

**A NOVEL TECHNIQUE FOR CALCULATING FLUIDDYNAMIC
PHENOMENA WITH RESPECT TO STRUCTURAL FEEDBACK**
**(EIN NEUES VERFAHREN ZUR BERECHNUNG DRUCKERREGTER
SCHWINGUNGEN UNTER BERÜCKSICHTIGUNG DER
GEGENSEITIGEN BEEINFLUSSUNG VON STRUKTUR UND FLUID)**

T. GRILLENBERGER, B. OESTERLE

Gesellschaft für Reaktorsicherheit, Forschungsgelände, D-8046 Garching, Germany

SUMMARY

The investigation of strongly transient fluid dynamic phenomena requires a consideration of flexible walls. This occurs particularly in nuclear power plant safety problems, e.g. in the field of blow-down simulations. The reasons for considering flexible walls are:

- Very high pressure loads may appear. The related structural displacements have the order of magnitude of the fluid compressibility and therefore influence the fluid variables.
- The frequency of the pressure loads may lie in the range of the structural eigenfrequencies.

Neglecting the first fact would lead to conservative results. The second fact, however, reflects the influence of the structure dynamics and the necessity of a particular investigation becomes evident.

For the solution of the problems outlined above a method is proposed which uses two separate codes, one for the structure and one for the fluid. Thus, the advantages of both methods, which may base on completely different methods, can be inserted into the calculation. On the one hand a finite element structural code is used, on the other hand a one-dimensional flow model (including pressure wave and thermodynamic non-equilibrium effects) is utilized, which is also applicable for a calculation of two- and three-dimensional fluid problems by introducing a mesh of one-dimensional fluid channels.

The fluiddynamic part of the realized code consists mainly of the code DAPSY, which is a further development of the code BLAST. The setting up of the partial differential equations is performed in Eulerian coordinates and the integration is accomplished by the method of characteristics.

The structure dynamics part consists of a finite element code, which has to be able to calculate time varying pressure load, momentum and wall friction forces. Up to now, only few commercial finite element codes compute time varying pressure loads, but there are no great difficulties to establish this possibility additionally. For our first calculation we used own developments and the structure codes SAPIV and ASKA to deliver the structure system matrices. To assure a simultaneous existence of the fluid and structure equations, it is necessary to introduce a coupling part, which organizes the data exchange. The data which have to be exchanged in an iterative manner are:

- pressure differences, momentum and wall friction from fluid to structure,
- displacements and their first derivative in time from structure to fluid.

With the above mentioned method the following problems have been calculated:

- comparative calculation to the reactor safety experiment RS16,
- Calculation of an idealized BWR pipe after blow-down,
- comparative calculation to the BASF burst test.

The results of these calculations show a remarkably better agreement with the test results than the calculations with rigid wall assumptions. Additionally it could be demonstrated that a flexible structure may generate an increase of the pressure load and structural stresses.

1. Einführung in die Problemstellung

Bei der festigkeitsmäßigen Berechnung von Strukturen, die als Folge fluiddynamischer Vorgänge belastet werden, wurde bisher meistens folgende Vorgehensweise praktiziert:

Die Druck- und Geschwindigkeitsverläufe im Fluid werden als Folge des aktuellen Strömungsproblems und unter der Annahme starrer, das Fluid begrenzender Wandungen berechnet. Mit diesen fluiddynamischen Daten ist die Belastung der Struktur gegeben und es kann eine dynamische Festigkeitsrechnung folgen.

Diese Berechnungsart ist nur dann gerechtfertigt, wenn die Strukturverformungen sehr klein sind, entweder weil die Struktur sehr steif, oder weil die Störung sehr klein ist.

Bei der Untersuchung des Einflusses stark transients fluiddynamischer Vorgänge auf die Struktur, wie sie z.B. in der Kernkraftwerk-Sicherheitstechnik bei der Simulation von Kühlmittelverlust-Störfällen vorkommen, muß man zur möglichst realistischen Berechnung von der Annahme starrer Wandungen bei der Bestimmung der Anregung abgehen.

Bei der Berücksichtigung flexibler Wandungen sind Ergebnisse zwischen zwei Extrema zu erwarten:

- Nachgebende Wandungen bauen die Druckspitzen ab und führen daher zu einer geringeren Strukturbeanspruchung als bei einer Berechnung mit starren Wänden.
- Die Frequenz der Druckbelastung liegt in der Nähe der Eigenfrequenzen des schwingungsfähigen Struktur-Fluid-Systems und es kann damit eine Aufschaukelung von Druckbelastung und Strukturverformung erfolgen.

Im ersten Fall dient eine Berechnung mit Berücksichtigung des Einflusses der Struktur auf die Druckanregung dem Abbau von unnötigen Konservatismen und damit zu einer kostengünstigeren Dimensionierung.

Im zweiten Fall dient die Koppelung von Struktur- und Fluiddynamik einer verbesserten Dimensionierung zur Verhinderung des Strukturversagens infolge zu gering eingeschätzter Belastungen.

Zur Berechnung derartiger Probleme wird eine Methode vorgeschlagen, die auf zwei getrennten Rechenprogrammen der Struktur- und Fluiddynamik aufbaut, die in geeigneter Weise gekoppelt werden.

2. Realisierung der Berechnung

Auf der Strukturseite wird die Verwendung eines Finite-Elemente-Codes und auf der Fluidseite ein eindimensionales Strömungsmodell vorgeschlagen, wobei letzteres zur Berechnung räumlicher Probleme zu einem dreidimensionalen Netzwerk verknüpft werden kann.

In den durchgeführten Berechnungen besteht der thermo- und fluiddynamische Teil bis auf kleine Modifikationen und Erweiterungen aus dem Programm DAPSY /1/. Dieses Rechenmodell für die Simulation von Druckwellenausbreitungsvorgängen und stark instationären Strömungsvorgängen in beliebigen, relativ komplizierten Geometrien wurde aus dem eindimensionalen Modell für

Ein- und Zweiphasenströmungen von Wasser, BLAST, entwickelt /2/. DAPSY geht aus vom partiellen Differentialgleichungssystem, das sich aus Massen-, Impuls- und Energiebilanz an einem Strömungskanalschnitt ableitet. Die Abweichung vom thermodynamischen Gleichgewicht wird durch eine Aufteilung der Massenbilanz in Wasser- und Dampfphase und durch eine Näherung für die Massenübergangsrate erfaßt. Die Integration erfolgt nach einem expliziten Charakteristikenverfahren in einem ortsfesten Diskretisierungsgitter. Die Kopplung mit der Strukturmechanik erfolgt über die Berücksichtigung des Einflusses des variablen Strömungsquerschnittes.

Der strukturdynamische Teil besteht aus einem Finite-Elemente-Programm, das in der Lage ist, zeitlich veränderliche Druck-, Impuls- und Reibungskräfte zu verarbeiten, da diese Größen von der Fluidseite als Störung der Struktur wirken. Für die ersten Berechnungen wurden zum Teil Eigenentwicklungen /3/, zum Teil die Strukturmatrizen aus SAP IV bzw. ASKA herangezogen. Die Integration der Strukturgleichungen erfolgte nach Methoden der "Time History Analysis" /4/ bzw. der "Time History Modal Analysis", da die bisher berechneten Probleme relativ klein waren und diese Verfahren sehr schnell und sehr genau sind.

Zur Gewährleistung einer echten Koppelung der Gleichungssysteme für die Struktur und das Fluid ist zusätzlich ein Koppelungsteil notwendig, der den Datenfluß zwischen beiden Programmteilen organisiert. Die auszutauschenden Daten sind

- Druckdifferenzen und Impulskräfte (ev. Reibungskräfte) von Fluidmechanik an Strukturmechanik,
- Verformungen und damit Querschnittsänderungen von Strukturmechanik zu Fluidmechanik.

Bei der Integration muß für jeden Zeitschritt ein iteratives Durchlaufen beider Teilsysteme stattfinden. Die Strukturverschiebungen des zu berechnenden Zeitpunktes werden geschätzt, worauf das Fluidprogramm die Fluidzustände des zu errechnenden Zeitpunktes bestimmt. Damit erfolgt eine Berechnung der Strukturzustände, die mit der Schätzung verglichen wird. Liegen die Abweichungen innerhalb einer vorgegebenen Schranke, wird der nächste Schritt berechnet.

3. Rechenbeispiele

Mit der geschilderten Methode wurden bisher folgende Fälle berechnet:

3.1 Vergleichsrechnungen zum Reaktorsicherheitsvorhaben RS 16 /5/

Für die ersten Testrechnungen wurde die Geometrie der DWR-Versuche des Vorhabens RS 16/2 nachgebildet (Abb. 1). In dem Behälter befinden sich zu Beginn $5,6 \text{ m}^3$ Wasser von 291°C und 140 bar in Ruhe. Nach Bruch einer Berstscheibe (angenommen innerhalb 3 msec) sinkt der Druck in ca. 50 msec auf den Sättigungswert. In dieser Phase treten starke Druckwelleneffekte auf. Die gekoppelte Fluid-Strukturdynamik wird für den Kernbehälter berechnet.

Für den Versuch DWR-5 wurde eine erste Vergleichsrechnung durchgeführt. Zur Beurteilung der Auswirkungen der Strukturdynamik auf das Verhalten des Fluids wurde noch ein Referenzfall, in dem starre Struktur angenommen wird, mit dem Programm DAPSY gerechnet. In den folgenden Bildern ist stets zur Meßkurve der starre Fall und der Fall mit elastischen Einbauten eingetragen. Der Verlauf des Druckes im Behälter direkt am Ausströmstutzen (Punkt 94) zeigt deutlich eine Verbesserung des Ergebnisses bei gekoppelter Berechnung. Im Innenraum des Kernbehälters (Punkt 89) ist eine Druckabsenkung aufgrund der Strukturauflagerung zu erkennen, bevor die Druckabsenkungswelle im Fluid bis zu der Stelle vorgedrungen ist. Im oberen Teil des Kernbehälters (Punkt 105) zeigt sich besonders, daß die Veränderung der Ausbreitungsgeschwindigkeit von Druckstörungen zu einem besseren Ergebnis führt. Es ergibt sich aus diesem Beispiel, daß durch die gekoppelte Analyse sowohl Amplituden als auch Laufzeiten von Druckwellen genauer simuliert werden.

3.2 Berechnung einer idealisierten Siedewasserreaktor-Speisewasserleitung

Der Bruch einer Speisewasserleitung vor dem Rückschlagventil wird angenommen, siehe Abb. 2. Nach dem Bruch dreht sich die Strömungsrichtung um, das Rückschlagventil schließt und die entstehenden Druckverläufe belasten das Rohr dynamisch. Abb. 3 zeigt den Differenzdruck am Ventil für die Fälle mit und ohne Berücksichtigung der Koppelung von Fluid und Struktur. Deutlich zu erkennen ist die Frequenzänderung und die etwas erhöhten Druckamplituden bei Koppelung. Abb. 4 zeigt die Rohrlängsbewegung am Rohrende. Ohne Koppelung sind zwischen 2 Spitzen der Anregung 2 Spitzen der Rohrgrundfrequenz zu erkennen. Mit Koppelung sind die Amplituden sehr stark abgefallen und die Strukturgrundfrequenz von geringerem Einfluß. Abb. 5 zeigt den Rohrrinnendruck an verschiedenen Knoten ohne Koppelung, Abb. 6 die dazugehörigen Querschnittsveränderungen. Abb. 7 und 8 zeigen die entsprechenden Kurven mit Koppelung. Auch hier ist sehr deutlich die Reduktion der Strukturamplituden und die Verringerung der Bedeutung der Struktureigenformen zu erkennen.

3.3 Vergleichsrechnungen zur Berstsicherung

Für weitere Testrechnungen werden die Behälterversuche der BASF /6/ herangezogen. Zur Simulation eines Druckbehälters mit eingebautem Kernbehältermodell wurde die Strömungsgeometrie durch ein mehrdimensionales Rohrnetzwerk dargestellt (Abb. 9). Die gekoppelte dynamische Analyse soll für den Kernmantel zwischen Ringraum und Innenraum durchgeführt werden. Die Störung erfolgt durch einen Druckbehälterlängsriß. Dadurch wird eine zeitliche Volumenerweiterung im Ringraum aufgeprägt. Zunächst wurden Rechnungen mit DAPSY durchgeführt, bei denen ein elastischer Kernmantel mit quasi-statischem Verhalten angenommen wurde. Diese Art der Berechnung ist für die ersten Millisekunden möglich, solange noch keine deutliche Rückwirkung durch das dynamische Verhalten der Struktur zu erwarten ist. Die Ergebnisse zeigen auch in

diesem Bereich befriedigende Übereinstimmung mit dem Experiment (Abb. 10). Die gekoppelte Berechnung der Fluid- und Strukturmechanik für einen längeren Zeitbereich wird derzeit in Angriff genommen.

4. Schlußbemerkung

Die durchgeführten Berechnungen zeigen folgende Merkmale:

Der Einfluß der Struktur auf das Fluid äußert sich in erster Linie in einer Änderung der Ausbreitungsgeschwindigkeit der Druckwellen, die Änderung der Amplituden ist relativ gering.

Der Einfluß des Fluids auf die Struktur ist sehr groß:

Wie in 3.2 zu erkennen ist, folgt die Strukturbewegung der Druckerregung viel direkter als bei der entkoppelten Betrachtung, ein Indiz für die starke Ankoppelung des Fluids an die Struktur.

Die wesentliche Aussage aller durchgeführten Rechnungen ist aber folgende:

Bei einer realistischen Berechnung von Strukturbeanspruchungen müssen Struktur und Fluid gleichzeitig behandelt werden. Die Annahme, man könne die Druckerregung aus einer gekoppelten Rechnung nehmen und sie auf die reine Struktur zur Bestimmung deren Verformung wirken lassen, führt zu vollkommen falschen Ergebnissen, man vergleiche die annähernd gleichen Druckamplituden in den Abb. 5 und 7 und die völlig verschiedenen Strukturverformungen in den Abb. 6 und 8.

5. Literaturstellen

- / 1 / GRILLENBERGER, T., "The Computer Code DAPSY for the Calculation of Pressure Wave Propagation in the Primary Coolant System of Light Water Reactors", MRR-I-66, April 1976
- / 2 / KOEBERLEIN, K., "Die verzögerte Einstellung des thermodynamischen Gleichgewichts als Grundlage eines Rechenmodelles für die Druckwellenausbreitung in der Zweiphasenströmung von Wasser", MRR 106, April 1972
- / 3 / OESTERLE, B., "Vorschlag für eine Methode zur gekoppelten Berechnung fluid- und strukturmechanischer Vorgänge", Finite Element Congress 1976, Baden-Baden
- / 4 / OESTERLE, B., "SWING-R, A Computer Code to Calculate the Time History of Multi-Mass-Systems with Consideration of Non-Linearities or Dry Friction", Nuclear Engineering and Design 30 (1974)

- / 5 / Battelle-Institut, "Versuchsergebnisse aus dem Vorhaben RS 15/B", Techn. Bericht RS 16/B, August 1975
- / 6 / BASF Ludwigshafen, Behälterversuche der BASF, Versuchsbericht nicht veröffentlicht

Test pressure vessel

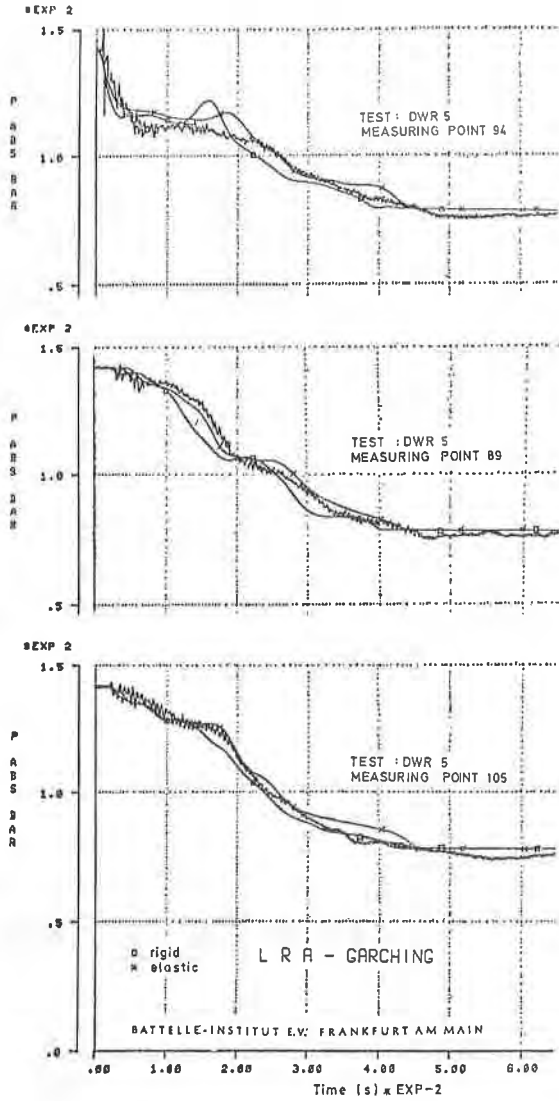
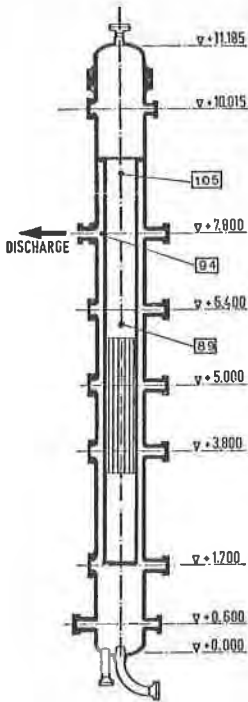


FIG.1: BATTELLE-RS 16/2 Experiment

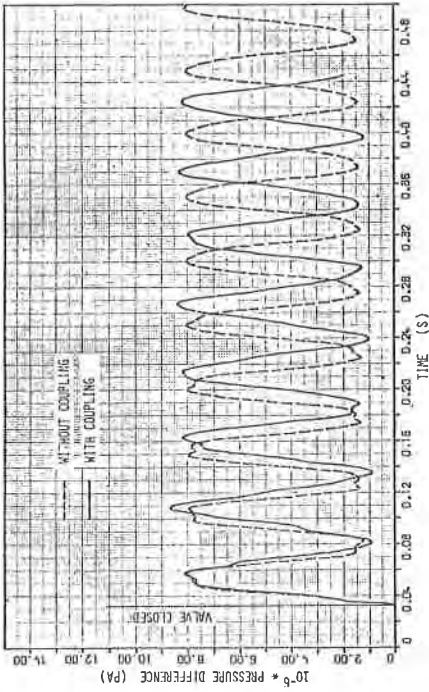


FIG. 3 PRESSURE DIFFERENCE AT THE VALVE

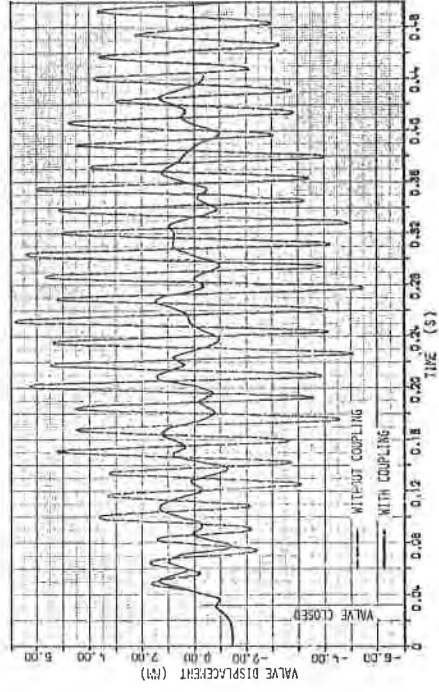


FIG. 4 VALVE DISPLACEMENT

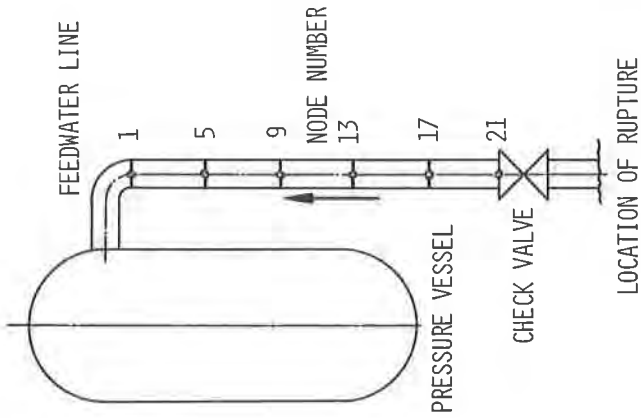
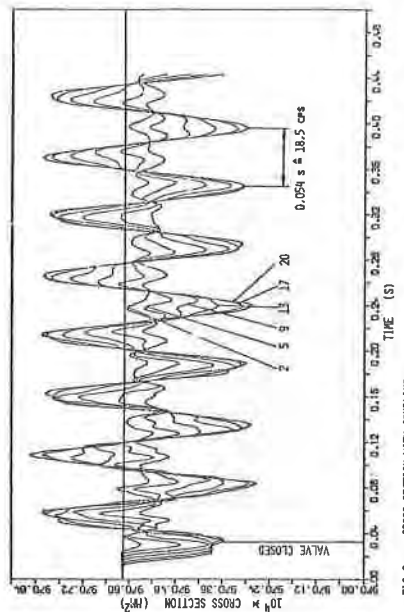
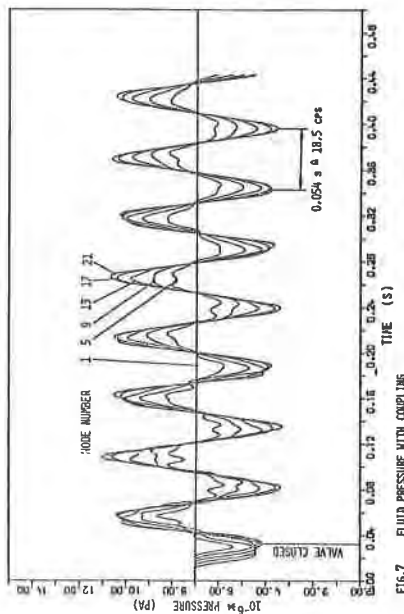
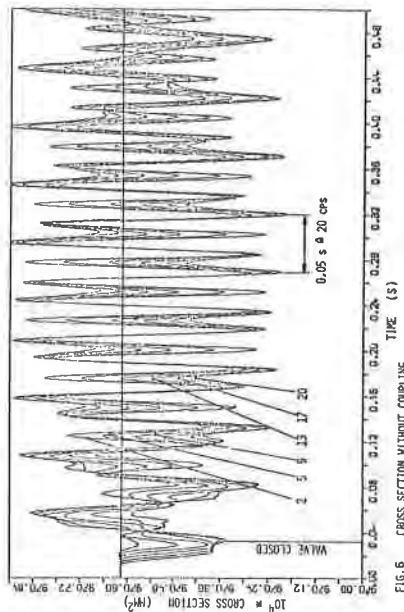
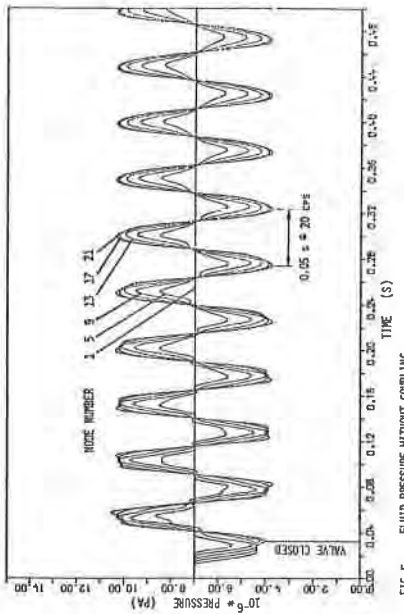


FIG. 2 FEEDWATER LINE MODELING



BASF Vessel Experiment

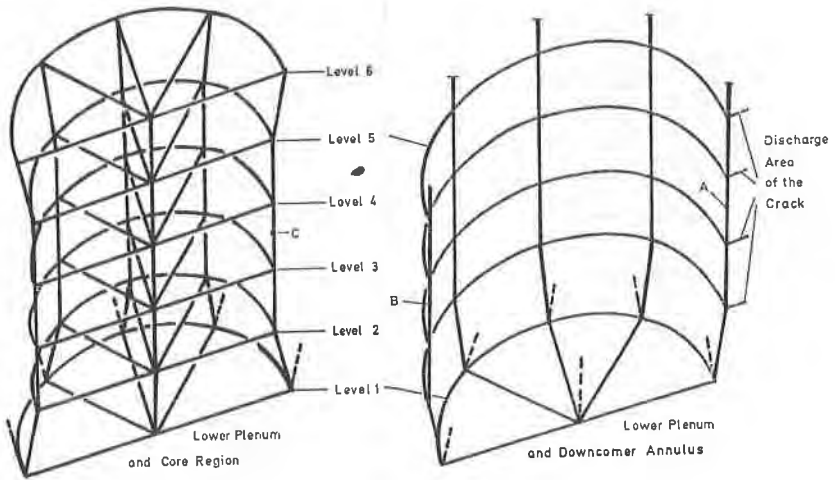


Fig.9 DAPSY REPRESENTATION

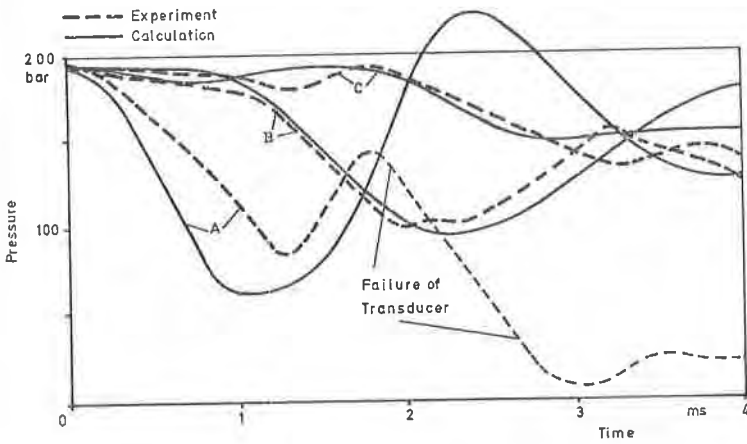


Fig.10 PRESSURES AT THE CORE BARREL WALL