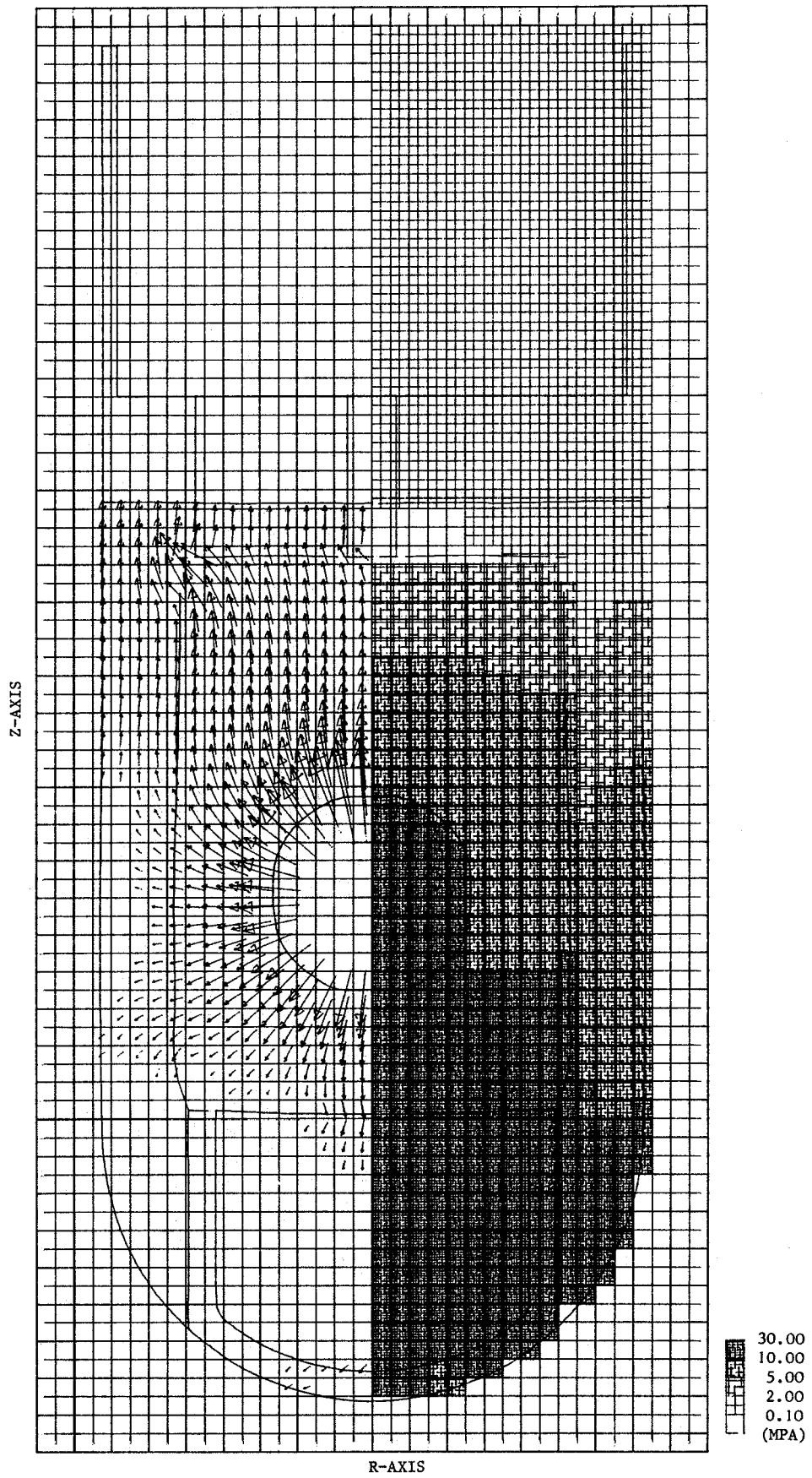


Bild 32:
Gitterplot der SEURBNUK-2-Rechnung zum 1/6-Modell
zur Zeit $T = 2$ ms

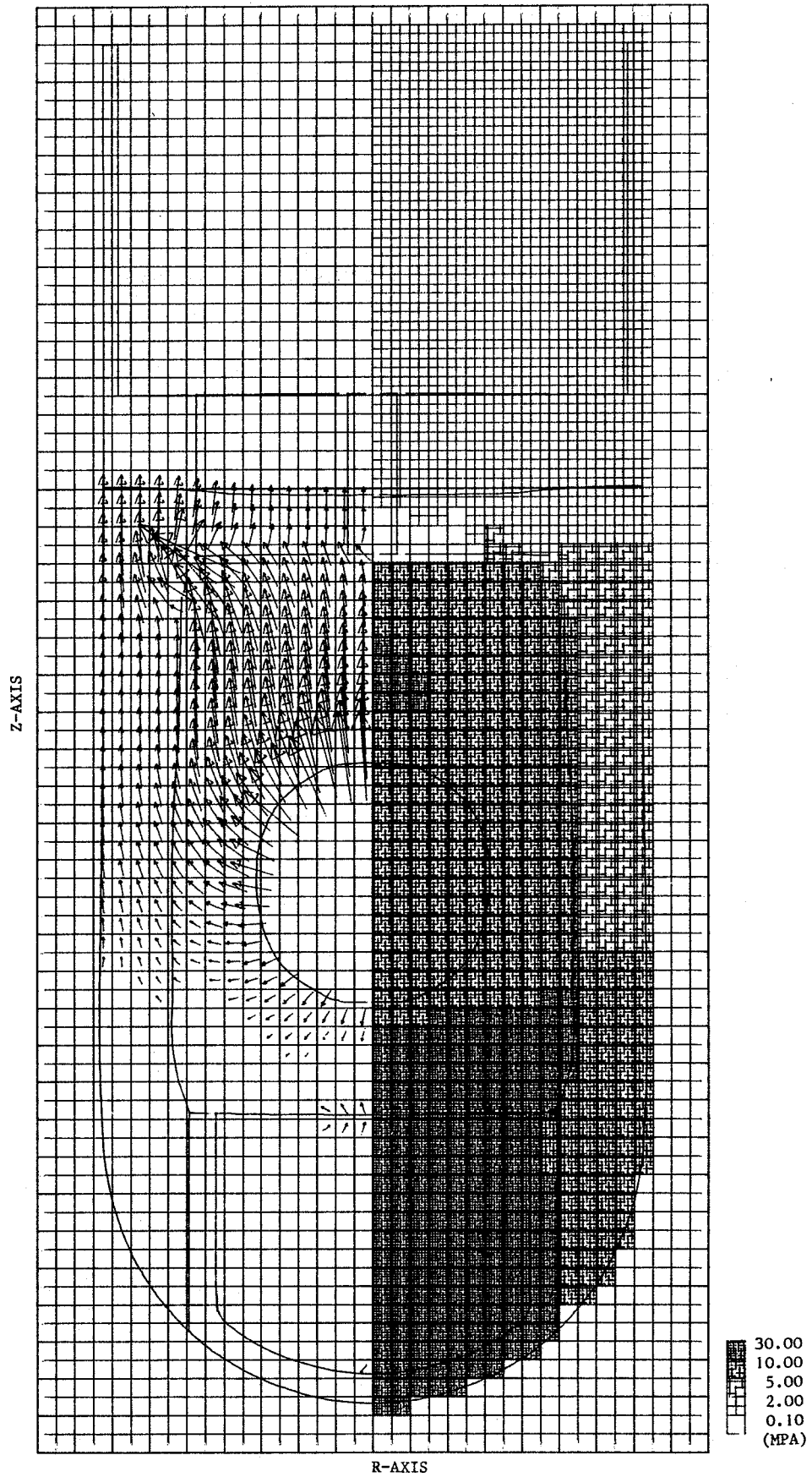


Bild 33:

Gitterplot der SEURBNUK-2-Rechnung zum 1/6-Modell
zur Zeit $T = 3$ ms

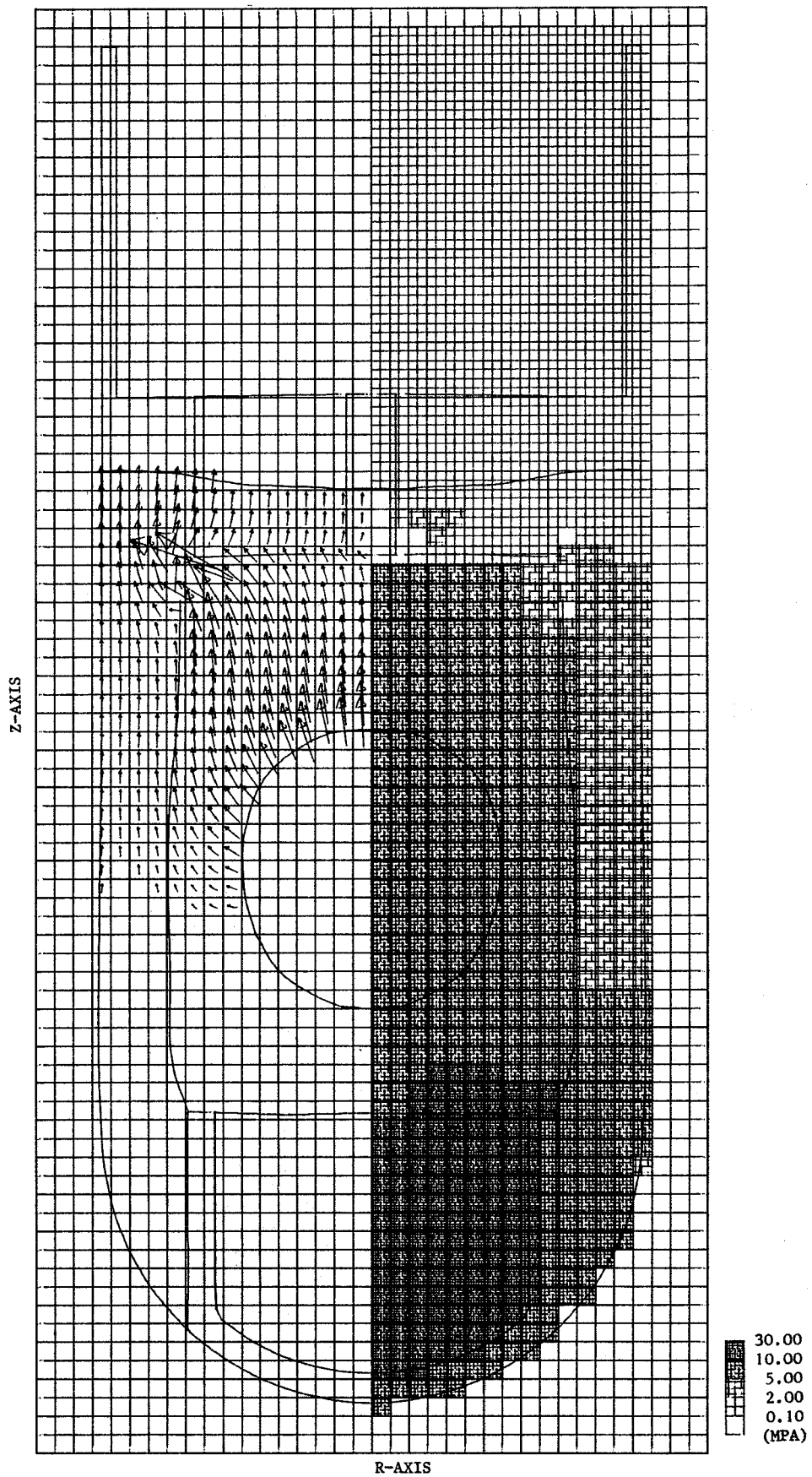


Bild 34:
Gitterplöt der SEURBNUK-2-Rechnung zum 1/6-Modell
zur Zeit $T = 4$ ms

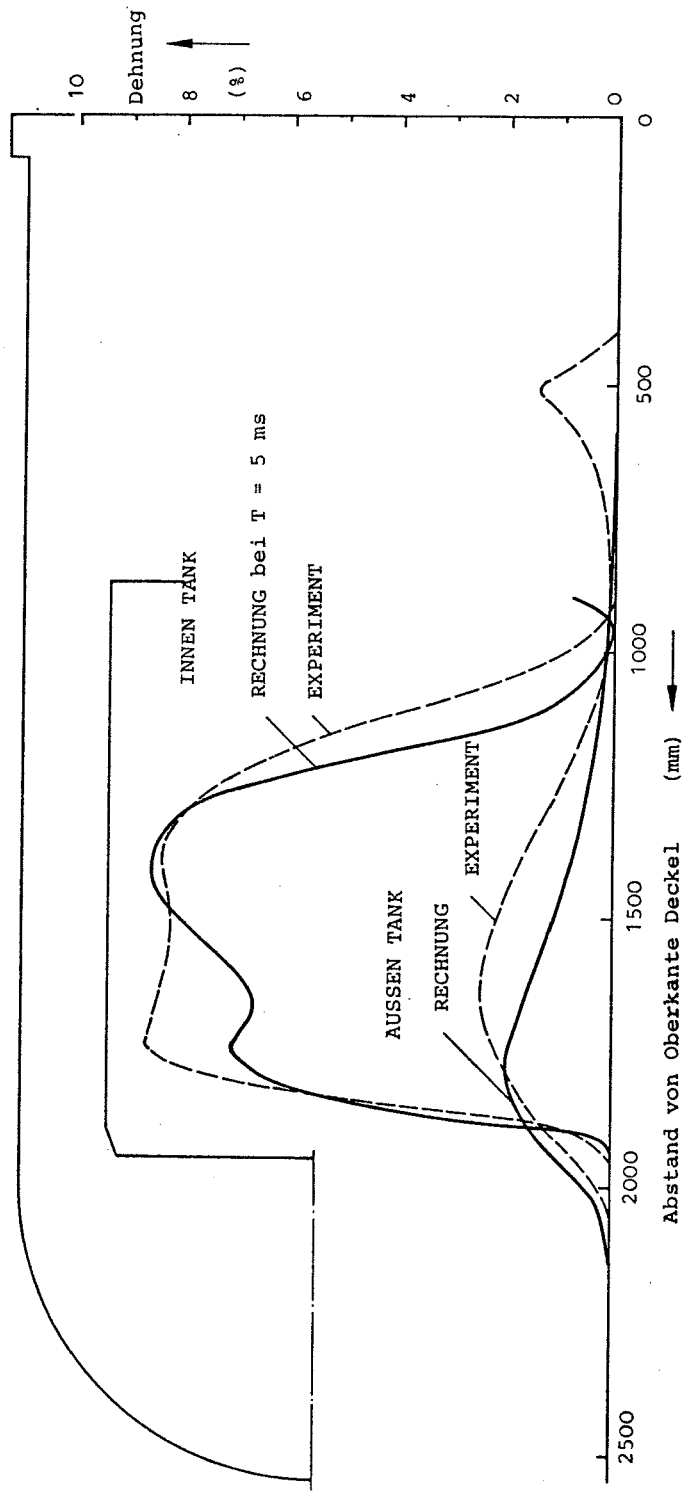


Bild 35:

Umfangsdehnung am Innen- und Auentank zur Zeit $T = 5$ ms

