

**GASFLOW-Analysen
zur Wirksamkeit eines
Rekombinatorkonzepts bei
einem postulierten Surge-line
LOCA im Kernkraftwerk
Neckarwestheim-2**

**P. Royl, H. Rochholz, W. Breitung,
J. R. Travis, G. Necker, A. Vesper**

**Institut für Kern- und Energietechnik
Projekt Nukleare Sicherheitsforschung**

März 2000

Forschungszentrum Karlsruhe

Technik und Umwelt

Wissenschaftliche Berichte

FZKA 6333

**GASFLOW-Analysen zur Wirksamkeit
eines Rekombinatorkonzepts bei einem
postulierten Surge-line LOCA im
Kernkraftwerk Neckarwestheim-2**

P. Royl, H. Rochholz, W. Breitung, J. R. Travis, G. Necker, A. Vesper

Institut für Kern- und Energietechnik
Projekt Nukleare Sicherheitsforschung

Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe

2000

Danksagung

Die Arbeiten, die in diesem Bericht dokumentiert werden, wurden freundlicherweise mit Mitteln der Technischen Vereinigung der Großkraftwerksbetreiber e. V. Essen finanziert.

Als Manuskript gedruckt
Für diesen Bericht behalten wir uns alle Rechte vor
Forschungszentrum Karlsruhe GmbH
Postfach 3640, 76021 Karlsruhe
Mitglied der Hermann von Helmholtz-Gemeinschaft
Deutscher Forschungszentren (HGF)
ISSN 0947-8620

ZUSAMMENFASSUNG

Mit dem dreidimensionalen Fluidodynamik-Programm GASFLOW wurde die Wasserstoffverteilung und -beherrschung in **GKN-2** für einen postulierten schweren Unfall mit Kernschmelzen numerisch simuliert.

Das untersuchte **Unfallszenario** bestand in einem instantanen Rundumabriß der Surge-line am Einschweißstutzen der Hauptkühlmittelleitung mit zusätzlichem Ausfall aller redundanten Not- und Nachkühlsysteme. (Hierbei handelt es sich um ein auslegungsüberschreitendes Ereignis.) Es wurde weiterhin unterstellt, dass nach der ersten Kernaufheizung durch die nukleare Nachzerfallswärme und die chemische Reaktionswärme aus der Zr-Dampf-Reaktion der Kern in das untere RDB-Plenum abstürzt und dort stabilisiert werden kann. Insgesamt handelt es sich bei dem mit GASFLOW untersuchten Unfallszenario um einen im wesentlichen auf die in-vessel-Phase begrenzten Surge-line LOGA (loss of coolant accident).

Die bei dieser Unfallsequenz aus dem Primärkreis in den Sicherheitsbehälter eintretenden **Quellen** für Masse (Wasser, Dampf, Wasserstoff, Radionuklide) und Energie, wurden von der GRS mit dem Integralcode MELCOR 1.8.3 berechnet. Insgesamt treten 462 to Wasser, 89 to Dampf, 531 kg Wasserstoff und Spaltprodukte mit rund 8 MW Nachzerfallsleistung in die Atmosphäre ein. Diese MELCOR-Quellen wurden sowohl in der GASELOW - als auch der RALOC-Analyse verwendet.

Im Hinblick auf die **Wasserstoffverteilung** hat die GASFLOW-Analyse ergeben, dass bei dem untersuchten Szenario im wesentlichen eine gute globale Durchmischung auftritt, was auf das Zusammenwirken folgender physikalischer Prozesse zurückzuführen ist:

- durch den direkt nach dem Surge-line Abriß entstehenden Druckstoß versagt ein großer Teil der Berstfolien auf beiden Dampferzeugertürmen, wodurch ein Konvektionspfad mit großem Strömungsquerschnitt bereitgestellt wird,
- die Bruchstelle liegt tief, was nach den Ergebnissen von HDR- und Battelle- Versuchen einer Temperatur- und Wasserstoffstratifikation entgegen wirken sollte,

- die Druckwelle aus dem Berstereignis öffnet auch die tiefliegenden Berstfolien im Trümmerschutzzylinder, wodurch ein weiterer Konvektionsweg zu den Containmentbereichen außerhalb des Trümmerzylinders freigegeben wird,
- durch Dampfkondensation an kalten Strukturen entstehen lokal schwerere Gasgemische, die in wandnahen Randströmungen absinken und damit Wasserstoff in untere Containmentbereiche transportieren,
- die von den heißen Quellgasen verursachte Verdrängungsströmung erzeugt über verschiedene fluiddynamische Mechanismen (Scherströmung an Hindernissen, Taylorinstabilitäten) Wirbel in weiteren Containmentbereichen, die ebenfalls zur Durchmischung beitragen,
- der bruchnahe Dampferzeugerturm wird durch die aufsteigenden heißen Gase höher aufgeheizt als der bruchferne Dampferzeugerturm, wodurch eine asymmetrische Temperaturverteilung auftritt, die einen weiteren (wenn auch geringeren) Vermischungseffekt beisteuert,
- in den hochtransienten Freisetzungsphasen, wie z.B. beim Kernabsturz, erzeugt der im Quellstrahl und seinem Auftriebseffekt enthaltene Impuls eine globale Vermischung im Dom und daran anschließend eine Zirkulation (über die beiden Dampferzeugertürme, so dass auch für diese kritische Unfallphase nur eine kurze transiente H₂-Stratifikation auftritt.

Diese Effekte bewirken in ihrer Gesamtheit, dass sich im Sicherheitsbehälter eine relativ gut durchmischte Atmosphäre einstellt, sowohl während der Zeitspanne mit langsamer H₂/Dampffreisetzung als auch während der schnellen Freisetzungsphasen. Mit der unterstellten totalen Wasserstoffeinspeisung von 531 kg ergeben sich am Ende der Analyse (bei 7000 s) ohne Rekombinatoren durchschnittlich etwa 6% H₂ mit Rekombinatoren dagegen nur 4% H₂ im Sicherheitsbehälter.

Für die **Rekombinator-Wirksamkeit** haben die GASFLOW-Analysen folgende Ergebnisse gezeigt:

- Die Abbauleistung eines Rekombinators hängt prinzipiell von der lokalen H₂-Konzentration ab, die wiederum weitgehend durch das global aufgeprägte Strömungsfeld bestimmt wird. Der Naturzugeffekt des Rekombinators ist demgegen-

über im allgemeinen vernachlässigbar. Der durch Naturzug beeinflusste Raumbereich beschränkt sich auf wenige Meter Entfernung vom Rekombinator.

- In dem untersuchten Szenario mit guter globaler Durchmischung befinden sich nur wenige Rekombinatoren in abgelegenen unteren Räumen (wie z.B. dem Ringkanal), zu denen wenig Wasserstoff vordringt.
- Die integrale Abbauleistung des gesamten Rekombinatorsystems wird durch die Anzahl an großen Einheiten bestimmt (Siemens Typ FR90/1-1500) die in den dominierenden Konvektionsloops positioniert sind.
- Die Anordnung der Rekombinatoren innerhalb der gut durchmischten Konvektionszonen hat nur einen relativ geringen Einfluß auf die individuelle Abbauleistung, z.B. beim Typ FR90/1-1500 wurden Werte von etwa 6 bis 9 kg H₂ bei 7000 s berechnet.
- Kleine Rekombinatoren (Typ FR90/1-320) tragen in gut durchmischter Atmosphäre nur unwesentlich zur Wasserstoffbeseitigung bei, weil die rekombinierende Fläche relativ klein ist. Verglichen mit dem Installations- und Wartungsaufwand ist der Nutzen gering.
- Die Rekombinatoren bewirken in dem untersuchten Szenario keine weitere merkliche Verstärkung der Homogenisierung. Der relativ geringe Impuls der Rekombinatorabgase wird schon in der nahen Umgebung dissipiert und von großskaligen Konvektionsströmungen dominiert.

Bezüglich der erreichten **Risikominderung** läßt sich feststellen, dass das untersuchte Rekombinatorkonzept eine eindeutig sicherheitsgerichtete und effektive Maßnahme ist, die im untersuchten Szenario innerhalb der ersten Stunden nach der Wasserstofffreisetzung greift. Zum Beispiel beträgt das berechnete Gebäudeinventar eine Stunde nach Freisetzungsbeginn ohne Rekombinatoren etwa 530 kg Wasserstoff, dagegen mit Rekombinatoren nur ca. 310 kg. Die integrale stündliche Abbauleistung liegt anfangs bei etwa 180 kg H₂/h, danach nimmt sie proportional zum vorhandenen H₂- oder O₂- Restgehalt ab.

Brennbare Gasgemische treten nur kurzzeitig während der Kernabsturzphase bei ca. 5900 s auf. Bei diesem Ereignis werden rund 120 kg Wasserstoff innerhalb von etwa

2 Minuten in eine relativ homogen vorgemischte Atmosphäre mit ca. 3% H₂ injiziert. Durch den Eigenimpuls der mit hoher Geschwindigkeit austretenden H₂/Dampfmassen, durch die reine Dampfausströmung am Ende dieser Phase, sowie durch die gebäudeweit induzierten Strömungswirbel, verteilt sich allerdings die zündfähige Wolke innerhalb von wenigen Minuten, so dass danach wieder inerte Zustände im Sicherheitsbehälter vorliegen.

Zu keiner Zeit bestehen Bedingungen die eine Selbstzündung der Atmosphäre zulassen, d.h. gleichzeitig genügend große Temperaturen, H₂- und O₂-Konzentrationen.

Mit der Installation des untersuchten Rekombinatorsystems wäre somit der sichere Abbau von größenordnungsmäßig bis zu 500 kg Wasserstoff auf einen unbedeutenden Restgehalt innerhalb weniger Stunden zuverlässig erreichbar. Das System hätte keine nachteiligen Auswirkungen auf den Normalbetrieb oder die übrigen Sicherheitssysteme, die zur Beherrschung des Unfalls nötig wären. Ohne eine derartige AM-Maßnahme würde das hier postulierte Unfallszenario in einen schwer diagnostizierbaren und schwierig zu kontrollierenden Zustand führen. Sowohl kurz als auch langfristig (Radiolyse) würde der Sicherheitsbehälter große Mengen Wasserstoff enthalten.

Die Ergebnisse bezüglich des **Methodenvergleichs** von (Computational Fluid Dynamics) CFD- und (Lumped Parameter) LP-Verteilungsanalysen lassen sich wie folgt zusammenfassen.

Die für GKN-2 durchgeführten GASFLOW und RALOC Rechnungen erlauben erstmals einen systematischen Vergleich beider Simulationsmethoden an einer realen, in ihrer vollen Komplexität modellierten Reaktoranlage. Aufgrund der unterschiedlichen Gleichungssysteme, der verschiedenen räumlichen Nodalierungen und physikalischen Teilmodelle sind prinzipiell unterschiedliche Detailergebnisse zu erwarten.

In den meisten Fällen ließen sich die beobachteten Unterschiede auf die verwendeten Modellierungsansätze zurückführen. So zeigen z.B. die mit RALOC berechneten Wasserstoffkonzentrationen i.a. eine geringere Dynamik und niedrigere Spitzenwerte als die entsprechenden GASFLOW-Werte, was vor allem an der integrierenden

Wirkung der relativ großen Kontrollvolumina und der instantanen Mischungsannahme zu liegen scheint.

Das wichtigste Resultat für die vorliegende Fragestellung ist aber die gute Übereinstimmung der mit unterschiedlichen und unabhängig verifizierten Rekombinatormodellen berechneten integralen Wasserstoffabbauleistungen (bei 7000 s; RALOC: 0.59 kg/H₂/m² Rekofläche, GASFLOW: 0.54 kg H₂/m²). Damit besteht eine gesicherte theoretische Basis für die Wirksamkeit des untersuchten Rekombinatorkonzepts. Ein wesentlicher Grund für den noch verbleibenden Unterschied in den berechneten Rekombinatorleistungen (ca. 10 %) sind Detailmodelle in der Rekoo- Simulation. Das GASFLOW- Modell verwendet, auf Empfehlung von Siemens, eine etwas konservativere Korrelation als RALOC.

Mit beiden Programmen wurden für das vorliegende Szenario eines tiefliegenden Surge-line LOCA weitgehend homogene Endzustände im Sicherheitsbehälter und praktisch gleich hohe, nicht brennbare Wasserstoffkonzentrationen vorhergesagt (bei 7000 s rund 4% H₂).

GASFLOW - analysis of the efficiency of a recombiner concept for a postulated surge-line LOCA in the Neckarwestheim-2 nuclear power plant

SUMMARY

The 3-d fluid flow program GASFLOW was used to simulate hydrogen distribution and control in **GKN-2** for a postulated severe accident.

The investigated **accident scenario** was a surge-line LOCA, including failure of all redundant emergency core cooling systems. (This is a beyond design accident sequence). It was further assumed that the core support plate fails and that after core slumping the core-melt can be stabilized in the lower RPV plenum.

The **mass sources** released in this scenario from the primary system to the containment (water, steam, hydrogen, radio nuclides) were calculated by GRS with the integral code MELCOR 1.8.3. Altogether 462 tons of water, 80 tons of steam, 531 kg hydrogen and fission products with about 8 MW decay heat enter the containment atmosphere. These MELCOR sources were used in the GASFLOW and the corresponding RALOC analysis.

With respect to the **hydrogen distribution** the GASFLOW calculation predicted that the investigated scenario leads to a relatively well mixed atmosphere because of the following physical processes:

- the pressure wave, caused by the instantaneous surge-line rupture, ruptures a large fraction of burst foils on both steam generator towers, providing an effective global convection path with large cross section,
- the pressure wave from the surge-line rupture also opens low situated burst foils, providing a convection path to the lower containment region outside the missile shield,
- the break location is low, which in accordance with earlier HDR and Battelle tests, counteracts temperature and hydrogen stratification,

- steam condensation on cold structures creates locally denser gas mixtures which move downwards in a sedimentation flow close to the walls and transport hydrogen into lower containment regions,
- the displacement flow due to the hot source gases entering the containment atmosphere, causes eddies by different fluid dynamic mechanisms (shear flow near obstacles, Taylor instabilities) which also contribute to mixing,
- during the highly transient accident phases, as e. g. during core slumping, the momentum and the buoyancy of the source jet drives a large circulation loop via dome and both steam generator towers, so that even for this critical accident phase only a transient H₂-stratification develops.

These effects together lead to relatively well mixed atmospheres during the phases with slow and with fast H₂-steam release. With the applied total hydrogen release of 531 kg GASFLOW predicts about 6 % H₂ in the containment without recombiners and 4 % H₂ with recombiners, at the end of the analysis (7000 s).

With respect to **recombiner efficiency** the following results were obtained:

- the removal rate of a recombiner depends only on the local H₂-concentration at the recombiner position; which in turn is determined largely by the global flow field in the containment. The natural draft of the recombiner itself can be neglected in most cases, because the effected space region is limited to few meters distance,
- in the investigated scenario with a rather well mixed gas distribution, only few recombiners are located at positions to which little hydrogen was transported, e. g. in the ring canal,
- the integral removal rate of the total recombiner system is determined by the number of large units (Siemens type FR90/1-1500) which are located in the dominant convection loops,

- the position of the recombiners inside the well mixed convection loops has only a weak influence on the individual H₂-removal rate of the recombiners, e. g. 6 to 9 kg H₂ for type FR90/1-1500 at 7000 s,
- small recombiner units (type FR90/1-320) show in well mixed scenarios only insignificant contributions to the total H₂-removal because of their small recombining surface, the effect of these small units is minor compared to the installation and maintenance effort,
- in the investigated scenario, the recombiners did not provide a noticeable additional mixing effect, because the small momentum of the recombiner exhaust gases is dissipated in the near environment and dominated by the large scale convection flow.

With respect to the **risk reduction** the main result is that the investigated recombiner concept is a safety oriented and effective accident management measure which acts in the investigated scenario within the first hours after the hydrogen release. The calculated hydrogen inventory in the containment is e. g. 530 kg without recombiners and 310 kg after one hour with recombiners. The integral hydrogen removal rate is initially about 180 kg H₂/h and then decreases proportionally to the residual hydrogen or oxygen concentration in the containment.

Combustible gases develop only during short time periods after failure of the core support plate. In this event about 120 kg H₂ are injected over 2 minutes into a relatively homogeneous atmosphere with 3 % H₂ content. Due to the jet momentum, the pure steam release at the end of this transient phase, and the induced flow vortices, the combustible cloud disappears within few minutes, so that again inert conditions exist in the containment.

At no time conditions for self-ignition of the gas mixture were found, namely sufficiently high temperature, H₂- and O₂-concentration at the same location.

The installation of the investigated recombiner system would therefore allow the safe removal of about 500 kg hydrogen down to an insignificant rest inventory within few

hours. The system would have no detrimental side effects on normal operation or on other safety systems which are needed to control the accident. Without the recombiner system, the beyond design accident scenario investigated in this study, would lead into a system state which would be difficult to diagnose and terminate safely (removal of 500 kg H₂). The containment would contain large amounts of hydrogen over short and long time periods (radiolysis).

The results concerning the **methodology comparison** between CFD and Lumped Parameter (LP) distribution modelling can be summarized in the following way.

The GASFLOW and RALOC calculations for GKN-I allowed for the first time a systematic comparison of both simulation methods for a real, full scale and complex reactor containment. Because of the different physical models, equation systems and spatial nodalization schemes (3-d, 0-d) different results must be expected.

In most cases the observed differences could be traced back to the different modelling assumptions used in the codes. RALOC predicts e. g. hydrogen concentrations with generally lower rates of changes in the transient phases and with lower H₂-peak values, which is due to the integration effect of the larger control volumina and the assumption of instantaneous homogenization within a given control zone. In this well mixed scenario without significant hydrogen and temperature stratification, good agreement was often observed during the quiescent accident phases.

The most important conclusion for the investigated subject is the good agreement of the calculated integral hydrogen removal rates, which are based on different and independently verified recombiner models. At 7000 s e. g. RALOC predicts a H₂ removal of 0.59 kg H₂/m² recombiner surface and GASFLOW predicts 0.54 kg H₂/m². Therefore a secure theoretical basis exists for the effectiveness of the investigated recombiner concept. A major reason for the remaining uncertainty in the recombiner H₂-removal rates (about 10 %) are the different rates used in the recombiner simulation. The GASFLOW model uses a Siemens correlation which is slightly conservative compared to the RALOC correlation.

For the investigated scenario, both programs predict largely homogeneous final conditions in the containment and nearly the same, inflammable hydrogen concentrations (about 4 % H₂ at 7000 s).

Inhaltsverzeichnis

1	Problemstellung und Zielsetzung	3
2	Anlagenmodellierung mit GASFLOW	7
2.1	Kurze Vorstellung des GASFLOW Programms	7
2.2	Modellerweiterungen für die GKN -2 Analysen	9
2.3	Modellierung der Geometrie in GASFLOW	13
2.3.1	Anpassung der Strukturflächen an die Anlagendaten	15
2.3.2	Definition von Containmenträumen im 3D-GASFLOW Modell	16
3	Ergebnisse und Interpretation	21
3.1	Quelldaten	21
3.2	Übersicht über durchgeführte GASFLOW Simulationen	24
3.3	Massen und Energiebilanz	26
3.4	Druckverlauf	28
3.5	Versagen der Berstfolien	30
3.6	Geschwindigkeitsfeld	31
3.7	Dampf-/ Wasserstoffkonzentrationen und Temperaturen	33
3.7.1	Diskussion der Daten für den Kuppelbereich	33
3.7.2	Raumweise Aufschlüsselung	37
3.7.3	Vergleich mit den RALOC Raumdaten	40
3.8	Wirksamkeit der Rekombinatoren im 3D Konzentrationsfeld	43
3.9	Vergleich mit der Rekombination in RALOC	49
3.10	Untersuchungen zur Wasserstoffvermischung	53
3.10.1	Bildung zündfähiger Wasserstoff-Gemische	56
3.10.2	Vermischungsmechanismen	57
3.10.2.1	Kamineffekt der Dampferzeugertürme	57
3.10.2.2	Mischung durch Wirbelbildung	58
3.10.2.3	Mischeffekt durch Dampfkondensation	61
3.10.2.4	Mischungsverhalten mit adiabater Kugelschale	64
3.10.2.5	Einspeisung von reinem Wasserstoff	66
3.10.3	Fazit aus der Studie der Vermischungsmechanismen	69
3.11	Schlußfolgerungen aus den Analysen	70

4	Anhänge	78
4.1	Anlagenmodellierung	78
4.1.1	Allgemeines zur Modellierung der Geometrie	78
4.1.2	Darstellung der Geometrie	80
4.1.3	Erläuterung zu einigen Anlagenschnitten	82
4.1.3.1	Schnitt A	83
4.1.3.2	Schnitt B	85
4.1.3.3	Schnitt C	87
4.1.3.4	Schnitt D	88
4.1.3.5	Schnitt E	89
4.1.3.6	Horizontalschnitte	90
4.1.4	Gesamtdarstellung aller Anlagenschnitte	98
4.2	Darstellung der RALOC-Räume	194
4.3	Modellierung der Rekombinatoren und Berstfolien	196
4.4	Analyse zum Methodenvergleich	199

1. PROBLEMSTELLUNG UND ZIELSETZUNG

Als Folge des Tschernobylunfalls hat die RSK eine Reihe von risikomindernden Vorsorgemaßnahmen für bestehende Kernkraftwerke in Deutschland empfohlen. Ziel ist eine erhöhte Gewährleistung der Integrität der verschiedenen Sicherheitsbarrieren, selbst für den extrem unwahrscheinlichen Fall von auslegungsüberschreitenden Ereignissen mit Kernschäden.

Im Hinblick auf die Wasserstoffproblematik hat die RSK am 17.12.97 die Implementierung von katalytischen Rekombinatoren empfohlen [1.1]. Für die Auslegung und für den Nachweis eines wirksamen Rekombinatorkonzepts wurden vier repräsentative Unfallszenarien ausgewählt, die die wichtigsten Unfallklassen, Wasserstofffreisetzung-Charakteristiken, Zustände im Sicherheitsbehälter und zeitlichen Abläufe repräsentieren.

Die GRS hat für diese vier Szenarien die Massen- und Energieströme in den Sicherheitsbehälter einer 1300 MW DWR Konvoi-Anlage mit dem Programm MELCOR berechnet [1.2] und anschließend mit RALOC die Wasserstoffverteilung sowie die Reko-Wirksamkeit untersucht [1.3,1.4]. Die Anordnung der Rekombinatoren und ihre Realisierungsmöglichkeit wurde mit dem Betreiber der Referenzanlage (GKN-2) abgestimmt.

Die RSK erwartet, daß die Ergebnisse der RALOC-Rechnungen mit einem CFD-Programm überprüft werden [1.1], und zwar aus folgenden Gründen:

1. "Lumped parameter" Programme (wie z.B. RALOC oder CONTAIN) lösen einen vereinfachten Gleichungssatz für Energie- und Massenerhaltung. Die Impulsbilanz wird insgesamt vernachlässigt, was die lösbare Problemklasse prinzipiell auf langsame Druckausgleichsströmungen beschränkt, bei denen der Impuls des Gases keinen wesentlichen Einfluß auf die Strömungsrichtung hat. Durch die fehlende Impulsbilanz enthält das Gleichungssystem keine Richtungsinformation. Strömungsrichtungen werden durch die Wahl der Kontrollzonen, der Verbindungen zwischen diesen Zonen und den entsprechenden Druckverlustkoeffizienten vorgegeben.

2. Die Gleichungen werden auf einem nulldimensionalen Punktgitter gelöst; es existieren nur Mittelwerte der Variablen für vorher festzulegende Kontrollzonen, die sich so weit wie möglich an realen Containmenträumen orientieren. Dadurch können keine lokalen Effekte auf kleineren Skalen aufgelöst werden, wie z.B. Geschwindigkeits- und Konzentrationsgradienten innerhalb der festgelegten Zonen oder entlang von Wänden.
3. Da in den Gleichungen Mittelwerte behandelt werden, gilt dieser Modellansatz streng genommen nur für Strömungsprobleme bei denen nahezu homogene Mischungen, Drücke und Temperaturen in jeder Kontrollzone auftreten.
4. Die Wärmesenken können innerhalb eines Kontrollvolumens nur homogen verteilt werden. Sie berücksichtigen daher im allgemeinen nicht die in der Kontrollzone tatsächlich vorhandenen Gastransportwege für Masse und Energie.
5. Die vereinfachten Gleichungen enthalten notwendigerweise eine Reihe von freien Parametern wie z.B. Druckverlustkoeffizienten zwischen virtuellen Zonengrenzen, denen keine realen Wände entsprechen. Die Ergebnisse sind im allgemeinen abhängig von der Größe und Lage der gewählten Kontrollzonen sowie von der Benutzererfahrung.

In dreidimensionalen Fluidynamik-Programmen werden diese Approximationen dadurch vermieden, daß die vollständigen Erhaltungsgleichungen der Strömungsdynamik (kompressible Navier-Stokes Gleichungen) auf einem möglichst hochauflösenden 3-D Rechengitter gelöst werden. Der Gültigkeitsbereich dieser Gleichungen ist uneingeschränkt, in jeder Rechenzelle werden lokale Zustandsgrößen berechnet, und es gibt keine freien Eingabeparameter nach der einmal erfolgten Verifikation der verwendeten physikalischen Teilmodelle. Insofern bieten CFD-Rechnungen die Möglichkeit Ergebnisse von "Lumped Parameter" Programmen (LP) zu ergänzen und zu überprüfen. Die geschilderten unterschiedlichen Modellierungsansätze führen notwendigerweise zu unterschiedlichen Ergebnissen, allerdings wurden bisher keine detaillierten Vergleiche zur Wasserstoffverteilung für die komplexen Bedingungen in einem realen Reaktorsicherheitsbehälter durchgeführt.

Die GASFLOW-Rechnungen haben daher folgende Zielsetzungen:

1. Methodenvergleich und -ergänzung

- Vergleich von LP- und CFD-Ergebnissen zur Verteilung von Wasserstoff in einem auf voller Skala modellierten Reaktorsicherheitsbehälter für ein ausgewähltes Unfallszenario.
- Übertragung der RALOC Raumdefinitionen in das detaillierte GASFLOW- Geometriemodell.
- Deutung und Wertung der beobachteten Unterschiede.
- Anpassung von unsicheren Parametern oder Verbesserung der Raumnodalisierung für LP-Analysen, anhand von detaillierten Ergebnissen aus CFD-Rechnungen.
- Ergänzung bei den behandelten physikalischen Teilprozessen.

2. Konzeptabsicherung

- Möglichst weitgehende Absicherung der Wirksamkeit des Rekombinatorkonzepts durch dreidi-mensionale CFD-Rechnungen, je nach Ergebnis des Methodenvergleichs.

Literatur

- 1.1 "Maßnahmen zur Risikominderung bei Freisetzung von Wasserstoff in den Sicherheitsbehälter von bestehenden Kernkraftwerken mit Druckwasserreaktor nach auslegungsüberschreitenden Ereignissen", Anlage 1 zum Ergebnisprotokoll der 314. RSK-Sitzung am 17.12.1997
- 1.2 J. Rohde, M. Sonnenkalb, "Analyse von Ereignisabläufen mit Kernschmelzen für DWR vom Typ KONVOI mit MELCOR 1.8.3", GRS-Köln, Bericht auf der 138. Sitzung des RSK-LWR Ausschusses (Sept. 1996)

- 1.3 J. Rohde, M.Tiltmann, " Maßnahmen zur Risikominderung bei Freisetzung von Wasserstoff in den Sicherheitsbehälter nach auslegungsüberschreitenden Ereignissen", 313. Sitzung der RSK, 15.10.1997
- 1.4 M. Tiltmann, "GRS- Technische Notiz TN- TIL 3/96: RALOC- Mod4- Untersuchungen für die KONVOI- Kernkraftwerksanlage Neckerwestheim 2 (GKN 2) Dokumentation der Eingabedaten für die ND- Störfallsequenz, Teil 1, Mai 1996.

2. ANLAGENMODELLIERUNG MIT GASFLOW

Zur Anlagenmodellierung mit GASFLOW wird in diesem Abschnitt nur ein kurzer Überblick gegeben. Die genaue Modellierung der Containmentgeometrie wird im Anhang detailliert erläutert. Das verwendete Programm GASFLOW wird kurz vorgestellt. Anschließend werden die Modellerweiterungen, die speziell für die GKN-2 Analysen vorgenommen wurden, zusammengefaßt. In diesem Abschnitt wird die Geometrie nur anhand einer 3D Darstellung der Eingabe und eines ausgewählten Schnittes erläutert. Außerdem wird die Methode kurz vorgestellt, mit der die thermischen Anlagendaten in das Modell übernommen wurden. Beschrieben wird auch die Unterteilung des 3D Containmentmodells in verschiedene Kontrollräume. Die raumweise gemittelten Ergebnisse aus GASFLOW lassen sich in der kondensierten Form leichter diskutieren und auch direkt mit den Ergebnissen der Lumped Parameter Codes vergleichen.

2.1. Kurze Vorstellung des GASFLOW Programms

Das Programm GASFLOW [2.1] ist ein gemeinsam vom Forschungszentrum Karlsruhe und Los Alamos National Laboratory entwickeltes 3D Simulationsprogramm zur Beschreibung von Dampf- Wasserstoffverteilungen und Verbrennungsvorgängen in komplexen Containmantanordnungen. GASFLOW löst die Navier-Stokes-Gleichungen für eine dreidimensionale Gasströmung in einem Eulerschen Maschennetz mit hinreichender Ortsauflösung. Die numerische Diskretisierung erfolgt in einem versetzten Maschennetz, bei dem die skalaren Größen in Maschenmitte und die vektoriellen in den Mittelpunkten der Maschenoberflächen bestimmt werden. Bei der Feldbeschreibung in GASFLOW werden Masse, Energie und Impuls der Strömung innerhalb eines zusammenhängenden 3D-Maschennetzes erhalten. Mit den heute verfügbaren schnellen Rechnern kann ein solches Netz auch für sehr komplexe Containmentgeometrien in kartesischen oder zylindrischen Koordinaten geschlossen behandelt werden. Die Lösung der Navier-Stokes Gleichungen erfolgt ohne Einschränkungen bei der Kompressibilität. Die Fluidmechanik in GASFLOW ist mit einem reaktionskinetischen Modell gekoppelt und erlaubt die Beschreibung von Transport- und Verbrennungsvorgängen. GASFLOW verwendet eine implizite Methode zur Druckberechnung. Die Lösung erfolgt dabei in einer

modifizierten ALE (Arbitrary Lagrange Eulerian) Technik in 3 Schritten. In der Phase A wird die Bewegung der Mittelpunkte der Maschenoberflächen in einem Lagrange Ansatz extrapoliert. In der Phase B wird das expandierte Maschenvolumen mit den Zustandsgleichungen iteriert und ein konsistenter Satz von Lösungsvariablen zum neuen Zeitschritt $n+1$ und damit auch ein neuer Druck bestimmt. In der Phase C werden die Lösungsvariablen vom Lagrangenetz wieder in das feste Eulersche Maschennetz übertragen, wobei auch ein sog. van Leer Verfahren mit zweiter Ordnung im Raum verwendet werden kann, das die numerische Diffusion minimiert. Durch eine dynamische Zeitschrittanpassung können Vorgänge mit sehr unterschiedlichen Zeitskalen effektiv erfaßt werden.

GASFLOW beschreibt weiterhin den Wärmeübergang an die Gebäudestrukturen. Konvektiver Wärmeaustausch sowie Verdampfung und Kondensation werden dabei erfaßt. Für die Wärmeleitung in die Strukturen werden eindimensionale Modelle verwendet. Dünne Maschen an den Oberflächen und eine exponentielle Maschenvergrößerung nach innen erlauben eine genaue Bestimmung der Oberflächentemperaturen. Kondensation und Verdampfung wird mit der Reynoldsanalogie für den Wärme- und Stoffübergang bestimmt. Die Raten der Phasenübergänge sind dabei proportional der Differenz aus Sättigungsdampfdichte der Oberflächentemperatur und mittlerer Dampfdichte in der an die Oberfläche angrenzenden Fluidzelle. Ein Modell zur Volumenverdampfung und -kondensation ermöglicht die Simulation von 2-Phasen Abblasevorgängen und verlangsamt die Dampfabkühlung durch Nebelbildung bei der Expansion und Einströmung in kältere Bereiche. Das Wasser, das bei einem 2-Phasen Abblasevorgang mit dem Dampf einströmt und der auskondensierende Nebel werden zusammen mit dem Gas in einer homogenen 2-Phasenströmung bewegt und nach einer Abklingzeit zum Erreichen von thermodynamischem Gleichgewicht zwischen Dampf und Wasser ausgerechnet. Der Energiegehalt des ausregnenden Wassers wird noch nicht weiter berücksichtigt. Er läßt sich aber mit vom Benutzer zu definierenden Sumpfflächen mit vorgegebenen zeitlichen Temperaturen simulieren. Die Verdunstung von Wasser an der Sumpfoberfläche wird abhängig von den lokalen Bedingungen simuliert und kann einen zusätzlichen starken Beitrag zur atmosphärischen Vermischung bringen. An den Wänden kondensierender Dampf überträgt seine latente

Wärme an die Strukturen. Das Kondensat wird mit einem statistischen Filmmodell bilanziert und kann bei geänderten atmosphärischen Bedingungen in Wandnähe auch wieder verdampfen und dabei die Strukturen durch den Entzug von latenter Wärme abkühlen. Die Lösung der Navier-Stokes-Gleichungen berücksichtigt sowohl molekulare als auch turbulente Diffusion. Zur Beschreibung der turbulenten Diffusion können dabei wahlweise ein algebraisches Turbulenzmodell oder das $k-\epsilon$ Modell verwendet werden.

2.2. Modellerweiterungen für die GKN-2 Analysen

GASFLOW löst die Navier-Stokes Gleichungen in einem Block mit einem zusammenhängenden strukturierten orthogonalen Gitter von nicht äquidistanten kartesischen oder zylindrischen Koordinaten, nicht jedoch Kugelkoordinaten. Die Beschreibung des kugelförmigen Konvoi Containments von GKN-2, auch die Darstellung der Einbauten erfolgt zweckmäßig in kartesischen Koordinaten. Eine 4 cm dicke Kugelschale aus Stahl mit einem Radius von 28 m begrenzt den Gasraum im Containment von GKN-2. Nach außen hin anschließend befindet sich ein Ringspalt von 3 m Dicke und weiter außen noch eine 1.8 m dicke Kugelschale aus Beton. Zur Beschreibung des kugelförmigen Containments in kartesischen Koordinaten waren einige wichtige Erweiterungen in GASFLOW vorzunehmen (Abb. 2.1).

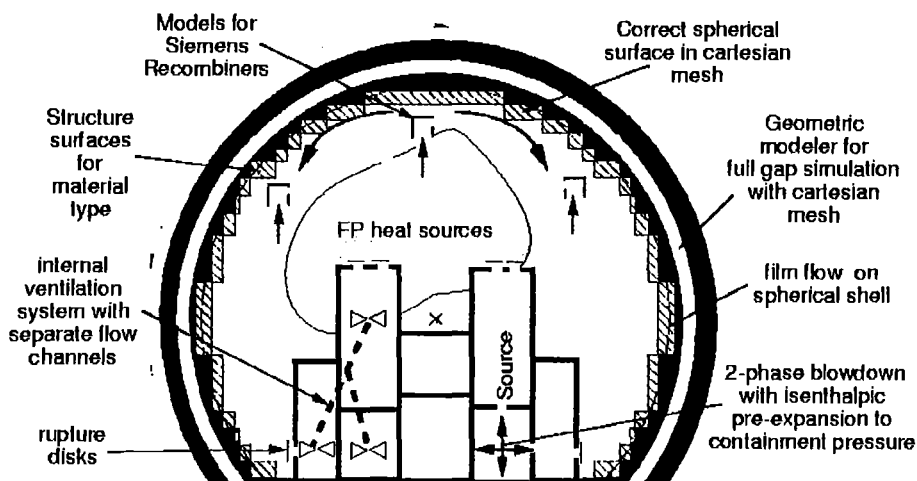


Abb. 2.1. GASFLOW Modellentwicklungen für die Simulationen von kugelförmigen Containments

In einem ersten Modell wurde die Stahlschale in einem kartesischen Maschennetz

automatisch durch treppenförmige Strukturen (Hindernisse) von außen her eingekapselt und nur der Innenraum ausgespart. Das außerhalb liegende System aus Stahlschale, luftgefülltem Ringspalt und Betonschale wurde mit einem erweiterten Modell als Mehrschichtenstruktur beschrieben, für die nur die Wärmeleitungsgleichungen gelöst werden. Zu diesem Zweck wurden spezielle Strukturflächen in GASFLOW definiert, die die Kugeloberfläche abbilden. Die Strukturflächen der Berandung werden in den der Kugeloberfläche benachbarten Fluidzellen (schraffierte Zellen in Abb. 2.1) als verteilte Wärmesenken eingegeben, während die eigentlichen Hindernisse, die die Kugel von außen her einkapseln, nur adiabat simuliert werden. Die Modellierung der eindimensionalen Wärmeleitung in diese Strukturen auf der Kugeloberfläche wurde so erweitert, daß jeder Materiallage für die 1D-Wärmeleitung eine eigene Wärmeleitfähigkeit und Wärmekapazität per Eingabe zugeordnet wurde. Insgesamt wurden 33 äquidistante Nodes (4 für die Stahlschale, einer für den Luftspalt und 28 für die Betonschale zur Beschreibung der Wärmeleitung in einer Mehrschichtenstruktur aus Stahl, Luft und Beton definiert. Von der 1.8 m dicken Betonschale wurde nur die für die transiente Wärmeleitung im Zeitraum von 2 h relevante Schicht von 28 cm beschrieben und an der Außenseite als adiabat angenommen.

Parallel mit der Entwicklung des ersten Modells zur Simulation der Containmentberandung wurde das Geometrieingabemodell von GASFLOW erweitert. Mit dem sog. "Geometriemodellierer" [2.2] können sehr verschiedene geometrische Vollkörper und Hohlkörper (Kugeln, Kugelschalen, Zylinder und Zylinderschalen) mit einer einfachen Eingabe wahlweise als Hindernisse oder Wände in einem gegebenen kartesischen Maschennetz abgebildet werden. Mit dem Geometriemodellierer wurde das erste Containmentmodell nachträglich erweitert. Statt der Wärmeleitung in einer Mehrschichtenstruktur wird die Gaskonvektion im Ringspalt nun direkt simuliert und mit 3 zusätzlichen Fluidzellen auf jeder Seite erfaßt, die durch Stahlwände vom Containmentinnenraum abgetrennt sind. Der konvektive Wärmeübergang an die Betonschale und der Wärmedurchgang durch die Stahlschale wird beschrieben. Die Oberfläche der treppenförmigen Wände wird dabei exakt an die auf die Kugelschale projizierten Oberflächen der zugehörigen kartesischen Maschen angepaßt. Die 1D Wärmeleitung durch die Stahlschale und in die

Betonstrukturen wird getrennt nur noch mit einem Material und jeweils 4 Wärmeleitnodes beschrieben. Das erweiterte Containmentmodell wurde automatisch aus dem ersten Modell mit der Mehrschichtenwärmeleitung erstellt. Es hat 30% mehr Rechenzellen und angepaßte Indexstrukturen zur Berücksichtigung der zusätzlich definierten Zellen im Ringspalt.

Die Dampfkondensation wird in GASFLOW bisher auf allen Strukturen mit einem statischen Filmmodell bilanziert. Dampf kondensiert bis zu einer Filmstärke von 1 mm. In Fluidzellen mit Dampfdichten unterhalb der Sättigungsdichte, die an die Strukturflächen angrenzen, verdunstet der Film bis zum Austrocknen und entzieht dabei der Struktur Wärme. Die Stahlschale der Containmentkugel hat eine besondere Bedeutung als Kondensationsfläche. Zur Zeit wird ein dynamisches Filmmodell für diese Stahlschale entwickelt. Es beschreibt einen auf azimuthal diskretisierten Kugelmeridianen herabfließenden Kondensatfilm und seinen Energieaustausch mit der Stahlschale und dem benachbarten Gas. Das Modell wurde für diese Analysen aber noch nicht eingesetzt.

Für die Simulation der Siemens Rekombinatoren im GKN Containment wurden weitere Modellerweiterungen in GASFLOW vorgenommen, die im Anhang genauer beschrieben werden. Insgesamt wurden 62 Siemens Rekombinatoren im Containment verteilt. Jede Box wird mit je 3 Wänden und angepaßten Wärmekapazitäten unter Verwendung der jeweiligen gemessenen Kennlinie des Rekombinatortyps simuliert.

Die Räume mit den Pumpen und Dampferzeugern(Anlagenräume) befinden sich im Containment von GKN- 2 innerhalb der Dampferzeugertürme und im sog. Trümmerschutzzylinder. Sie sind von den außen und oben im Containment liegenden Betriebsräumen durch Berstscheiben abgetrennt, die durch Überdruck öffnen (s. Abb. 2.1). Zur Simulation dieser Berstscheiben wurde ein Berstscheibenmodell in GASFLOW eingeführt. Berstscheiben sind spezielle Wände, die beim Überschreiten einer vorgegebenen Druckdifferenz verschwinden und dann neue Strömungswege freigeben. Die intakten Berstscheiben begrenzen nur die Strömung und werden als

adiabate Wände simuliert. Der Öffnungsquerschnitt der Berstscheiben kann per Eingabe vorgegeben werden, darf aber die Oberfläche der angrenzenden Fluidzellen nicht überschreiten.

Zur Simulation von gasförmigen Spaltproduktwärmequellen wurde ein spezielles Spurengas „Xenon“ in GASFLOW eingeführt. Seine Konzentration wird zusammen mit der Quelle definiert. Xenon wird wie das andere Quellgas verteilt und setzt Wärme entsprechend seiner örtlichen Konzentration mit einer vorgegebenen spezifischen Leistung frei, die überall mit der gleichen Zeitfunktion abklingt.

GASFLOW läßt sich auch zur Simulation eines Netzwerks von 1D Verbindungsleitungen verwenden. Zugelassen sind aber bisher nur Verbindungsleitungen an den Grenzen des Maschennetzes eines 3D Blocks. Interne Lüftungspfade zur Simulation gleicher Druckrandbedingungen in nicht benachbarten Zellen innerhalb des 3D Maschennetzes lassen sich mit dem Ventilationssystem nicht beschreiben. Kleinere Ventilationsschächte können aber durch abgetrennte Strömungskanäle beschrieben werden. Die Simulation der großen Lüftungsschächte, die Dampferzeugertürme und die unteren Containmentbereiche verbinden, erfolgt in solchen abgetrennten Kanälen. Sie wird im Anhang zusammen mit dem Geometriemodell erläutert.

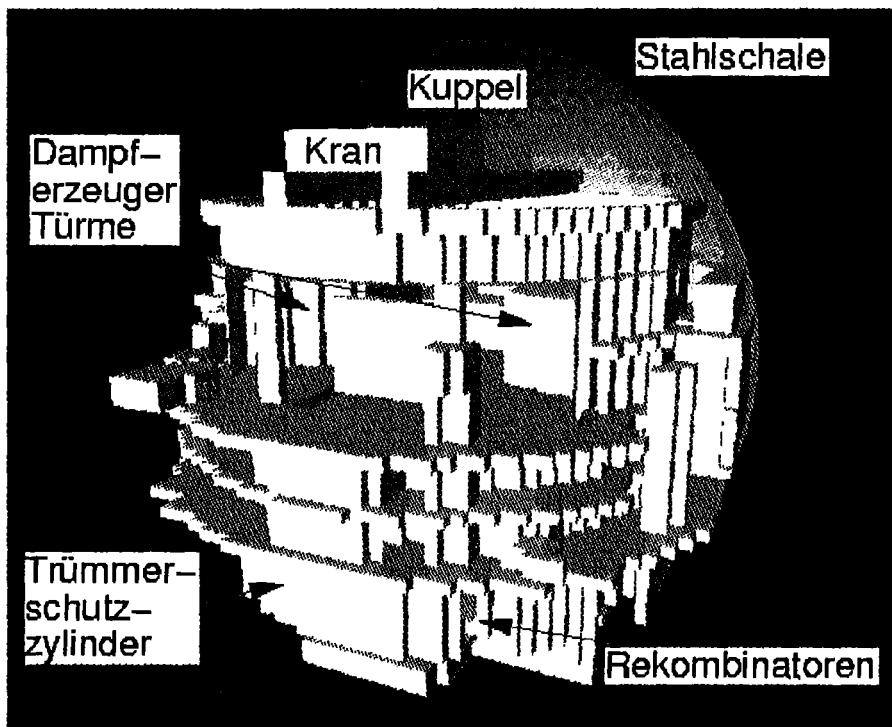
Die Zwei-Phasen Einspeisung von Dampf und Wasser wird in GASFLOW mit den berechneten Quellbedingungen für den Blowdown simuliert. Die thermodynamische Expansion des eingespeisten Zwei-Phasen Gemischs auf den transienten Containmentdruck wird in GASFLOW mit einem neuen Expansionsmodell beschrieben, das auch die Selbstverdampfung des Wassers bei der Expansion beschreibt. Das Expansionsmodell beschreibt wahlweise isenthalpe, isentrope Expansionsvorgänge oder solche mit konstanter innerer Energie, wobei der Containmentdruck auf einen per Eingabe festgelegten Referenzpunkt bezogen wird.

2.3. Modellierung der Geometrie in GASFLOW

Das Kernkraftwerk Neckarwestheim 2 (GKN 2) ist eine Druckwasserreaktoranlage der Konvoi Serie, von der es in Deutschland vier baugleiche Kraftwerke gibt. Es hat einen kugelförmigen Sicherheitsbehälter (Containment). Das 3D-Geometriemodell für diese Anlage wird im Anhang detailliert erläutert. Es wurde anhand der Originalpläne innerhalb eines kartesischen Maschennetzes mit 56 x und y Maschen sowie 40 z Maschen erstellt. Einschließlich der Randzellen verwendet das kartesische Geometriemodell insgesamt 144652 Rechenzellen. Zusätzlich wird ein 1D-Gitter zur Lösung der Wärmeleitung in die Betonstrukturen verwendet. Die 3D-Rechenzellen haben alle eine einheitliche Grundfläche von 1 m^2 und ein Volumen von ca. 1 m^3 . Das Containmentmodell geht von einem Quader mit quadratischer Grundfläche von 56 m mal 56 m und einer Höhe von 51 m aus. Die Containment-Geometrie mit allen größeren Einbauten und der Stahlschale wird in diesem Quader aus einem System von prismatischen Körpern sog. Hindernissen dargestellt, die vom Gas umströmt werden, innerhalb denen aber keine Strömung zugelassen wird. An den Maschengrenzen können auch Wände definiert werden, die selbst kein Volumen einnehmen, aber die Strömung senkrecht zur Wand blockieren. Bei der Eingabe der Strukturen im Containment durch ein System von Wänden und Hindernissen bleiben die freien Gasvolumina ausgespart, in denen nachher die Gasströmung entlang z.T. sehr komplexer Wege zwischen verschiedenen abgetrennten Räumen stattfindet. GASFLOW löst die 3D-Navier Stokes Gleichungen innerhalb dieses zusammenhängenden 3D-Maschennetzes unter Berücksichtigung der ausgesparten Hindernis-Strukturen.

Mit dem definierten 3D-Maschennetz aus der GASFLOW Eingabe sowie den eingegebenen Hindernissen und Wänden, die die Containmentstrukturen für die GASFLOW Analyse definieren, erstellt ein Auswerteprogramm automatisch eine 3D-Facetten Eingabe für das CAD Programm KISMET [2.3], das im Forschungszentrum Karlsruhe entwickelt wurde. Ein so erstelltes anschauliches 3D-GASFLOW Geometriemodell, das im Anhang noch genauer beschrieben wird, wird in Abb. 2.2 als 3D-KISMET Bild gezeigt. Dargestellt wird ein unten abgeschnittenes Kugelsegment mit einem Radius von 28 m und einer Höhe von 51 m. Die im Bild dargestellte äußere Umrandung durch die Kugelschale ist nur angedeutet und nicht konform mit den abgestuften prismatischen Hindernissen bzw. Wänden, die die

Kugel im Rechenmodell von außen im kartesischen Netz einschließen. Man erkennt oben den Kuppelraum und den Rundlaufkran mit den Kranträgern. Darunter sieht man rechts und links die beiden Dampferzeugertürme und den Trümmerschutzzylinder. Dampferzeugertürme und Trümmerschutzzylinder trennen die sog. Anlagenräume mit den Dampferzeugern und Pumpen, die während des Reaktorbetriebs nicht begehbar sind, von den jederzeit zugänglichen Betriebsräumen. Berstfolien oben auf den Dampferzeugertürmen und auch Türen unten im Bereich des Trümmerschutzzylinders öffnen beim Unfall durch den Überdruck, der beim Abblasen des Zweiphasen Gemischs aus Dampf und Wasserstoff entsteht. Dadurch entstehen neue Verbindungswege zwischen Anlagen- und Betriebsräumen, über die sehr rasch ein Druckausgleich stattfindet und entlang denen sich eine Zirkulation im Containment aufbaut.



Freies Gasvolumen		m ³	69792
Einbauten	Betonfläche	m ²	31140
	Stahlfläche	m ²	17485
Kugelschale	Innenfläche	m ²	7919

Abb. 2.2. GASFLOW Geometriemodell für GKN- 2 mit Rekombinatoren (3D Kismet Darstellung)

In dem Übersichtsbild in Abb. 2.2 sind grün auch 5 von den 62 Rekombinatorboxen erkennbar, die an verschiedenen Stellen des Containments angebracht wurden. Zwei Rekombinatoren erkennt man in der Kuppel einen davon auf der Außenseite der Kran-träger, zwei stehen unten auf dem Betriebsdeck. Einer ist ganz unten im Bereich des Rohrkanals erkennbar. Die detaillierten Koordinaten, an denen die verschiedenen Rekombinatoren für diese Analysen positioniert wurden, sind im Anhang zusammengestellt. In dem 3D-KISMET Bild des GKN Containments werden für die Ergebnisauswertung später auch Isoflächen (Wolken) aus den GASFLOW Analysen abgebildet. Es bildet ein aus verschiedenen Blickwinkeln und mit beliebigen Schnitten ansehbares Koordinatensystem für die 3D-Visualisierung der Ergebnisse.

2.3.1. Anpassung der Strukturflächen an die Anlagendaten

Das mit der ursprünglichen Eingabe berechnete freie Gasvolumen innerhalb der Kugelschale lag nach Abzug der Volumina aller Hindernisse bei 71000 m^3 . Es wurde durch eine geringfügige homogene Herunterskalierung des Maschennetzes so verkleinert, daß das vorgegebene tatsächliche Gasvolumen von ca. 70000 m^3 noch besser angenähert wurde. Addiert man die Oberflächen der Strukturen, wie sie sich aus den Oberflächen der Wände und Hindernisse als Summe der betroffenen kartesischen Zellflächen ergeben, dann kommt man auf eine gesamte Strukturfläche von 49200 m^2 . GASFLOW verwendet diese Flächen im Normalfall direkt als Strukturflächen für den Wärmeaustausch. Den Strukturen werden in der Eingabe Dicken und Materialien zugeordnet, die außer ihren Oberflächen auch ihre Wärmeleitung und Wärmekapazität für das 1D-Wärmeleitmodell festlegen. Die aus dem Maschennetz berechneten Oberflächen der eingegebenen Strukturen stimmen aber nicht exakt mit den bekannten Flächen und Verteilungen von Wärmekapazitäten überein, die von der GRS für die Anlage ermittelt wurden. Diese Anlagendaten, die auch Details wie Rohrleitungen und Gitterroste berücksichtigen, werden im RALOC Modell direkt dem jeweiligen Modellraum zugeordnet. Die GASFLOW Eingabe wurde erweitert für die nachträgliche Korrektur der Strukturflächen der verschiedenen Materialien Beton und Stahl. GASFLOW erlaubt auch die Eingabe volumetrischer Wärmesenken als Quadratmeter Struktur je Kubikmeter Zellvolumen,

wobei Strukturen für verschiedene Materialien und Dicken definiert werden können, die kein Volumen im Strömungsfeld beanspruchen. Solche volumetrischen Wärmesenken liegen raumweise gemittelt als Eingabe für den Lumped Parameter Code RALOC vor. Für die Stahlstrukturen wurden sie raumweise von RALOC in die GASFLOW Eingabe übernommen. Die Oberflächen der eingegebenen Hindernisse und Wände aus Beton wurden in der Summe mit einem Skalierungsfaktor an die Anlagendaten angepaßt. Die Innenfläche der Stahlkugel wurde exakt aus der Projektion der kartesischen Fluidzellen am Kugelrand auf die Kugelfläche bestimmt und den jeweiligen Fluid Nodes als Wärmeaustauschfläche zugeordnet. Die in den Rechnungen verwendeten korrigierten Gesamtflächen der Beton- und Stahlstrukturen und die Kugelinnenfläche, die in GASFLOW simuliert wird, sind unten in Abb. 2.2 angegeben und stimmen mit den Anlagendaten überein. Die Oberflächen der Stahleinbauten wurden als volumetrische Wärmesenken raumweise aus der RALOC Eingabe übernommen und heterogen in zusammenhängenden Zonen innerhalb der Räume angeordnet.

2.3.2. Definition von Containmenträumen Im 3D-GASFLOW Modell

Für die Übernahme der Wärmekapazitäten und auch zur Kondensation und übersichtlicheren Auswertung der GASFLOW Ergebnisse wurde das 3D-Containmentmodell in insgesamt 106 Räume aufgeteilt. Die Raumaufteilung erfolgte dabei in möglichst enger Anlehnung an die RALOC Raumdefinition von GKN- 2. Die insgesamt 106 RALOC Räume, mit denen der Bereich innerhalb der Stahlschale des GKN Containments in der RALOC Analyse simuliert wird, wurden mit einem grafischen Eingabeprogramm [2.4] in jedem der im Anhang dargestellten horizontalen Schnitte markiert und dann als Summe über alle vertikalen Zellschichten im Hinblick auf Material und Oberflächen der darin enthaltenen Strukturen ausgewertet. Die im Anhang angegebene Tabelle listet die integral an die Anlagendaten angepaßten Beton-, Stahl- und Kugelflächen des GASFLOW Geometriemodells für jeden Raum und vergleicht sie mit den entsprechenden Raumdaten des RALOC Modells. Deutlich wird, daß die GASFLOW Raumdaten (Volumen, Stahl-, Beton-, und Kugelflächen) trotz integraler Übereinstimmung nicht überall in exakte Übereinstimmung mit den RALOC Raumdaten gebracht werden konnten. Die in GASFLOW bestimmten Raummittelwerte sind aber eine hinreichend gute Grundlage für den Vergleich von den GASFLOW mit den RALOC Ergebnissen. Die im GASFLOW Modell mar-

kierten RALOC Räume werden direkt anhand der GASFLOW Eingabe mit einem speziell entwickelten Visualisierungsprogramm [2.4] zusammen mit anderen wichtigen Informationen dargestellt (s. Anhang).

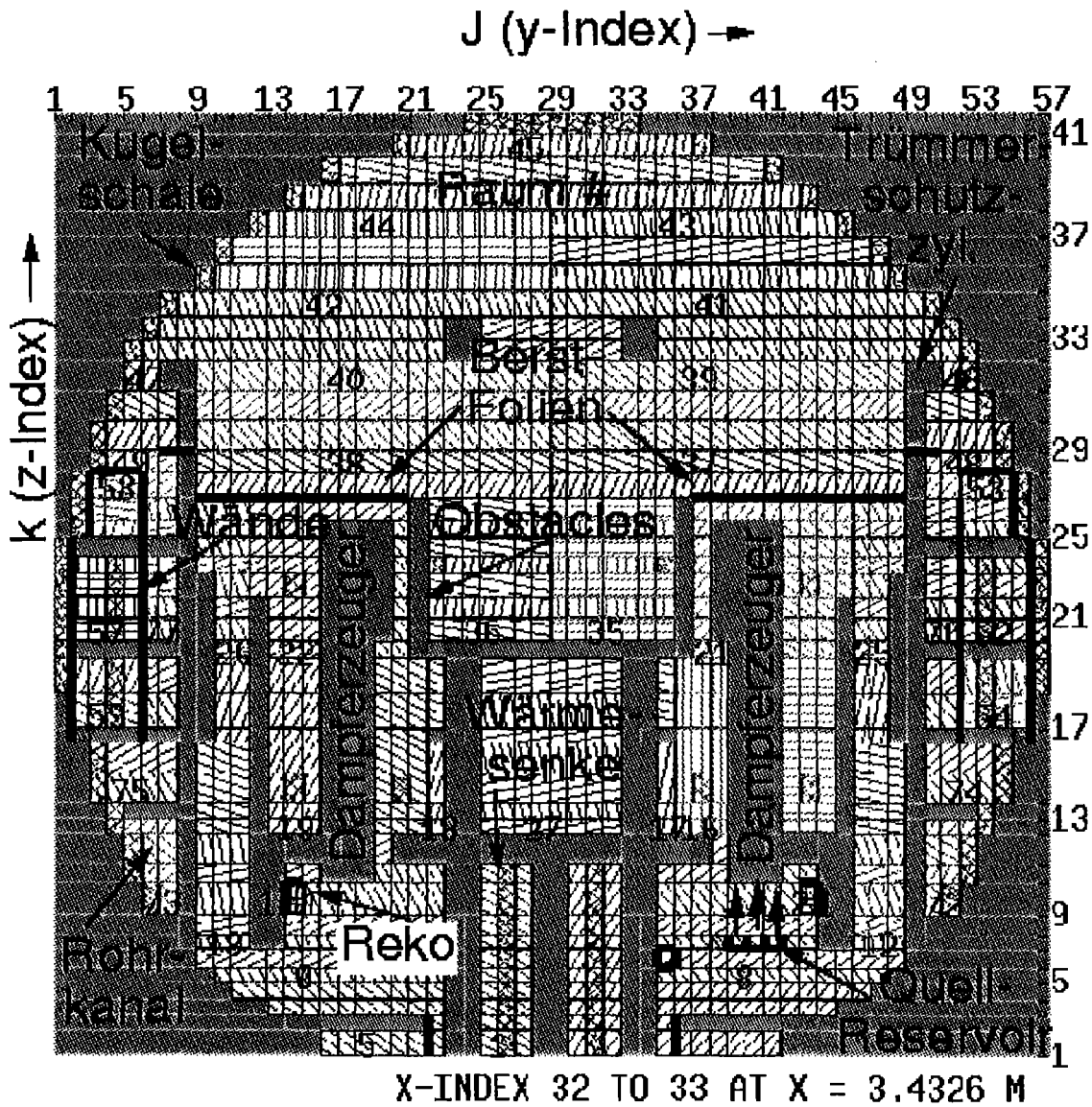


Abb. 2.3. Containmenträume im 3D GASFLOW Modell für GKN- 2 (Beispiel einer DISPGRID Ausgabe)

Ein Vertikalschnitt aus dieser Darstellung mit den Nummern der definierten Containmenträume wird beispielhaft in Abb. 2.3 gezeigt. Der Schnitt geht durch die Dampferzeuger mit den Dampferzeugertürmen und zeigt auch den Quellort im Raum 8, aus dem der Abblasevorgang erfolgt und später auch der Wasserstoff freigesetzt wird. Grau dargestellt sind die Hindernisse, die die Containmenteinbauten aber

auch die treppenförmig eingegebene Kugelumrandung definieren. Gekennzeichnet ist auch der Trümmerschutzzylinder, der die Anlagenräume von den Betriebsräumen trennt. Rot eingetragen sind die eingegebenen Wände, die selbst kein Strömungsvolumen einnehmen, aber Strukturen darstellen, die voll am Wärmeaustausch teilnehmen. Grün schraffiert eingetragen sind einige der verteilten Wärmesenken für die Stahleinbauten, die raumweise von RALOC übernommen wurden und mangels genauer Kenntnis ihrer Lage vertikal in den entsprechenden Räumen als zusammenhängende Bereiche angeordnet wurden. Rot erkennbar sind auch die Wände von 2 Rekombinatorboxen, die mit speziellen Schraffuren dargestellt werden.

Berstscheiben sind blau eingetragen. Die meisten befinden sich oben in den Dampferzeugertürmen. Als Versagensschwelle werden Druckdifferenzen von 48, 40, 32 und 24 mbar, bei Türen noch etwas höhere Werte verwendet. Die Versagensschwellen der Berstfolien in den Dampferzeugertürmen sind annähernd gleich und symmetrisch über die verschiedenen Folien verteilt. Nicht sichtbar in dem dargestellten Schnitt sind die Berstfolien, die eine Verbindung zwischen Anlagen- und Betriebsräumen durch den Trümmerschutzzylinder freigeben können. In dem GASFLOW Geometriemodell liegen diese Folien, die beim untersuchten Unfall versagen, unten im Bereich des sog. Rohrkanals .

Nach dem Versagen der Berstfolien bauen sich Zirkulationswege durch die Dampferzeugertürme und dann seitlich durch die Treppenhäuser und den Rohrkanal (Räume 72 und 73) auf, die die Atmosphäre in den Anlagen- und Betriebsräumen vermischen. Sie gehen vom Quellraum 8 nach oben durch die Raumketten 16 und 21 im Dampferzeugerturm und dann durch die Raumketten 37, 39, 41, 43 und 45 nach oben zur Kuppel. Spiegelbildlich sind auch die Raumketten 44, 42, 40 und 38 mit geraden Zahlen über dem quellfernen Dampferzeugerturm zu erkennen, über die sich die Zirkulation nach unten z.T. wieder schließen kann. Jeder definierte RALOC Raum oberhalb der Dampferzeugertürme im Dom hat zwischen 1000 und 3000 m³ Volumen, die in GASFLOW durch etwa 2000 Zellen beschrieben werden. Die Anlagenräume wurden in Kontrollvolumina (Räume 5 - 26) mit kleinerem Volumengewicht aufgeteilt. Die Volumina aller definierten Containmenträume sind in

Abb. 2.4 dargestellt und dokumentieren z.T. starke Schwankungen. Die Räume 76 und 77 in mittlerer Höhe des Ringraums zwischen Kugelschale und Stahlschale haben das größte Volumen. GASFLOW wertet die mittleren und die lokal maximalen Wasserstoff- und Dampfkonzentrationen sowie Temperaturen für jeden der 106 markierten Containmenträume im Sekundenabstand aus. Diese Werte sind direkt mit RALOC Ergebnissen der entsprechenden Räume vergleichbar. Sie werden in Abschnitt 3 detailliert gegenübergestellt. In jedem Raum wurde auch je ein Sensor definiert zur Aufnahme der berechneten lokalen Dampf-, Wasserstoff- und Spaltproduktkonzentrationen, sowie Temperaturen. Sensoren wurden auch am Eingang und in der Mitte jedes Rekombinators angebracht. Die berechneten Daten (Wasserstoff-, Sauerstoff-, Dampfkonzentration am Eintritt und Temperatur in der Box) erlauben die Aufschlüsselung des Wasserstoffabbaus auf die einzelnen eingesetzten Rekombinatoren.

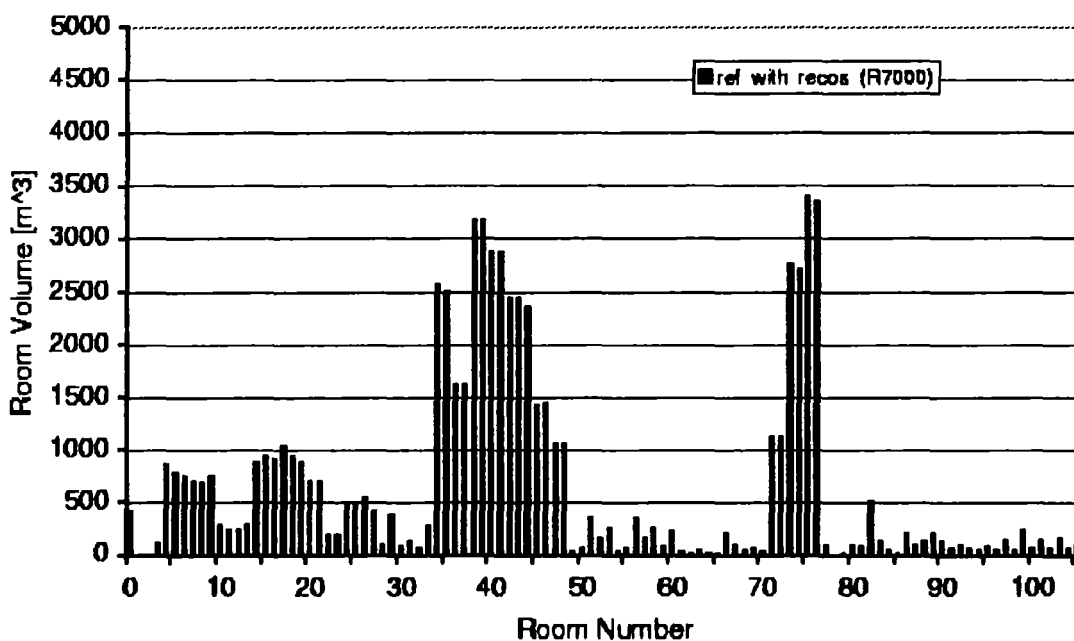


Abb. 2.4. Volumina der im GKN- 2 GASFLOW / RALOC Modell definierten Containmenträume

Die Quellposition befindet sich im Raum 8 unterhalb des Dampferzeugers. Die Gaszusammensetzung und die Zustände in diesem Quellraum wurden aus den MELCOR Rechnungen der GRS (wie in RALOC) übernommen. Die Einspeisung des Quellgemischs in das Containment erfolgt durch die Vorgabe einer Geschwindigkeitsrandbedingung an der oberen Begrenzung des Reservoirs. Eine genaue

Darstellung der Injektionsgeschwindigkeit ist auch wegen zu erwartender Umlenkungen des Quellgases nicht erforderlich. Zur Vermeidung sehr kleiner Zeitschritte durch die Courant Bedingung wurde der Einblasevorgang über einen Austrittsquerschnitt mit 9 Zellen und insgesamt 9 m² Öffnungsquerschnitt verteilt. Nachrechnungen des HDR Blowdown-Experiments T31.5 mit sehr unterschiedlichen Ablasequerschnitten [2.5] zeigen auch bei dem starken Blowdown in diesem Experiment nur geringe Unterschiede in der Gasverteilung, da diese überwiegend durch Auftriebseffekte bestimmt wird.

Literatur

- 2.1. J. R. Travis, J. W. Spore, P. Royl et al.: "GASFLOW: A Three-Dimensional Finite-Volume Fluid Dynamics Code for Calculating the Transport, Mixing, and Combustion of Flammable Gases and Aerosols in Geometrically Complex Domains", gemeinsamer Bericht Forschungszentrum Karlsruhe und Los Alamos National Laboratory (FZKA-5994, NUREG/CR-6570, LA-13357-MS) in Vorbereitung
- 2.2. J. R. Travis: "GASFLOW Geometric Modeler and Mesh Translation Algorithms", Arbeitsbericht FZK, 14. November 1997
- 2.3. U. Kühnapfel et al., FZK-Nachrichten 2-3/96
- 2.4. H. Rochholz: "Speakeasy-tool as a grafic preprocessor for GASFLOW", INR-1959, June 9, 1997
- 2.5. P. Royl, C. Müller, J. R. Travis, T. Wilson: "Validation of GASFLOW for Analysis of Steam/Hydrogen Transport and Combustion Processes in Nuclear Reactor Containments," Procs 13th Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology, August 13-18, 1995 Porto Alegre, RS, Brazil

3. ERGEBNISSE UND INTERPRETATION

Mit dem dokumentierten GASFLOW Geometriemodell von GKN- 2 wurden die Dampf-/Wasserstofffreisetzung und Verteilung im Containment nach einem postulierten Kühlmittelverlustunfall mit tief liegendem großen Leck untersucht. Dieser Abschnitt dokumentiert und interpretiert die Ergebnisse der durchgeführten Simulationen und vergleicht sie mit entsprechenden RALOC Simulationen, bei denen das gleiche Unfallszenario betrachtet wurde. Der Quellterm für diese Untersuchungen wurde direkt aus der RALOC Eingabe übernommen. Er wird am Anfang detailliert erläutert. Zu den dargestellten Ergebnissen gehören zunächst eine Massen- und Energiebilanz für die GASFLOW Rechnung. Es folgt eine Erläuterung des berechneten Druckverlaufs und des Versagensmusters der Berstscheiben über den DE-Türmen, das sich gleich am Anfang durch die komplexe Druckwellenausbreitung beim Blowdown ergibt. Wichtige Zirkulationspfade werden anhand einer Momentaufnahme des berechneten Geschwindigkeitsfeldes identifiziert. Es folgt eine Diskussion der resultierenden Dampf- und Wasserstoffkonzentrationen und der Beaufschlagung der katalytischen Rekombinatoren in dem dreidimensionalen Wasserstoff/Dampf- Konzentrationsfeld. Der berechnete Wasserstoffabbau wird detailliert für alle Rekombinatoren aufgeschlüsselt und integral mit den RALOC Ergebnissen verglichen [3.4, 3.5]. Starke Vermischungsvorgänge entstehen nach den verschiedenen Einspeiseperioden und führen am Ende immer zu einer recht homogenen Beaufschlagung der Rekombinatoren. Die transienten Wolkenbildungen, auch die sich kurzzeitig ausbildende zündfähige Wolke und die Mechanismen für diese Vermischungen werden dokumentiert. Für wichtige Mechanismen, insbesondere den Einfluß der Dampfkondensation, wurden auch Sensitivitätsstudien durchgeführt. Sie sichern die Aussage der raschen Vermischung ab, die sich bei allen GASFLOW Analysen ergibt, und werden in einem separaten Abschnitt dargestellt. Am Ende werden Schlußfolgerungen aus den Ergebnisdiskussionen und aus dem Vergleich mit den RALOC Simulationen gezogen [3.4, 3.5].

3.1. Quelldaten

Die Quelle, die den GASFLOW Analysen von GKN- 2 zugrundegelegt wurde, simuliert einen Kühlmittelverlustunfall mit großem Leck im kalten Strang durch den Abriß

der Volumenausgleichsleitung zum Druckhalter am Eintrittsstutzen zur Primärkreisleitung (Surge Line LOCA). Die Quellen für Masse und Energie (Wasser, Dampf, Wasserstoff, Spaltprodukte) und die Quellenthalpien (Abb. 3.1) wurden von der GRS mit dem Integralcode MELCOR 1.8.3 berechnet und für die GASFLOW-Rechnung direkt aus dem entsprechenden Eingabedatensatz der GRS-RALOC Analysen übernommen. Die insgesamt in GASFLOW simulierte Problemzeit beträgt 7000s.

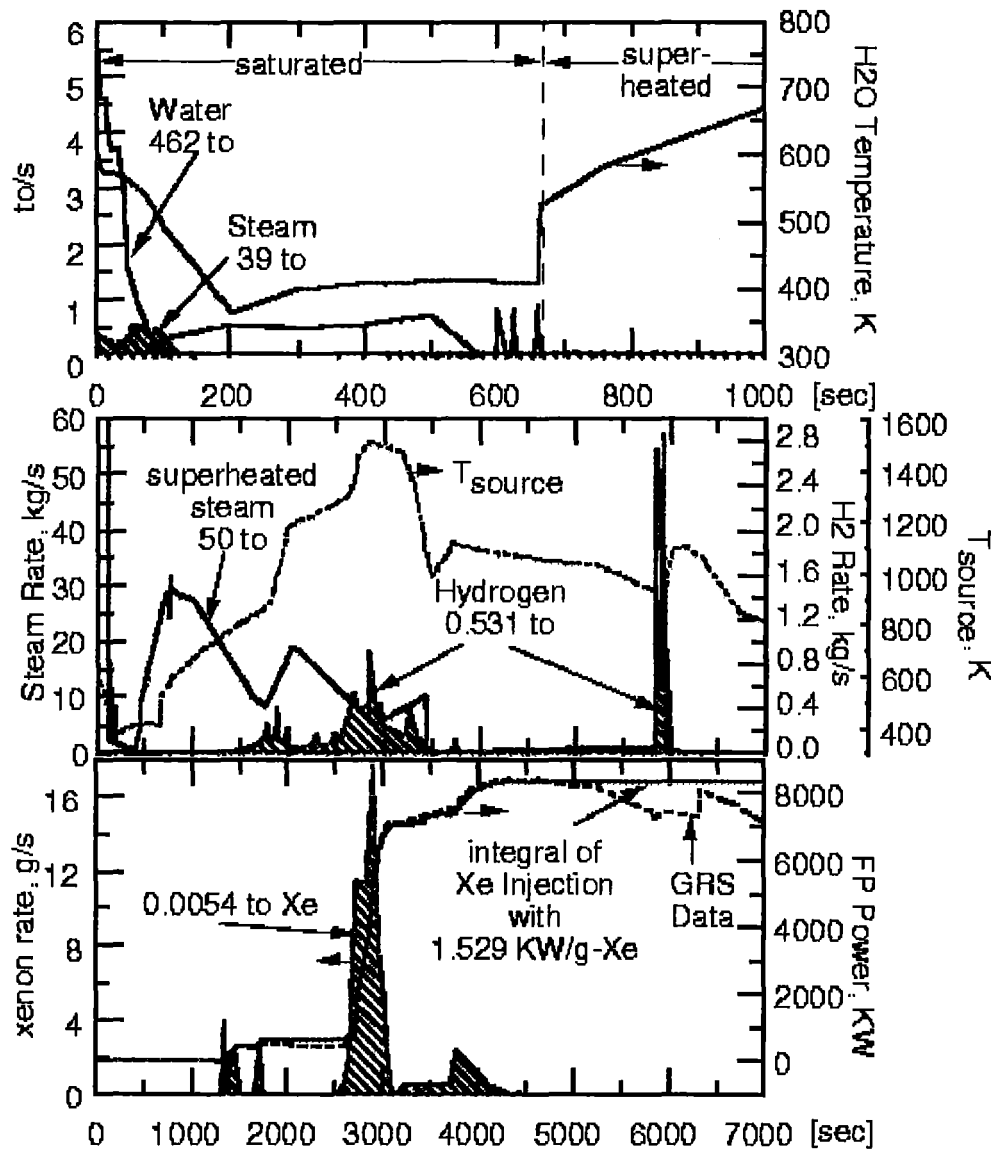


Abb. 3.1. Quellterm für die GASFLOW Simulation des Surge Line LOCA in GKN-2 (definiert mit RALOC Eingabe)

In den ersten 700 s werden 462 to Wasser und 39 to Dampf als 2-Phasengemisch eingespeist. Durch Nachverdampfung bei der isenthalpen Expansion des 2 Phasengemischs auf den transienten Containmentdruck erhöht sich die Dampf einspeisung

noch um 50 to. Oberhalb von 700 s wird nur noch überhitzter Dampf, insgesamt 50 to eingespeist, dann aber mit sehr viel niedrigeren Raten als beim Blowdown. Die Gastemperaturen in der Quelle steigen nach den MELCOR- Ergebnissen auf maximal 1500 K. Insgesamt kommen mit 139 to Dampf über 2 mal mehr Normkubikmeter Dampf in das Containment als die verfügbaren 70.000 m³ an freiem Gasvolumen.

Die Wasserstoffeinspeisung (schraffiert dargestellt) beginnt bei 1400 s. Insgesamt gelangen 531 kg Wasserstoff (6000 Nm³) in das Containment. Davon werden allein 120 kg in dem letzten scharfen Puls bei 5900 s freigesetzt, der durch die verstärkte Wasserstoffbildung und Dampffreisetzung nach dem Kernabsturz entsteht. Wichtig ist, daß der Wasserstoff nie allein sondern immer zusammen mit einem hohen Dampfanteil eingespeist wird. Das wird mit den auf Dampf und Wasserstoff aufgeschlüsselten molaren Einspeiseraten in Abb. 3.2 verdeutlicht. Die Dampfeinspeisung beim Kernabsturz geht auch noch über die Wasserstoffeinspeisung hinaus. Sie erzeugt eine zusätzliche Spülwirkung und Vermischung am Ende der Wasserstoffeinspeisung, obwohl sie in der Zeitskala des Quellterms kaum erkennbar ist. Die Spaltproduktwärmequellen werden bezogen auf die Dichte eines fiktiven Spurengases Xenon, das in geringen Mengen freigesetzt wird und sich mit den anderen Gasen im Containment verteilt. Die Einspeiserate wurde aus dem zeitlichen Verlauf der Spaltprodukt-heizleistung so bestimmt, daß integral die in RALOC verwendeten 8 MW Leistung der gasförmigen Spaltprodukte zugeführt wird. Das Abklingen der Nachwärmequellen durch den radioaktiven Zerfall wurde in dem untersuchten Zeitraum vernachlässigt.

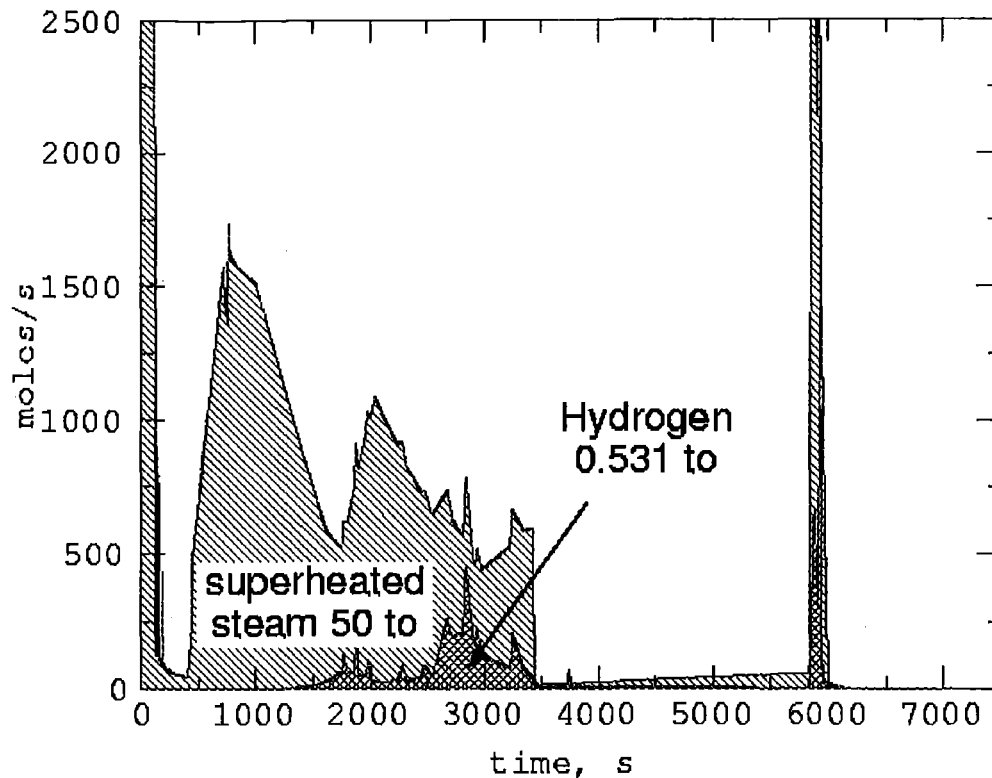


Abb. 3.2. Zusammensetzung der Dampf/Wasserstoffquelle beim analysierten Surge Line LOCA

3.2. Übersicht über durchgeführte GASFLOW Simulationen

Mit dem zuvor diskutierten Quellterm erfolgte zunächst eine Simulation in dem Geometriemodell mit 144652 Rechenzellen, in dem Stahlschale, Ringspalt und Betonschale noch vereinfachend mit dem eingangs beschriebenen Mehrschichten-Wärmeleitmodell beschrieben werden. Die Rechnung

Tab. 1 Fallmatrix und Rechenzeiten für die GKN Analysen mit GASFLOW

Case #	Parameters	Gasflow Version	Diffusion	Meshpoints	VPP CPU days
1	Composite layer for steel shell, gap+concrete shell	Dez 97	yes	144652	8.8
2		Apr 98	yes		4.6
3			van Leer		6.6
4	Full gap simulation steel+concrete shell	Apr 98	yes	184320	7.4
5			algebr. Turbul.		7.5
6			no		6.4

wurde im Dezember 1997 durchgeführt und benötigte noch 8.8 d CPU Zeit mit einem Prozessor auf der VPP des Forschungszentrums bei einem Speicherplatzbedarf von 500 Mbyte (s.Tab.1). Inzwischen wurden die Vektorisierung von GASFLOW und das Zeitschrittschema weiter überarbeitet. Die verbesserte GASFLOW Version vom April 98 benötigt für die gleiche Rechnung nur noch 4.6 Tage. Bei Verwendung des van Leer Differenzenverfahrens höherer Ordnung, das die numerische Diffusion begrenzt, kommt man nach dem Kernabsturz kurzzeitig zu ein wenig höheren Wasserstoffspitzen (16 statt 14 Vol%). Integral ergeben sich damit keine wesentlich anderen Ergebnisse. Der Preis für diese etwas höhere Genauigkeit ist aber ein 50% höherer Rechenzeitbedarf. Das van Leer Verfahren wurde daher bei den anderen Untersuchungen nicht verwendet.

Der Kühleffekt der Gaskonvektion im Ringspalt wurde bei den ersten Simulationen durch ein Mehrschichten-Wärmeleitungsmodell nur näherungsweise erfaßt. Zur genaueren Berücksichtigung dieses Kühleffekts wurde parallel auch ein erweitertes Geometriemodell entwickelt, in dem der Ringspalt mit 3 zusätzlichen Fluidzellen auf jeder Seite beschrieben wird, mit einer beidseitig gekühlten Stahlschale und einer äußeren Betonschale, die nach außen zu adiabatisch mit einer thermischen Dicke von 28 cm simuliert wird, was für die vorliegende kurze Simulationsdauer ausreichen ist.

Mit der Ringspaltsimulation in dem auf 184300 Zellen vergrößerten Geometriemodell erhöht sich die erforderliche CPU Zeit für den Surge Line LOCA um 60% auf 7.4 Tage. Es zeigte sich, daß die Modellierung der Konvektion im Ringspalt im Simulationszeitraum von 7000s zu praktisch gleichen Ergebnissen führt. Die Ergebnisse des einfacheren Modells werden dabei mit der erweiterten GASFLOW Nodalisierung bestätigt. Das einfache Geometriemodell mit der Mehrschichten-Wärmeleitung im Ringspalt ist also für den Surge Line LOCA gleichwertig. Für die Simulation längerer Problemzeiten insbesondere auch bei mildereren Szenarien ist das erweiterte Geometriemodell mit der Ringspaltsimulation zwingend, wobei dann auch der Einfluß des Strahlungswärmeaustausches zwischen Stahl- und Betonschale bedeutsamer werden kann. Alle Simulationen berücksichtigten zunächst nur die molekulare und thermische Diffusion durch den Aufbau von Gradienten. Mit dem Ringspaltskonvektionsmodell wurden noch 2 weitere Simulationen durchgeführt. Im Fall 5 wurde die turbulente Diffusion durch das algebraische Turbulenzmodell in GASFLOW berücksichtigt, im Fall 6 wurde zum Vergleich auch die gesamte Diffusion unterdrückt, was die Rechenzeit noch einmal um einen Tag verringerte, die Ergebnisse aber auch praktisch nicht veränderte.

Alle in Tabelle 1 aufgeführten Simulationen mit den verschiedenen Modellvariationen sind vom Ergebnis her praktisch gleich. Nachfolgend werden im Detail nur die Ergebnisse für den Fall 1 dargestellt.

3.3. Massen- und Energiebilanz

Die Massen und Energien bei den GASFLOW Analysen für den Fall 1 sind in Abb. 3.3 für den gesamten Analysezeitraum bilanziert. Man erkennt die insgesamt 551 to Wasser und Dampf, die bei diesem Unfall eingespeist werden. Wasser wird zunächst mit dem eingespeisten Dampf in einem homogenen 2-Phasenmodell beschrieben, als Nebel mitgetragen und dann mit einer Zeitkonstante von 100s nach Erreichen von thermodynamischem Gleichgewicht zwischen Dampf und Wasser ausgerechnet. Insgesamt treten bei diesem Modell 412 to Regen auf. Der Energiegehalt dieses Regens wird in den GASFLOW Analysen nicht weiter berücksichtigt. Durch Dampfkondensation lagern sich ca. 100 to Wasserfilm auf den Strukturen ab.

Die Kondensationswärme bei der Filmablagerung heizt die Strukturen auf. Ein vergleichsweise kleiner Massenanteil bleibt als Dampf im Gasfeld.

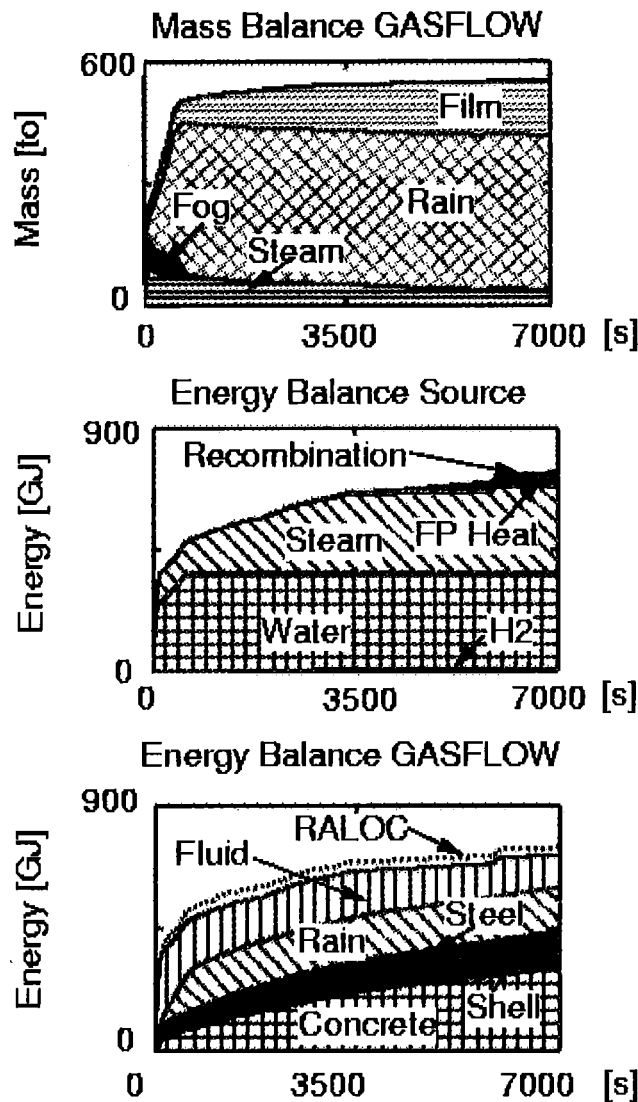


Abb. 3.3. Massen- und Energiebilanz beim Surge Line LOCA in GKN-2

Der Enthalpieeintrag aus der Quelle relativ zu einem isothermen Containment von 300K wird im mittleren Teil von Abb. 3.3 aufgeschlüsselt. Die meiste Enthalpie kommt mit dem Wasser, sehr viel aber auch mit dem Dampf in das System. Verglichen mit der Quellenthalpie sind die Energiefreisetzen durch die gasförmigen Spaltprodukte und durch die Rekombinationsenergie sehr klein.

Die gespeicherte Energie in den Strukturen ist zum großen Teil die Wärme, die durch Filmkondensation freigesetzt wird. Sie wird in GASFLOW exakt integriert und

ist unten in Abb. 3.3 aufgeschlüsselt nach Betonwänden, Stahlstrukturen und Kugelschale dargestellt. Fast 50% der zugeführten Enthalpie werden im betrachteten Zeitraum in den Betoneinbauten innerhalb der Stahlschale gespeichert. Die Stahlschale hat ca. 10% der zugeführten Energie, die Stahleinbauten wegen ihrer vergleichsweise geringen Wärmekapazität nur relativ wenig (5%) gespeichert. Der Enthalpiegehalt des Gases im Fluidfeld ist vertikal schraffiert eingetragen, darunter schräg schraffiert die Enthalpie des Wassers. Die Wasserenergien können in GASFLOW aber nur zum Zeitpunkt des Ausregnens und der Filmkondensation bilanziert werden. Alle Energieterme summieren sich gut auf zur gesamten Quellenthalpie von 800 GJ, die im untersten Bild gestrichelt überlagert angegeben ist.

3.4. Druckverlauf

Der Containmentdruck erreicht in der ersten Blowdown Phase ein Maximum von 3.7 bar (Abb. 3.4).

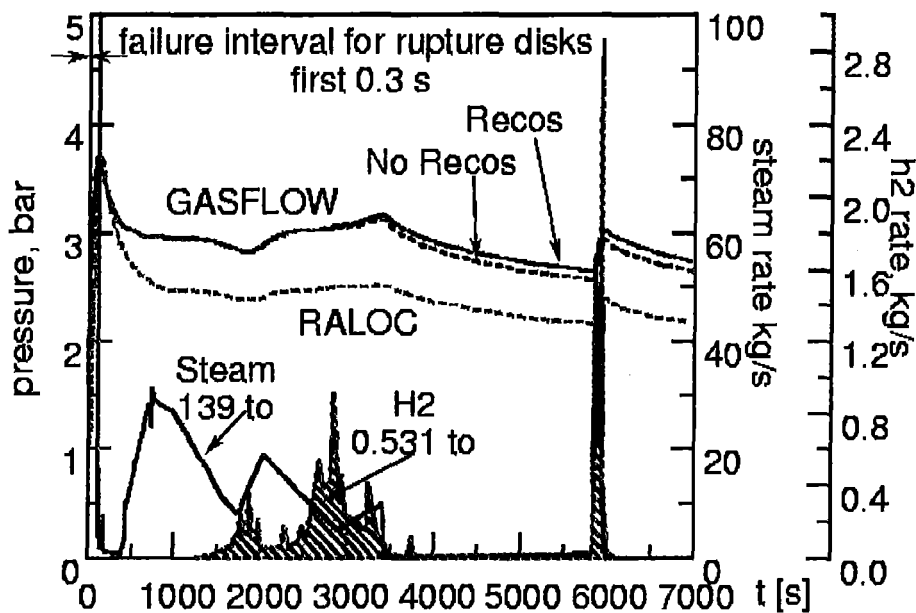


Abb. 3.4. Druckverlauf mit und ohne Rekombinatoren und Vergleich mit RALOC

Das Maximum wird durch den thermodynamisch bestimmten isenthalpen Expansionsvorgang mit Nachverdampfung beim Blowdown bestimmt. Diese isenthalpe Expansion wird in GASFLOW und RALOC auf die gleiche Weise simuliert und führt auch zum gleichen Druckmaximum. Der Druck fällt danach aber nicht so stark ab wie in RALOC und liegt langfristig mit 2.7 bar um 0.3 bar über dem RALOC Wert.

Mit Rekombinatoren wird nach Beginn der Wasserstoffeinspeisung ein etwas höherer Druck als ohne Rekombinatoren berechnet. Offenbar dominiert der Einfluß der freigesetzten Rekombinationsenergie gegenüber der abnehmenden Zahl an Gasmolen bei der Wasserstoffrekombination.

Die höheren Drücke aus GASFLOW, relativ zu RALOC, könnten eine Folge der in GASFLOW heterogen verteilten Wärmesenken mit längeren Transportwegen als bei den homogen verteilten Wärmesenken in RALOC sein. Die RALOC Räume haben z.T. Abmessungen von 10 m und mehr. Sie werden in GASFLOW mit 1000 bis 3000 Zellen dargestellt, durch welche die Wärme erst transportiert werden muß, ehe sie die Strukturen am Rand erwärmt. Eine Vergleichsrechnung mit GASFLOW für das gleiche freie Gasvolumen mit dem gleichen Quellterm, in der die gleichen Wärmesenken wie im Fall 1 homogen über das Rechengebiet verteilt wurden, führt auch zu niedrigeren Drücken, die näher bei den RALOC Drücken liegen und die die oben genannte Vermutung stützen. Die gemeinsamen Diskussionen haben ergeben, daß die Drücke in RALOC und GASFLOW sich insbesondere während der Einspeisung von Dampf in das Containment leicht unterscheiden. Mögliche Ursachen für diesen Effekt könnten neben der unterschiedlichen Behandlung der Wärmesenken (homogen in RALOC, heterogen in GASFLOW) auch die Filmbehandlung, die Dampfkondensationsrate, Strahlungsverluste aus dem heißen Dampf sein, sowie Modellunterschiede in der Behandlung der Wasserphase (Wassertransport an den Strukturoberflächen und Sumpfmmodell). Die korrekte Numerik der RALOC Modellierung konnte mit einer MELCOR-Kontrollrechnung nachgewiesen werden. Es ist daher zu vermuten, daß der gefundene Druckunterschied auf verschiedenen physikalischen Modellen zum Dampfverhalten beruht. Zur definitiven Klärung der Druckunterschiede müßten eingehende Vergleichs- und Sensitivitätsstudien mit beiden Programmen durchgeführt werden, die aber einen unverhältnismäßig großen Aufwand erfordern würden. Die gefundene Druckabweichung von etwa 10% zwischen RALOC und GASFLOW kann als eine durchaus akzeptable Abweichung bewertet werden.

Da die Wirksamkeit der Rekombinatoren druckabhängig ist, geht dieser Unterschied

als einer von mehreren Faktoren in den Vergleich der integralen Rekombinatorleistungen ein.

3.5. Versagen der Berstfolien

Das Versagen der Berstfolien ist bei dem untersuchten Blowdown Vorgang innerhalb der ersten 0.3 s abgeschlossen. Danach gleicht sich der Druck sehr rasch im Containment aus und es kommt zu keiner weiteren Versagenspropagation. Die Versagensschwellen der Berstfolien auf den Dampferzeugertürmen wurden gleichmäßig in vier Gruppen mit Schwellwerten von 24, 32, 40 und 48 mbar verteilt. Das Versagen der Folien im quellnahen Dampferzeugerturm (Abb. 3.5) schafft dort eine 53 m² große Verbindungsöffnung zu den Betriebsräumen. Im quellfernen Turm versagen dagegen weniger Folien mit insgesamt nur 22 m² Öffnung (RALOC 23 m²). Eine separate Studie zum Verhalten der Berstfolien hat ergeben, daß das Versagemuster aus einer komplexen Überlagerung von Druckwellen bestimmt wird. Es hängt außer von den angenommenen Versagensschwellen auch etwas vom Zeitschritt ab. Die Türen im Treppenhaus mit den höheren Versagensschwellen von 100 mbar bleiben beim Blowdown geschlossen. Weitere 6 Berstscheiben (ca. 8 m²) versagen weiter unten im Rohrkanal und öffnen dort tief liegende Verbindungswege zwischen Betriebs- und Anlagenräumen, die für den Aufbau der Konvektionsschleife im Containment wichtig sind. Anlagen- und Betriebsräume werden nach dem Versagen der Berstfolien nur oben über die geöffneten Folien in den Dampferzeugertürmen und unten im Bereich des Rohrkanals, nicht aber im mittleren Höhenbereich des Containments verbunden.

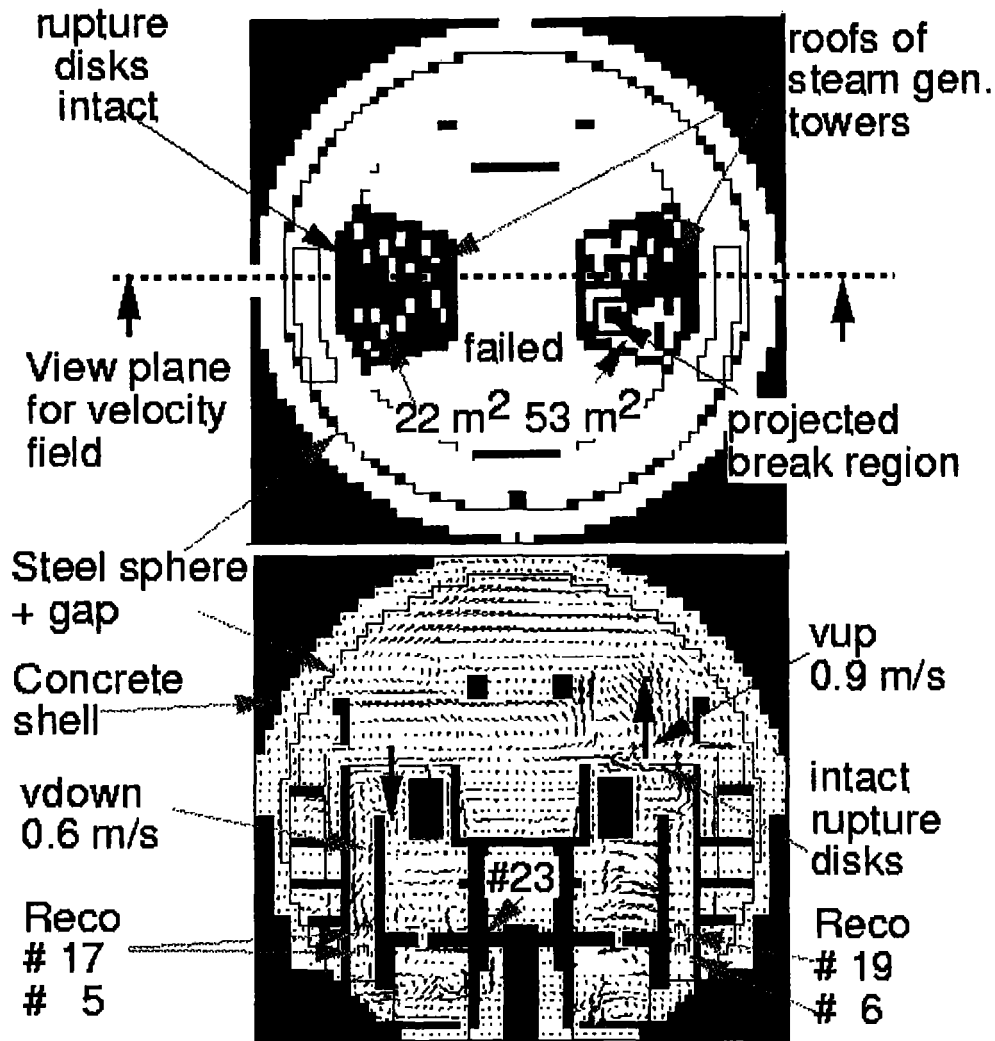


Abb. 3.5. Berstfolienversagen und Geschwindigkeitsfeld bei 6000s in Wechselwirkung mit Rekombinatoren

3.6. Geschwindigkeitsfeld

Durch Einspeisung der Gase am Bruchort bildet sich ein Geschwindigkeitsfeld im Containment aus, das unten in Abb. 3.5 beispielhaft bei 6000 s dargestellt ist. Die Lage des Vertikalschnitts, der durch die Mitte des Containments geht, ist oben in den Schnitt mit dem Versagensmuster der Berstscheiben im Dampferzeugerturm eingetragen. Deutlich sind die Einflüsse der teilweise offenen und teilweise intakten Berstscheiben auf das Geschwindigkeitsfeld oben in den Dampferzeugertürmen zu erkennen. Dargestellt ist der Fall mit dem vollen Ringspaltmodell, einschließlich der Stahlschale, dem Ringspalt und der Betonschale. Das gleiche Geschwindigkeits-

feld mit identischem Geschwindigkeitsmaximum ergibt sich für diesen Schnitt auch in dem einfacheren Fall ohne Simulation der Ringspaltkonvektion.

Die Quelle liegt unten im Node 8 bei 5.4 m Höhe, ist in Abb. 3.5 aber nicht erkennbar. Unter der Quelle wird sich bei diesem Blowdown mit großem Leck ein Sumpf ausbilden und könnte die Konvektion zusätzlich mit seiner Verdunstung verstärken, ein bisher nicht berücksichtigter Zusatzeffekt, den man in GASFLOW parametrisch mit vorgegebenen Sumpfbedingungen aus RALOC noch einbeziehen könnte [3.1]. Heiße Gase werden nach oben durch den quellseitigen Dampferzeugerturm ausgeblasen, kalte fließen dabei z.T. im quellfernen Dampferzeugerturm zurück. Der quellseitige Dampferzeugerturm entwickelt dabei einen gewissen Kamineffekt, der allerdings nur eine begrenzte Vermischungswirkung hat. Die Aufwärtsströmung erreicht 0.9 m/s, die Abwärtsströmung 0.6 m/s. Eingetragen in das Bild sind auch die Re-kombinatoren 19 und 6 und 17 und 5, die sich in den Lüftungsschächten befinden. Sie werden auf der Quellseite von unten nach oben angeströmt, quellfern dagegen von oben nach unten entgegengesetzt zu ihrer natürlichen Zugrichtung. Durch Anströmung von oben verringert sich ihre Rekombinationsrate mit dem verwendeten Modell etwas, obwohl der Einfluß der Anströmrichtung durch die Vorgabe des Rekombinatordurchsatzes mit der gemessenen Kennlinie eigentlich nicht erfaßt wird.

Das Strömungsfeld über dem Dampferzeugerturm gibt wichtige Hinweise zur Wasserstoff/Dampf-Stratifikation im Dom. Das im schon abnehmenden Quellstrahl aufsteigende Gas trifft auf Gas, das durch Kondensation an der Stahlschale absinkt. Das Gas wird umgelenkt und gelangt erst danach in den Kuppelbereich. Der Wasserstoffanteil steigt dabei noch kurzzeitig im Dom an. Nach der Wasserstoffeinspeisung führt das Wirbelfeld, das sich in der dynamischen Phase durch Taylorinstabilitäten und Strömungsumlenkungen an Hindernissen ausbildet, zu einer raschen Vermischung des mit dem Quellstrahl nach oben gekommenen Wasserstoffs und Dampfes.

3.7. Dampf-/ Wasserstoffkonzentrationen und Temperaturen

Die Dampf- und Wasserstoffverteilung sowie die Gastemperaturen werden zunächst detailliert für den Kuppelraum, dann in einer größeren Übersicht auch für alle anderen Containment Räume diskutiert. Dabei werden auch die Ergebnisse mit und ohne Rekombinatoren verglichen [3.5]. Abschließend werden ausgewählte Raumdaten auch noch tabellarisch den RALOC Ergebnissen gegenübergestellt.

3.7.1. Diskussion der Daten für den Kuppelbereich

Die Entwicklung der Containmentatmosphäre im Kuppelraum unter dem Einfluß des Geschwindigkeitsfeldes ist in Abb. 3.6 dargestellt. Das Bild zeigt den Mittelwert und das Maximum der Wasserstoffkonzentration zusammen mit den Temperaturwerten und Dampfanteilen im Raum 45.

In Abb. 3.6 bezeichnet MaxH₂ die lokale maximale Wasserstoffkonzentration aller GASFLOW- Zellen, die der RALOC- Zone 45 zugeordnet sind. AvH₂ stellt die mittlere H₂-Konzentration in allen Zellen dar, die zur Zone 45 gehören. Der zeitliche Verlauf dieses Mittelwert, wird mit den RALOC- Werten aus [3.5] verglichen.

Durchgezogen mit dicken Linien erkennt man im oberen Teil von Abb. 3.6 die Wasserstoffkonzentrationen, die sich mit Rekombinatoren ergeben. Darüber dünn eingetragen ist auch die Zündgrenze für die magere Wasserstoffverbrennung, die aus dem Shapiro Diagramm abhängig vom Dampfanteil bestimmt wird. Sie fällt von 12% (volle Dampf inertisierung für Dampfanteil >65%) auf 9% am Ende der Rechnung ab.

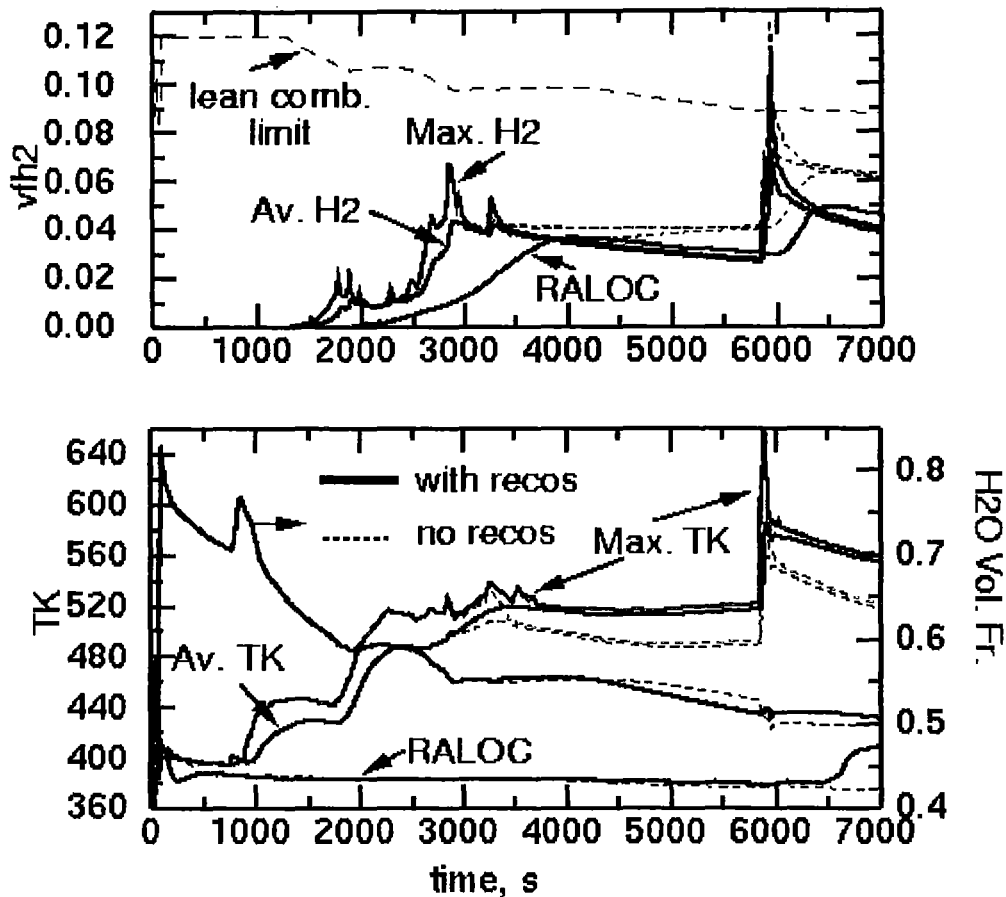


Abb. 3.6. Wasserstoff-/ Dampfkonzentrationen und Temperaturen im Domraum 45 (Vergleich mit RALOC Ergebnissen)

Die Abweichungen zwischen Maximum und Mittelwert der Wasserstoffkonzentration im Dom liegen im Maximum bei 11% gegenüber 9%. Sie treten aber nur temporär auf wegen der starken Durchmischungswirkung des Strömungsfeldes im Dom. Nach 3500 s ist der Wasserstoff aus der ersten Einspeisephase im Domraum aber auch in den anderen Räumen nahezu homogen verteilt und wird langsam durch die Rekombinatoren reduziert. Beim Kernabsturz (5900 s) entsteht noch einmal ein Wasserstoffpeak im Domraum mit einer maximalen Konzentration von 11%, die die Zündgrenze kurzzeitig überschreitet. Wie später noch gezeigt wird, liegt der zündfähige Bereich in dem Quellstrahl, der von der Quelle bis zum Dom durch den quellseitigen Dampferzeugerturm bis oben in den Dombereich vordringt. Mit nachlassender Wasserstoffzufuhr wird dieser Bereich aber rasch durch Dampf verdünnt. Die mittlere Konzentration im Dom bleibt unter 9% und ist damit nicht zündfähig. Am Ende der Wasserstoffeinspeisung nach dem Kernabsturz hält die

Dampfeinspeisung noch für kurze Zeit mit hohen Raten an. Die Dampfeinspeisung führt zu einer starken Vermischung und mit der induzierten Druckausgleichsströmung bei der Dampfkondensation erreicht man rasch homogene Zustände mit einer Wasserstoffkonzentration von rund 4%.

Die mittlere Wasserstoffkonzentration steigt bei der gezeigten RALOC Analyse aus [3.5] im Domraum wesentlich langsamer an. Sie erreicht zwar die transienten Spitzenwerte nicht, führt aber letztlich zu gleichen Endkonzentrationen wie die GASFLOW Rechnung. In der transienten Phase der Wasserstofffreisetzung haben die RALOC Ergebnisse generell die Tendenz zu kleineren Wasserstoffkonzentrationen und verlangsamten Anstiegszeiten. Dieser prinzipielle Unterschied hängt mit der instantanen Mischungsannahme in Lumped Parameter Programmen und der größeren Raumnodalisierung zusammen. Das RALOC Raummodell für GKN- 2 wurde inzwischen durch Einführung kleinerer zusätzlicher Kontrollzonen im Strahlbereich erweitert, um auch im Vergleich mit GASFLOW diese temporären Spitzen besser abzubilden. Es hat sich gezeigt, daß auch das RALOC- Programm für das vorliegende gut durchmischte Szenario vergleichbare lokale Verhältnisse berechnen und wiedergeben kann, nachdem das RALOC- Raummodell mit Kenntnis der Strömungsverhältnisse aus den GASFLOW Rechnungen entsprechend angepaßt wurde [3.6].

Dünn gestrichelt erkennt man oben in Abb. 3. 6 auch die Wasserstoffkonzentrationen, die sich ohne Rekombinatoren im Kuppelraum ergeben würden. Deutlich ist das Plateau, das sich nach der ersten Wasserstoffeinspeisung und Vermischung ohne weitere Wasserstoffreduktion ergibt. Die maximale Konzentration ohne Rekombinatoren erreicht fast 13%. Am Ende der Rechnung liegt die Wasserstoffkonzentration ohne Rekombinatoren bei 6% im Vergleich zu 4% mit Rekombinatoren. Die berechneten RALOC und GASFLOW H₂- Konzentrationen ohne Rekombinatoren stimmen nach der Vermischung gut überein.

Die mittleren und maximalen Gastemperaturen im Kuppelraum (AvTK bzw. MaxTK)

sind unten in Abb. 3.6 dargestellt, wiederum für die Fälle mit und ohne Rekombinatoren. Wie bei den Wasserstoffkonzentrationen gleichen sich Temperaturmaxima und Mittelwert durch die Vermischung nach jeder Einspeisephase an. Die maximale Gastemperatur beträgt 640 K. Sie wird durch die heißen Quellgase verursacht, die direkt zum Dom aufsteigen. Die maximale mittlere Raumtemperatur erreicht etwa 570 K und liegt am Ende bei 560 K. Sie wird stark durch die Zerfallswärme aus den luftgetragenen Spaltprodukten bestimmt, aber auch durch das Aufsteigen der Rekombinator Abgase, mit denen sich etwa 40 K höhere Werte ergeben als in der Simulation ohne Rekombinatoren. Die in RALOC berechnete Gastemperatur im Kuppelraum liegt mit 370 K um 160 K unter den GASFLOW Werten. Eine Überhitzung des Gases im Raum 45 durch die Spaltproduktwärme und die Rekombinatorabgase tritt in der RALOC Modellierung nicht auf, weil dies eine Verdampfung des Wasserfilms auf der Kugelschale, mit der dieser Raum in Kontakt steht, voraussetzt. Damit erklärt sich auch die langanhaltende Konstanz der RALOC- Temperatur nach der ersten Einspeisephase die sich erst nach dem Kernabsturz ändert. Die Temperaturstratifikation, die in GASFLOW relativ lange anhält, wird im RALOC- Modell nicht berechnet. Die niedrigere Gastemperatur in RALOC erhöht die Gasdichte im Dom und verstärkt dadurch die Zirkulation.

Mit Bezug zur rechten Skala ist unten in Abb. 3.6 auch die mittlere Dampfkonzentration im Kuppelraum eingetragen. Die Blowdown- Phase erhöht den Dampfanteil im Dom temporär auf über 80% und führt dort zu einer vollständigen Dampfinertisierung. In den unteren Räumen erreicht die Dampfkonzentration nur 60%. Der Dampfanteil nimmt nach dem Blowdown durch Kondensation rasch ab und sinkt überall auf etwa 50%. Dieser Endwert stimmt gut mit den in Abb. 3.6 aber nicht eingetragenen RALOC Ergebnissen überein. Nach dem Kernabsturz steigt der Dampfanteil noch einmal kurzzeitig an, vergleichbar mit dem Anstieg der mittleren Wasserstoffkonzentration, was aber wegen der gröberen Skala nicht erkennbar ist.

3.7.2. Raumweise Aufschlüsselung

Die berechneten maximalen und mittleren Wasserstoffkonzentrationen, die mittleren Dampfkonzentrationen und die Gastemperaturen am Ende der Rechnung werden in den Abb. 3.7 und 3.8 auch raumweise aufgeschlüsselt Schwarz dargestellt sind die Ergebnisse mit, rot die ohne Rekombinatoren. Erkennbar ist die Abnahme der maximalen Wasserstoffkonzentration im Quellstrahl entlang der Raumkette über dem quellseitigen Dampferzeugerturm zum Dom mit den Räumen 37, 39, 41, 43 und 45 von 15% auf die vorher genannten 11% Peakwerte mit Rekombinatoren. Die hohen Wasserstoffpeaks mit über 20% treten nur in den quellnahen Räumen z.B. Raum 8 auf. Diese Peaks stehen alle in zeitlichem Zusammenhang mit der Wasserstofffreisetzung nach dem Kernabsturz bei 5930 s. Am Ende bei 7000s ist der Wasserstoff überall ziemlich homogen verteilt, und es ergeben sich mittlere Wasserstoffanteile um 4% mit und um 6% ohne Rekombinatoren auch in den quellnahen Räumen. Das Gemisch ist dann mit und ohne Rekombinatoren nicht zündfähig. Zündfähige Gemische können dann auch danach durch die Abbauwirkung der Rekombinatoren nicht mehr auftreten. Ohne Rekombinatoren würde der homogen verteilte nicht brennbare Wasserstoff durch die sich fortsetzende Dampfkondensation aber irgendwann zündbar werden.

Die Dampfkonzentrationen (Abb. 3.8) liegen am Ende zwischen 40 und 50%, wobei die höheren Werte in den zum Betriebsbereich zugehörigen RALOC Räumen auftreten, die das höchste Volumengewicht und im Vergleich zum Volumen auch kleinere Kondensationsflächen haben. Mit Rekombinatoren ergeben sich erwartungsgemäß höhere Dampfkonzentrationen, wobei die Erhöhung durch die Rekombination innerhalb der Anlagenräume mit relativ vielen Rekombinatoren und kleinerem Volumengewicht etwas stärker ist.

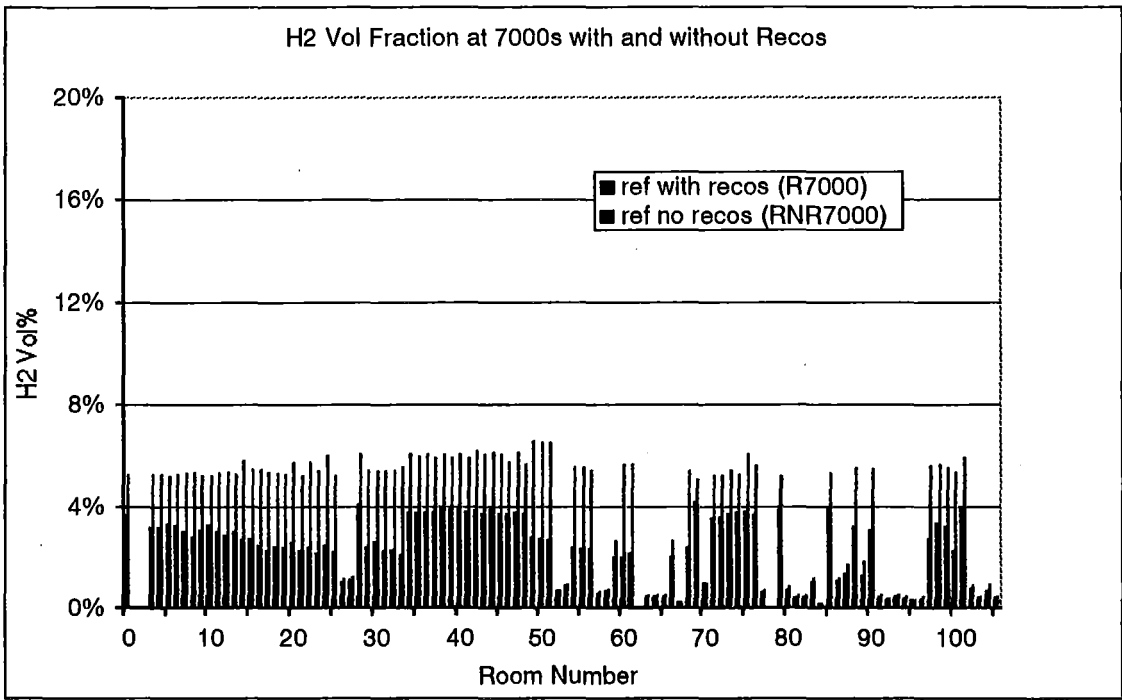
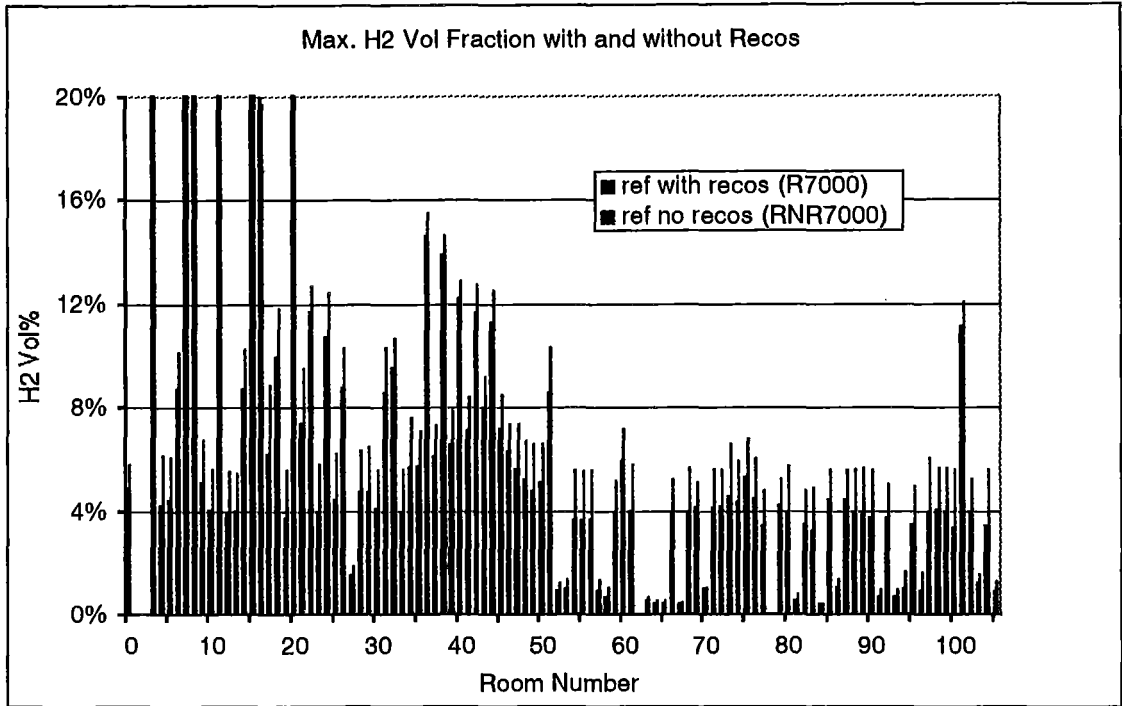


Abb. 3.7. Raumweise Spitzen- und Mittelwerte der Wasserstoffkonzentration am Ende der GASFLOW Rechnung ohne und mit Rekombinatoren. Die Raumdefinitionen entsprechen dem RALOC- Modell.

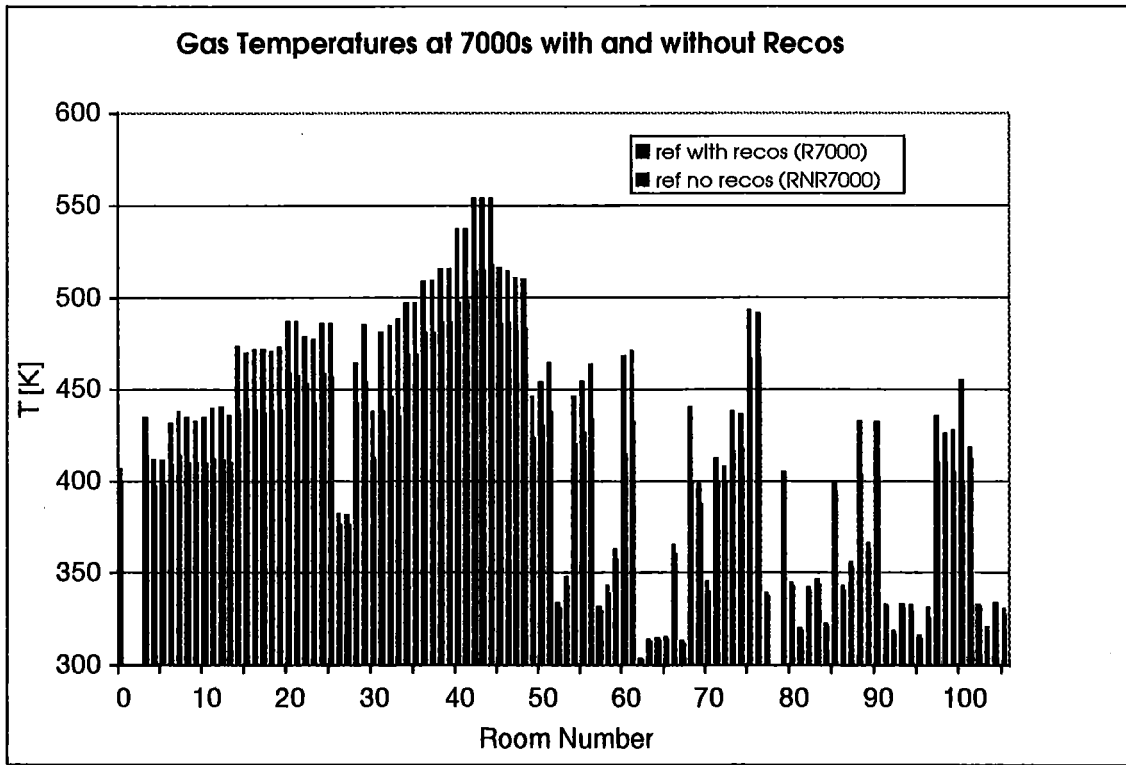
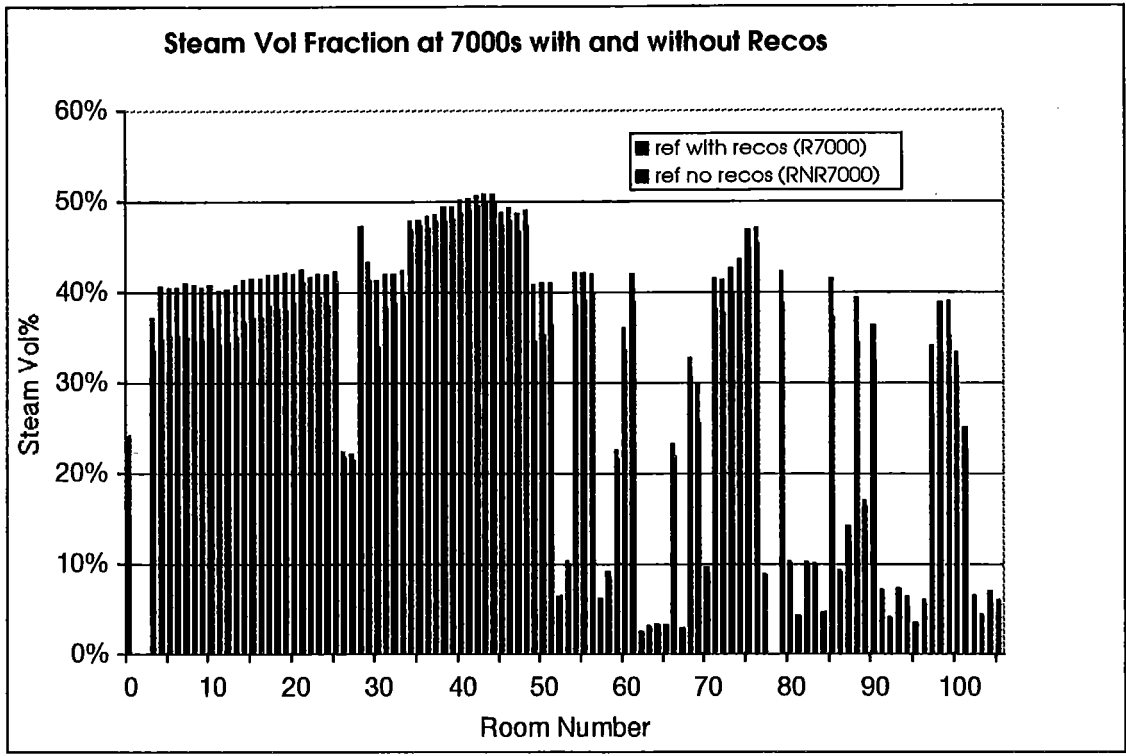


Abb. 3.8. Raumweise Aufschlüsselung der mittleren Dampfkonzentrationen und Gastemperaturen am Ende der GASFLOW Rechnung ohne und mit Rekombinatoren.

Die Temperaturen sind mit Rekombinatoren am Ende fast überall um ca. 40 Grad höher. Es kommt zu einer Temperaturstratifikation, bei der die mittlere Temperatur im Domraum 45 den höchsten Wert von 570 K erreicht. In den Anlagenräumen mit ihren verglichen zum Volumen großen Wärmekapazitäten sind die Gastemperaturen niedriger (z.B. Raum 8 mit 420 K). Das ist konsistent mit dem dort auch etwas niedrigerem Dampfanteil.

3.7.3. Vergleich mit den RALOC Raumdaten

Die Peakwerte und maximalen Mittelwerte der berechneten Wasserstoffkonzentration, sowie die Mittelwerte von Wasserstoff- und Dampfkonzentration und Gastemperatur am Ende der Rechnung werden in Tab.2 für die z.T. in Abb.3.9 markierten Räume mit den entsprechenden Ergebnissen der ersten RALOC- Rechnung [3.4] verglichen.

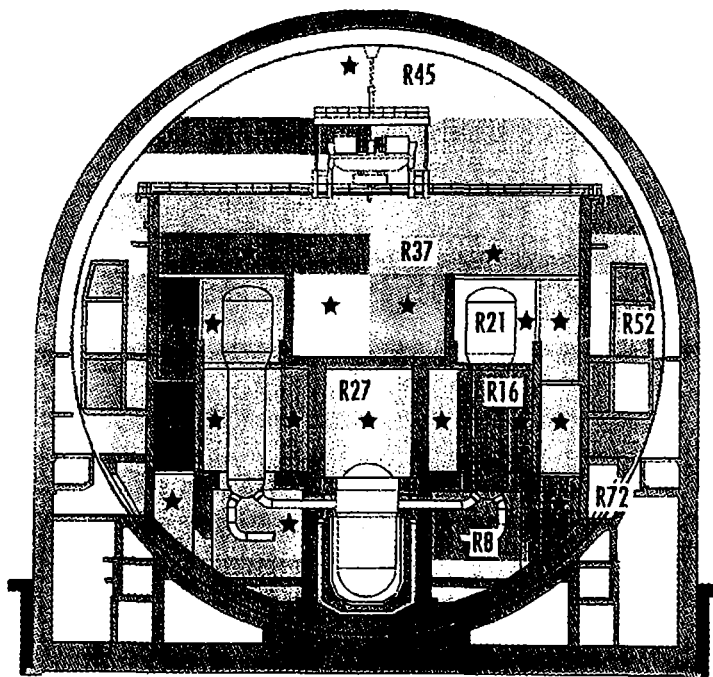


Abb. 3.9. Ausgewählte Räume des GKN- 2 Containments für den RALOC/GAS-FLOW Vergleich

Die mit "GF-Peak" bezeichneten Werte in der ersten Spalte von Tabelle 2 entsprechen dem zeitlichen und örtlichen Maximalwert der im gegebenen Raum während der ganzen Rechnung auftrat (= Spitzenwert der Kurve "MaxH2" in Abb.3.6 für den

Raum 45). Die zweite Spalte von Tabelle 2 bezeichnet den zeitlichen Maximalwert des Raummittelwertes. Für Raum 45 ist dies der Spitzenwert der Kurve "AvH2" im gesamten analysierten Zeitraum. Da die RALOC- Raumdefinition in GASFLOW übertragen wurde (siehe Abb.2.3), sind diese Raummittelwerte der GASFLOW-Analyse direkt vergleichbar mit den entsprechenden RALOC- Daten (3. Spalte in Tab.2). Die restlichen Spalten in Tabelle 2 zeigen als komplimentäre Information berechnete Raummittelwerte aus beiden Analysen zu einem festen Zeitpunkt (7000 s) für Wasserstoff, Dampf und Temperatur.

Die Unterschiede zwischen Peakwert und maximalem Raummittelwert z.B. 11.3 gegenüber 6.7% im Raum 45, wurden bereits in Abschnitt 3.7 diskutiert. Sie sind auch in den anderen Räumen deutlich, z.B. 85% gegenüber 9.7% im Quellraum 8. Diese Ergebnisse verdeutlichen, daß RALOC temporäre örtliche Wasserstoffanreicherungen in der gewählten Raumaufteilung nicht auflöst, sondern über eine relativ große Kontrollzone mittelt (Abb.2.4). Entlang von Raumketten sind mit zunehmender Entfernung von der Quelle die maximalen RALOC Raumwerte deshalb meist niedriger als die GASFLOW Raumwerte. Sie werden je nach Abstand zur Quelle auch später erreicht als in der GASFLOW Rechnung. Die höheren Wasserstoffkonzentrationen in RALOC für den Reaktorraum 27 sind eine Ausnahme und eine Folge des in GASFLOW nur grob modellierten Ventilationssystems. In den gut durchmischten Bereichen stimmt die Wasserstoffkonzentration gut überein, wie die Ergebnisse am Ende der Rechnung zeigen (z.B. 3.9 gegenüber 4.6% im Kuppelraum). Auch der Raummittelwert des Wasserdampfanteils ist in den gut durchmischten Zonen ähnlich (6. und 7. Spalte in Tabelle 2). Wie in GASFLOW zeigen die Räume mit den größeren Wärmekapazitäten (untere Anlagen- und Betriebsräume) auch in RALOC am Ende etwas niedrigere Dampfkonzentrationen (z.B. der Quellraum 8 und der Rohrkanal 72). Allgemein ergeben sich in RALOC aber erheblich niedrigere Gastemperaturen am Ende der Rechnung (7. und 8. Spalte in Tabelle 2, Abb.3.8).

		GF Peak	GF Max. Raumwer	Raummittelwert bei 7000 s					
Modell Raum		H2 [Vol%]		H2 [Vol%]		H2O [vol%]		Tgas [C]	
		GF	RAL	GF	RAL	GF	RAL	GF	RAL
R8	Quellraum	9.7	8.6	3.0	3.5	41	46	164	110
R16	DE Raum Mitte	6.4	7.0	2.7	3.5	40	44	197	122
R21	DE Raum oben	10.0	7.0	5.7	3.5	39	46	186	130
R27	Reaktorraum	1.1	3.5	1.0	3.5	22	35	109	95
R37	über DE Turm auf Quellseite	4.4	7.2	3.7	3.5	48	46	236	140
R45	Kuppel	6.7	4.8	3.9	4.4	51	48	281	130
R52	Lüfterzentrale	4.6	4.6	2.7	4.6	41	40	191	100
R72	Rohrkanal	3.6	4.2	3.5	4.2	41	40	140	98
R78	Treppenh. Loop 1	0.6	0.6	0.6	0.6	8.9	6	66	50
R81	Treppe oben bei Loop	0.7	2.1	0.7	1.2	10	12	71	68

Tab. 2: Tabellarischer Vergleich von Wasserstoff-/Dampfkonzentrationen mit RALOC Ergebnissen [3.4] für ausgewählte Räume.

Der Unterschied ist am stärksten in der Kuppel. Kleinere Gastemperaturen ergeben sich auch durch die feste zeitunabhängige Aufteilung der Spaltproduktwärmequellen bei der RALOC Simulation. Die Verteilung der Wärmequellen ist in GASFLOW dagegen an den Gastransport gekoppelt. Die Spaltprodukte sammeln sich bevorzugt in den freien Gasräumen in der Kuppel, die verglichen zum Gesamtvolumen nur wenig Struktureinbauten haben.

Wenn man von den transienten Unfallphasen absieht, sind die Mittelwerte der berechneten Wasserstoff- und Dampfkonzentrationen in beiden Analysen vergleichbar und konsistent. Die beobachteten Unterschiede bei den Spitzenkonzentrationen und in den Temperaturen vor allem während der transienten Phasen beruhen auf den unterschiedlichen Modellierungsansätzen, insbesondere den verwendeten

Raumaufösungen und der Impulsbehandlung. Den Analysen zufolge haben kurze Wasserstoffpeaks und erhöhte Temperaturen aber keinen wesentlichen Einfluß auf die berechnete globale Rekombinatorwirksamkeit, die im folgenden Abschnitt detailliert dargestellt wird.

3.8. Wirksamkeit der Rekombinatoren im 3D Konzentrationsfeld

Die maximale räumliche Ausdehnung des durch Wasserstoff/Dampfeinspeisung gebildeten Quellstrahls wird nach dem Kernabsturz bei 5932s erreicht. Sie ist in Abb. 3.10 als 3D-Kismet Plot gezeigt.

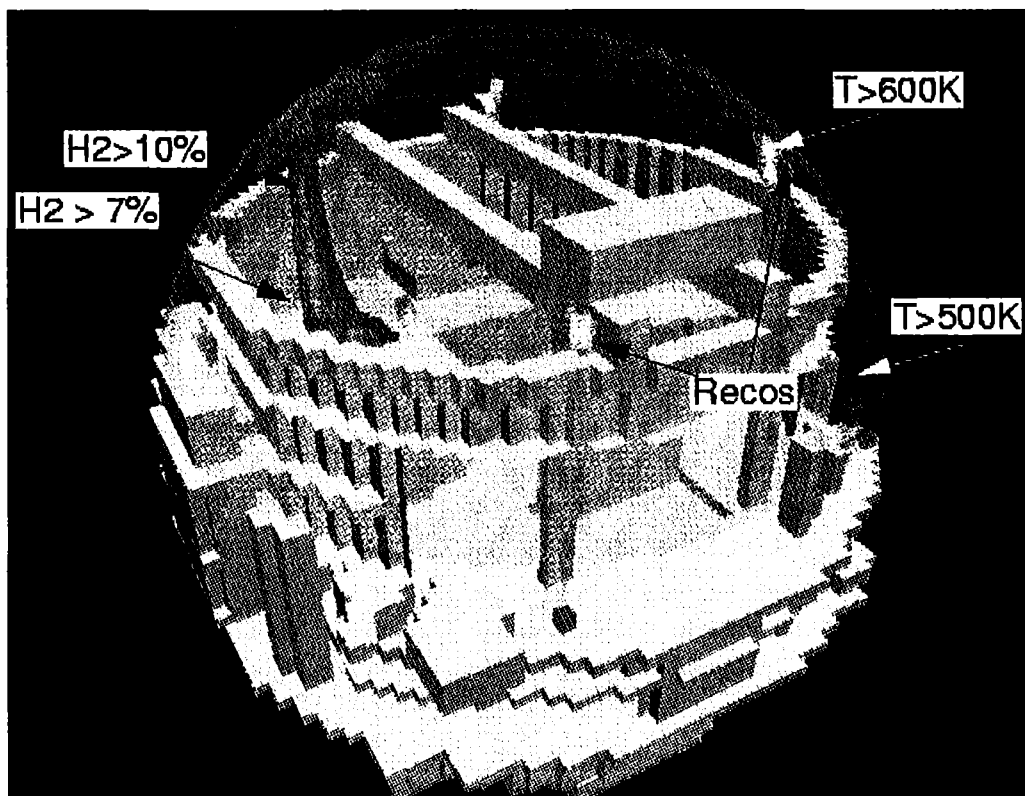


Abb.3.10. Wasserstoff im Quellstrahl und Rekombinator Abgase im Dom bei 5932s (3D Kismet Darstellung)

Dargestellt in rot ist die Wolke mit mehr als 10 Vol% Wasserstoff. Man erkennt die Bereiche, in denen die zuvor diskutierten lokalen Wasserstoffanreicherungen in den Betriebsräumen auftreten. Transparent rot, als durchsichtiger Schleier überlagert, ist die etwas größere Zone mit mehr als 7% Wasserstoff, die diesen Quellstrahl umgibt und durch Vermischung des aufsteigenden Quellgases in den Wirbelfeldern

im Containmentdom entsteht. Mit eingetragen in Abb. 3.10 sind außerdem Temperaturisoflächen in gelb, die Bereiche mit Temperaturen oberhalb 600 K eingrenzen und durchsichtig in grün die wesentlich größere Temperaturisofläche mit Temperaturen oberhalb von 500 K, die eine stratifizierte Schicht erkennen läßt. Die gelben Abgasfahnen verdeutlichen den heißen Dampf, der bei der Rekombination in den grün markierten Rekombinatorboxen gebildet wird. Der Dampf strömt seitlich aus den Boxen ab und steigt dann aufwärts. Die Reichweite der Abgasfahne ist maximal 2 m. Die Rührwirkung der Rekombinatoren ist gering, die Störungen im Geschwindigkeitsfeld bleiben lokal. Das gleiche wurde übrigens für das Strömungsfeld am Rekombinatoreingang beobachtet. Der Rekombinator verarbeitet nur den in der nahen Umgebung (1-2m) vorhandenen Wasserstoff. Der Transport von der Quelle zum Rekombinator muß durch andere externe Strömungsfelder geleistet werden.

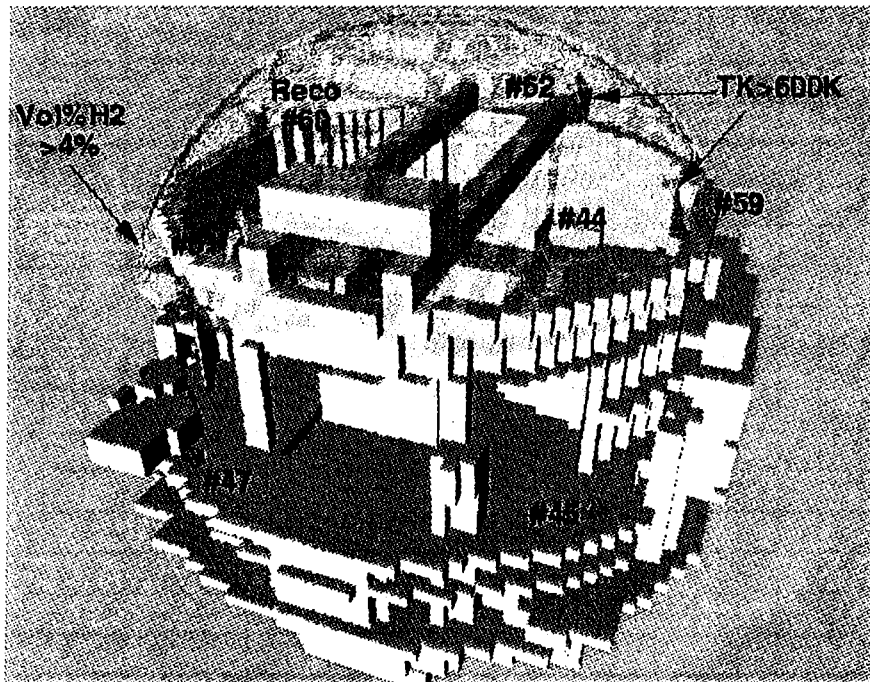


Abb. 3.11. Stratifizierte Wasserstoffwolke und Rekombinatorabgase bei 6000 s (3D Kismet Darstellung)

Die gleichen Abgasfahnen ($T > 600$ K) sind in gelb auch in Abb. 3.11 erkennbar, jetzt aber in der stratifizierten Wasserstoffwolke mit mehr als 4% Wasserstoff (transparent rot), die sich zum gleichen Zeitpunkt fast über den gleichen Bereich wie die Temperaturwolke (> 500 K) des vorigen Bildes erstreckt. Alle Rekombinatoren in der Wasserstoffwolke haben ausgeprägte Abgasfahnen. Die Rekombinatoren 45 und

47 auf dem Betriebsdeck sehen zu dieser Zeit noch nicht viel Wasserstoff, ihre Abgasfahnen sind schwach und nur als kleine gelbe Punkte erkennbar. Durch die Vermischungen nach dem Ende der Wasserstoffeinspeisung werden auch diese unten liegenden Rekombinatoren noch stark beaufschlagt. Sie bauen im gesamten Analysezeitraum vergleichbar große Wasserstoffmengen ab wie die Rekombinatoren oben am Kran und und an den Rundlaufstützen.

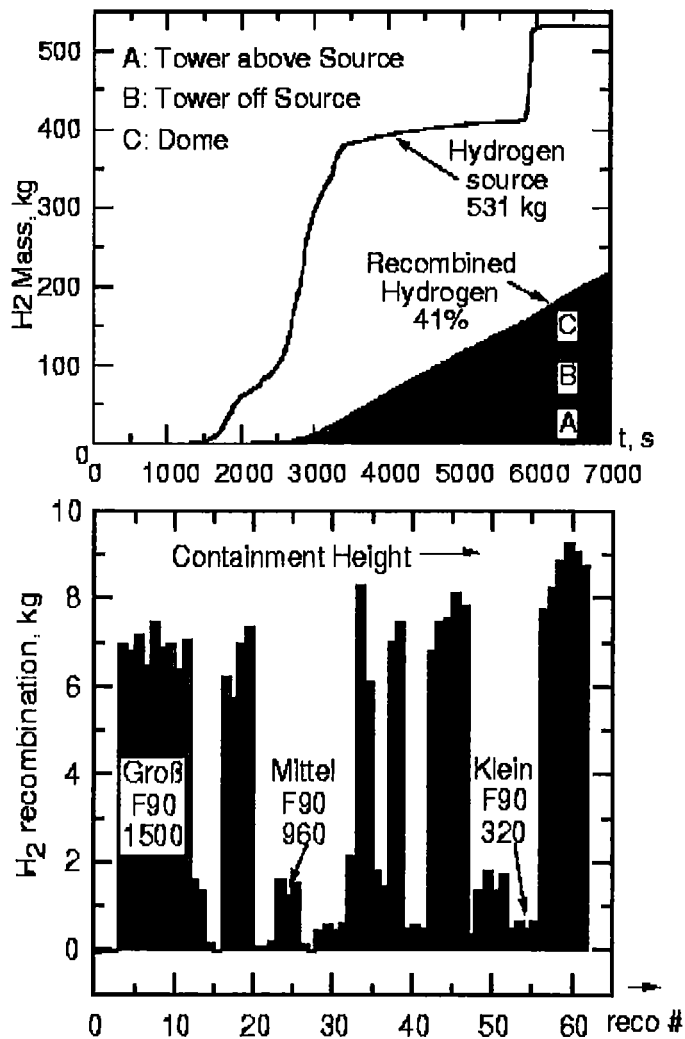


Abb. 3.12. Gesamt Wasserstoffabbau und aufgeschlüsselter Abbau an den eingesetzten Rekombinatoren

Die Abbaumenge je Rekombinator am Ende der Analyse wird in Abb. 3.12 für jedes der 62 in der GASFLOW- Analyse eingesetzten Module angegeben. Die großen Module vom Typ F90/1500 bauen über die Simulationszeit jeder zwischen 6 und 9 kg Wasserstoff ab. Der zuvor gezeigte Rekombinator 47 auf dem Betriebsdeck baut 8 kg, der Rekombinator oben am Kran 9 kg Wasserstoff ab. Die mittleren Typen

F90/960 und die kleinen Module vom Typ F90/320 tragen nur vergleichsweise schwach zum Wasserstoffabbau bei (2kg bzw. 0.8 kg). Der Einsatz dieser kleinsten Module erscheint gemessen am Aufwand nicht sehr effektiv. Oben in Abb. 3.12 wird der Wasserstoffabbau noch weiter nach den Raumbereichen im Containment aufgeschlüsselt. Von den insgesamt freigesetzten 531 kg Wasserstoff werden 212 kg also 41% innerhalb der Simulationszeit an allen Rekombinatoren abgebaut. Der meiste Wasserstoff rekombiniert im Dombereich, der wenigste im quellfernen Dampferzeugerturm, die Unterschiede sind aber nicht sehr groß, weil über längere Zeiten eine homogene Wasserstoffverteilung in dem untersuchten Szenario auftrat.

Die Abbaurrate der Rekombinatoren 61 und 47 am Kran und auf dem Betriebsdeck wird in Abb. 3.13 dargestellt. Am Kran gibt es einen Peak vor der Wasserstoffhomogenisierung. Danach sinkt die Abbaurrate zeitweise

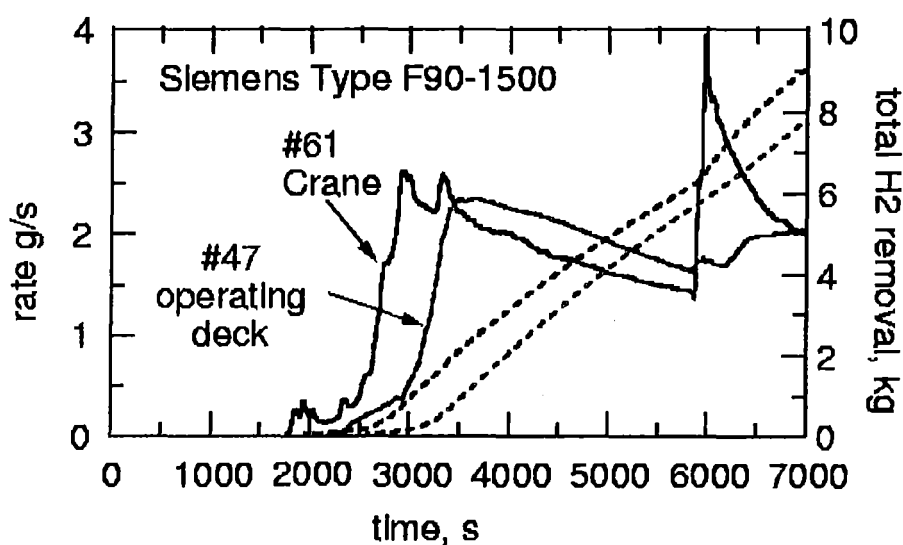


Abb. 3.13. Wasserstoffabbau in den Rekombinatoren am Kran und auf dem Betriebsdeck

sogar unter die Leistung des Rekombinators 47 auf dem Betriebsdeck. Erst in der Wasserstofffreisetzungphase nach dem Kernabsturz dominiert die Abbauleistung des Rekombinators 61 erneut, weil dadurch im Dom vorübergehend höhere Wasserstoffkonzentrationen entstehen. Der Gesamtabbau des Kranrekombinators ist am Ende um 1 kg höher als der des gleichen Moduls auf dem Betriebsdeck. Der Rekombinator 17 im Lüftungsschacht des quellfernen Dampferzeugerturms (Abb.

3.5), der von oben angeströmt wird, baut etwa 1 kg weniger Wasserstoff ab als der entsprechende Rekombinator 19 im quellnahen Dampferzeugerturm, der kontinuierlich von unten nach oben angeströmt wird.

Die Rekombinatoren 1 bis 3 im Rohrkanal und der Rekombinator 22 werden von der Hauptströmung kaum erfaßt und bauen keinen Wasserstoff ab. GASFLOW zeigt hier lokale Toträume auf. Der Raummittelwert und das Raummaximum der Wasserstoffkonzentration in den entsprechenden RALOC-Räumen 72 und 73 (Abb. 3.14) erreichen beide zwischen 3.5 und 4%.

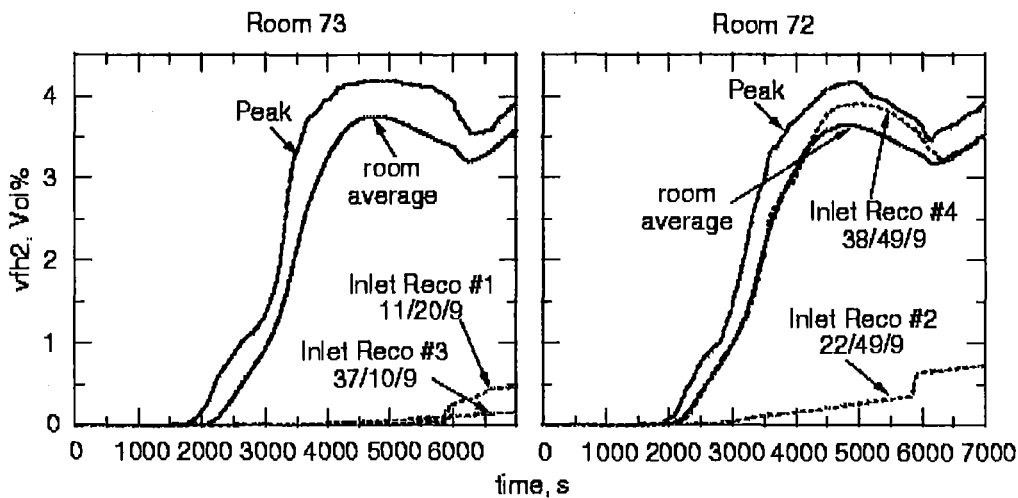


Abb. 3.14. Maximale und mittlere Wasserstoffkonzentrationen und Bedingungen am Eintritt der Rekombinatorboxen 1 bis 4 in den Rohrkanalräumen 72 und 73.

Lokal am Eintritt zu den Rekombinatoren 1,2 und 3 treten jedoch nur sehr niedrige Werte für den untersuchten Surge- Line LOCA auf. Diese 3 Rekombinatoren sind nach den GASFLOW Ergebnissen für den untersuchten Surge- line LOCA nicht gut positioniert. Die lokale Abschottung dieser Rekombinatoren läßt sich mit der derzeit gewählten Raumnodalisierung in RALOC nicht erfassen da der Rohrkanalraum 72 und 73 jeweils ein 180 Grad Ringsegment umfaßt (Abb. 3.15). Wasserstoff gelangt gut zum Rekombinator 4, der an einem der unteren Rückströmungspfade in den Trümmerschutzzylinder liegt. Er dringt aber kaum vor zu den Rekombinatoren 2 und 3, obwohl diese Rekombinatoren nahe der in Abb. 3.15 eingetragenen geöffneten Berstfolien liegen.

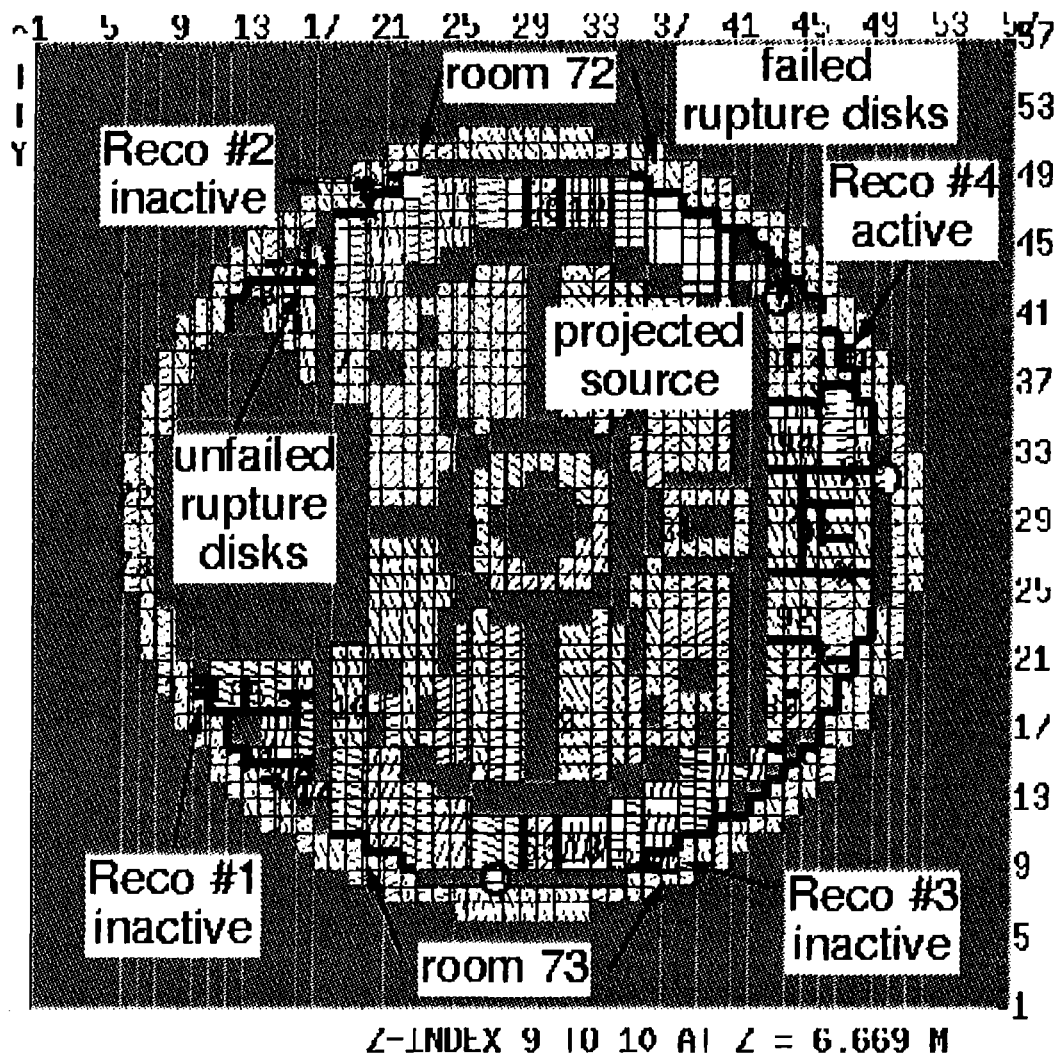


Abb. 3.15. Lokal abgeschottete Rekombinatoren im Rohrkanal (Räume 72 und 73)

Die Beschreibung der Rekombination mit einem Raummittelwert, wie es in der RALOC Rechnung geschieht, liefert an diesen gewählten Aufstellungsorten nur Näherungsergebnisse, weil innerhalb der RALOC-Raumzone (nach den GASFLOW Ergebnissen) ein starker Wasserstoffgradient vorliegt, der im RALOC- Modellansatz nicht beschrieben wird.

Es muß hier nochmals darauf verwiesen werden, daß die Grundannahme in allen "Lumped Parameter"- Modellen das Vorliegen einer homogenen Gasverteilung in jeder Kontrollzone ist. Wenn das nicht der Fall ist, wird durch diesen Modellansatz eine künstliche Homogenisierung der Gaskomponenten herbeigeführt.

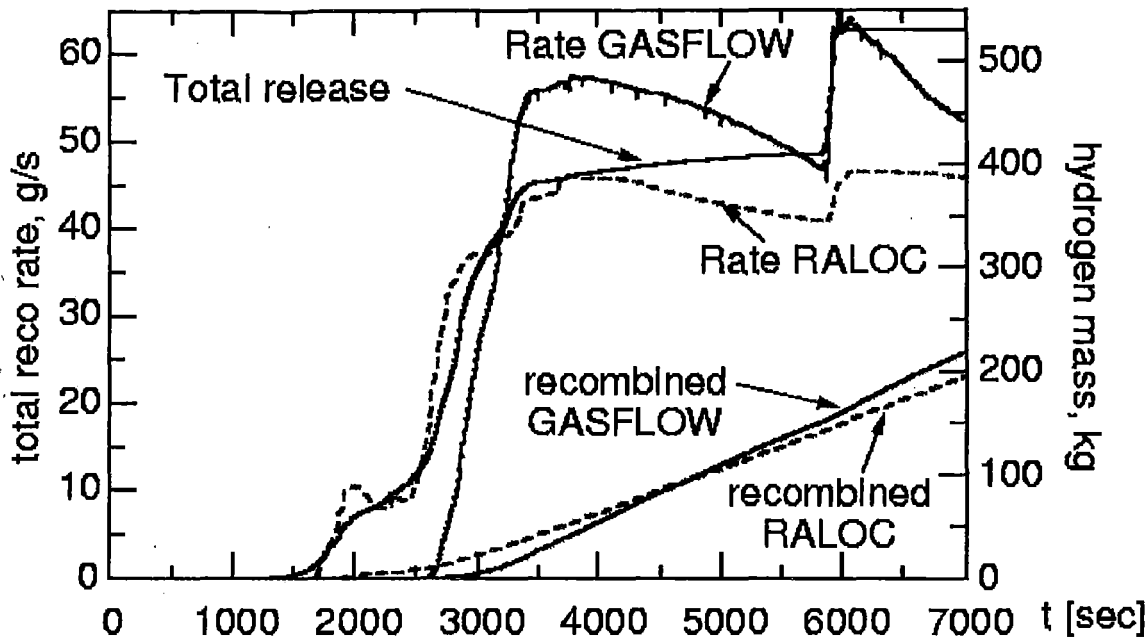


Abb. 3.16. Wasserstoff- Abbaurrate und Wasserstoff- Gesamtabbau (Vergleich • RALOC/GASFLOW)

3.9. Vergleich mit der Rekombination in RALOC

Die in GASFLOW und RALOC berechnete Gesamtrekombinationsrate aller Rekombinatoren wird in Abb. 3.16 verglichen. Die GASFLOW- Rechnung bezieht sich dabei auf die in Tabelle 3 gezeigte Rekombinatoranordnung (2. Spalte, insgesamt 62 Rekos), während die RALOC Rechnung die Reko- Anordnung aus Spalte 1 von Tabelle 3 verwendete (53 Rekos).

Im Analysezeitraum von 7000 s rekombinieren in RALOC 190 kg Wasserstoff, in GASFLOW 220 kg. Die Abbaurrate steigt in RALOC früher an wofür mehrere Effekte in Frage kommen. Zum einem benutzt das RALOC- Rekombinatormodell einen effektiv niedrigeren Schwellenwert der H_2 - Konzentration für den Beginn der Rekombination als das GASFLOW- Modell. Zum anderen kann die Annahme homogener, d.h. ideal durchmischter Gase, in den RALOC-Kontrollzonen einen zusätzlichen numerischen Transporteffekt bewirken, der die Transportzeit von der Quelle zu einem gegebenen Rekombinator abkürzt. Die frühere Rekombinatorbeaufschlagung in RALOC könnte sich auch durch die rascher ansteigenden Raummittelwerte der Anlagenräume erklären. Neuere Vergleichsrechnungen bei GRS deuten daraufhin, daß der erste Effekt überwiegt. Die festgestellten Unterschiede beruhen auch

auf den unterschiedlichen Rekoanzahlen in beiden Analysen. Insgesamt zeigen aber beide Modelle eine gute integrale Übereinstimmung für die berechneten Abbaumengen.

Die beiden hier gezeigten Ergebnisse für 53 bzw. 62 Rekombinatoren zeigen auch, daß ein Rekombinatorsystem unempfindlich gegenüber dem partiellen Ausfall von Rekombinator- Einheiten ist. Der Ausfall von z. B. 9 Rekombinatoren würde das Gesamtkonzept nicht gefährden, entscheidend ist die verbleibende Oberfläche an rekombinierenden Folien innerhalb von intakten Rekombinatorgehäusen.

Der Anstieg der Wasserstoffkonzentrationen nach dem Kernabsturz (5900s), erfolgt in RALOC in den großen Betriebsräumen verzögert und führt dort im Maximum auch zu niedrigeren Konzentrationen. Konsistent damit ergibt sich in RALOC eine Peakabbaurate, die um 20% unter dem GASFLOW- Wert liegt (50 g/s in RALOC gegenüber 65 g/s in GASFLOW). Die niedrigere Gesamtrekombinationsrate in RALOC reflektiert bereits weitgehend homogene Verhältnisse und verringert sich nur langsam bis zum Ende der Rechnung. Die Gesamtrate in GASFLOW fällt dagegen rascher ab nach Beendigung der Wasserstoffeinspeisung.

Diese Unterschiede in der integralen Rekombinatorleistung beruhen natürlich auch auf den verschiedenen Rekombinatoranordnungen beider Analysen. In der RALOC-Rechnung sind etwa 320 m² Reko- Fläche wirksam, während es in der GASFLOW-Analyse, nach Abzug der nicht beaufschlagten Rekombinatoren, 404 m² sind.

Typ	Siemens	GRS RALOC Ref	GASFLOW	GKN-2 Proposal
1	FR90/1-1500	21	33	
2	FR90/1-960	18	18	
3	FR90/1-320	14	11	

total area	m ²	320	461	
------------	----------------	-----	-----	--

Shadowed out recos	m ²	-		
Net area for recombination	m ²	320	404	
Recombined H2	kg	190	220	
Recombination per unit area	kg/ m ²	0.59	0.54	

Tab. 3: Rekombinatoranordnungen und integraler Wasserstoffabbau in den RALOC und GASFLOW Analysen

Bezieht man die integrale bis 7000s abgebaute Wasserstoffmenge beider Rechnungen auf die insgesamt wirksame Rekofläche, ergeben sich bei RALOC 0.59 kg H₂/m² und bei GASFLOW 0.54 kg H₂/m². Beide Analysen zeigen damit eine gute Übereinstimmung (innerhalb von 10%) für die spezifische integrale Abbaurate der installierten Reko- Systeme.

Auch der Vergleich von lokalen Rekombinatorleistungen zeigt, daß trotz der anderen Rekombinatormodellierung und des etwas höheren Containmentdrucks, der sich in GASFLOW gegenüber RALOC ergibt, keine wesentlichen Unterschiede im Abbauverhalten auftreten. Abbildung 3.17 zeigt oben den mit RALOC berechneten Wasserstoffabbau für eine große Rekombinatorbox im Dom für den unten angegebenen zeitlichen Verlauf der Wasserstoffkonzentration am Eintritt. Ebenfalls dargestellt werden unten die beiden berechneten Drücke aus GASFLOW und RALOC. Verwendet man den RALOC Containmentdruck zur Berechnung der Rekombination mit der in GASFLOW verwendeten Siemenskennlinie, kommt man zu

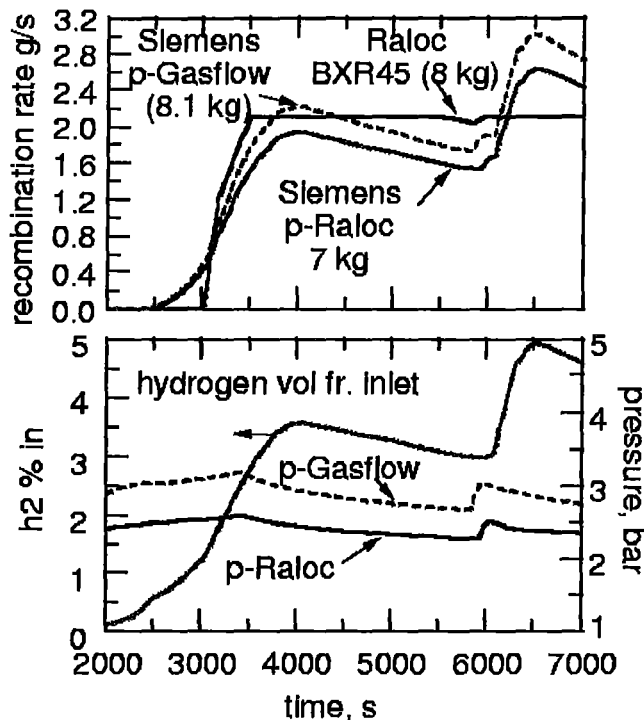


Abb. 3.17. Vergleich des Wasserstoffabbaus mit dem RALOC und GASFLOW Rekombinatormodell in einer großen Rekombinatorbox im Kuppelraum

einem Wasserstoffabbau von 7 kg gegenüber 8 kg, die mit dem RALOC Rekombinator Modell berechnet werden. Gegenüber dem GASFLOW Modell berechnet RALOC also ca. 10% höhere Abbauraten. Mit dem etwas höheren Containmentdruck aus GASFLOW und der Siemenskennlinie ergibt sich dagegen ein Wasserstoffabbau von 8.1 kg. Die 10% höhere Abbaurate des RALOC Modells für den Siemens Rekombinator wird damit durch den in GASFLOW berechneten höheren Containmentdruck weitgehend ausgeglichen. Für diese spezielle Reko- Position zeigt die GASFLOW- Analyse wie zu erwarten, zwar eine höhere zeitliche Auflösung und Dynamik, aber die über 7000s berechneten Gesamtrekombinationen stimmen sehr gut überein. (8.0 gegenüber 8.1 kg H₂).

Das wird auch durch die RALOC Analysen mit einer neuen vom Betreiber vorgeschlagenen Rekombinatoranordnung bestätigt, die in den GASFLOW Analysen bisher noch nicht verwendet wurde. Diese neue RALOC Rechnung (3. Spalte in Tab. 3) baut in 7000 s mit 407 m² Rekombinatorfläche ähnlich wie GASFLOW 220 kg Wasserstoff ab und hat mit 0.56 kg/m² bezogen auf die gesamte Rekombinator-

fläche sehr ähnliche Abbaumengen.

Festzuhalten bleibt ein Vergleich zu GASFLOW früheres Anfahren der Rekombinatoren in den RALOC Simulationen und eine etwas niedrigere spezifische maximale Abbaurrate des Wasserstoffs in RALOC. Die Verwendung von Raummittelwerten in RALOC anstelle von lokalen Eintrittskonzentrationen an den Rekombinatorboxen sowie die verschiedenen H_2 - Startkonzentrationen sind Ursachen für diese Unterschiede, die sich aber in ihrer Gesamtheit im zeitlichen Mittel weitgehend ausgleichen. Insgesamt gesehen haben die GASFLOW- Analysen die Ergebnisse der RALOC- Rechnungen bezüglich der integralen Wirksamkeit eines Rekombinator-systems innerhalb von 10 % bestätigt. Die Rechnungen haben weiterhin gezeigt, daß in dem untersuchten Szenario die Wirksamkeit des Abbausystems nicht empfindlich von der Position der Rekombinatoren abhängt und die Abbauleistung im wesentlichen proportional zur intakten Rekombinatoroberfläche ist. Der eventuelle Ausfall einzelner Rekomodule würde die erzielbare Risikominderung nicht gefährden.

3.10. Untersuchungen zur Wasserstoffvermischung

Die in beiden Rechnungen gefundene gute Vermischung des Wasserstoffs im Containment nach den verschiedenen Einspeiseperioden trägt wesentlich zu dieser im Mittel guten Übereinstimmung beim Wasserstoffabbau von RALOC und GASFLOW bei. Es ist aber wichtig, sich über die zugrundeliegenden physikalischen Mechanismen für diese Durchmischung Klarheit zu verschaffen. Dieser Abschnitt berichtet über Detailauswertungen und Untersuchungen zu den dominanten Vermischungsmechanismen und zur Absicherung dieses wichtigen Effekts mit dem GASFLOW GKN Modell durchgeführt wurden.

Die bereits zuvor diskutierte transiente Wasserstoffwolke im Dom und ihre rasche Auflösung nach der letzten Einspeisung (5932 s) wurde in einer Bildsequenz mit 20 Bildern im 8 s Abstand über einen Zeitraum von 3 min verfolgt und als Film visualisiert. Abb. 3.18 zeigt eine Momentaufnahme aus dieser Sequenz bei 5980 s. Rot ist die in Auflösung befindliche Wasserstoffwolke (>6%) dargestellt. Die Wolke ist

über dem quellseitigen Dampferzeugerturm aufgerissen. Der für die Wolkenbildung verantwortliche Quellstrahl, der auch schon in Abb. 3.10 mit seiner maximalen Ausdehnung dargestellt wurde, ist noch einmal in gelb für den Zeitpunkt 5932 s überlagert. Am Ende der Wasserstoffeinspeisung (Abb. 3.2) entsteht ein Nachspüleffekt durch die für kurze Zeit weitergehende Dampfeinspeisung.

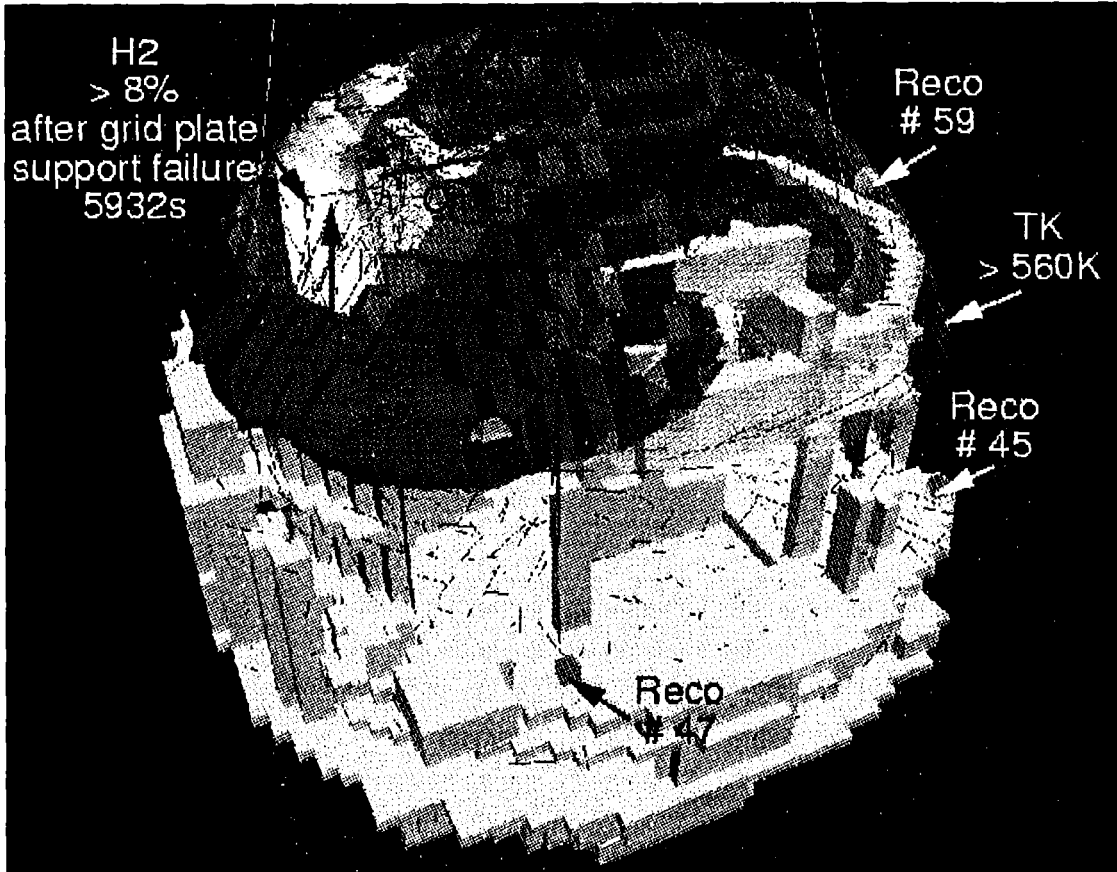


Abb. 3.18. Homogenisierung des Wasserstoffs nach dem starken Freisetzungspuls durch Kernabsturz (5980 s)

Der Quellstrahl bekommt dabei einen hohen Dampfanteil und drängt die Wasserstoffwolke über dem quellseitigen Dampferzeugerturm zur Seite. Durch die lokale Dampfanreicherung fällt die Wasserstoffkonzentration im Strahlbereich unter 6% und die gezeigte Wolke reißt dementsprechend auf. Durchsichtig in gelb überlagert erkennt man die Temperaturisofläche ($T > 560\text{ K}$), die ihre Lage während der Vermischung zeitlich kaum verändert. Das Geschwindigkeitsfeld bei 5980 s, das in Abb. 3.18 mit eingetragen ist, zeigt die vertikale Strömung des aufsteigenden Quellstrahls und dessen seitliche Umlenkung an der Kuppel.

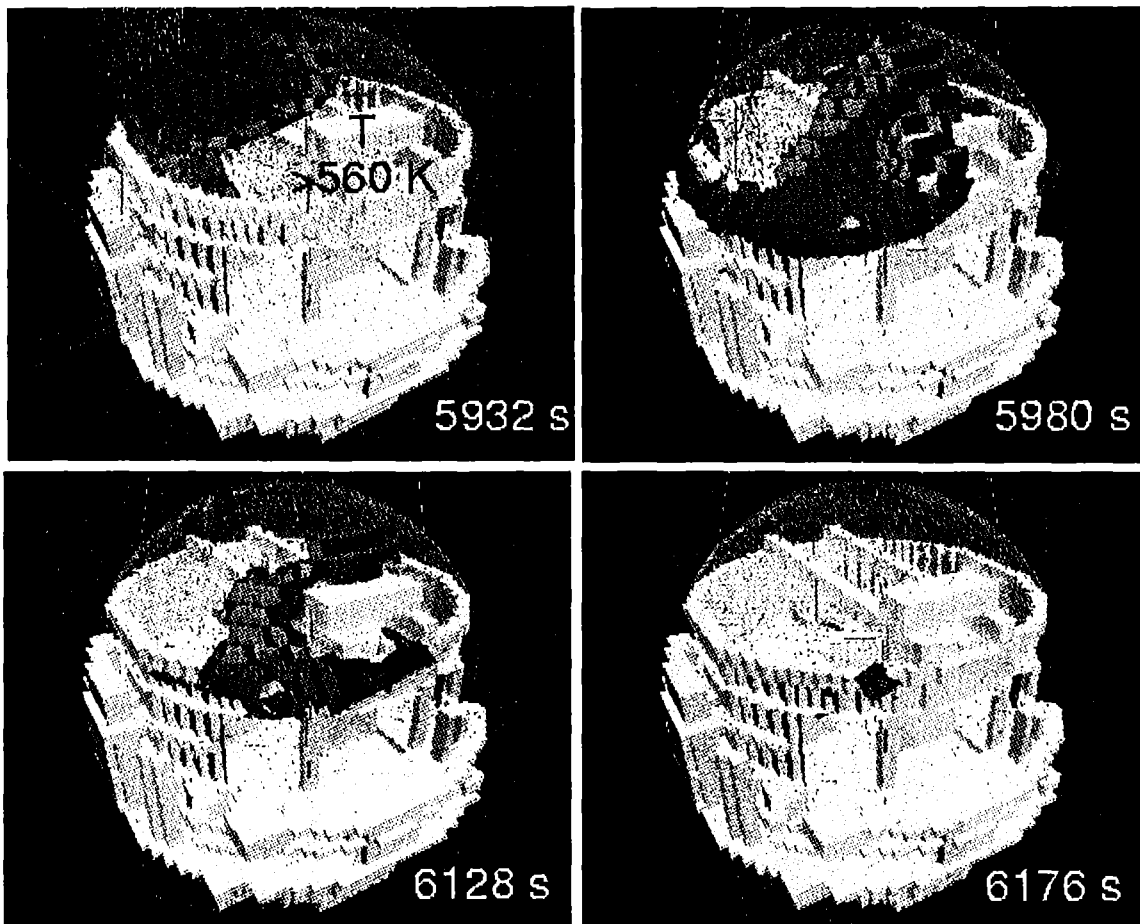


Abb. 3.19. Bildsequenz zur Wasserstoffvermischung nach der letzten Wasserstoff-einspeisung in der Kernabsturzphase

Die zeitliche Wasserstoffvermischung in der Kuppel wird in Abb. 3.19 mit vier Momentaufnahmen aus der Videosequenz in Intervallen von 48 s verdeutlicht. Erkennbar ist die zunächst geschlossene 6%-ige Wasserstoffwolke in der Kuppel, die dann über dem quellseitigen Dampferzeugerturm geöffnet und seitlich abgedrängt wird. Bereits 144 s nach dem Ende der Einspeisung ist der Wasserstoff weitgehend homogen in der Kuppel verteilt. Bedingt durch die Dichteänderung bei der Dampfkondensation an den kalten Wänden sinkt der Wasserstoff auch danach kontinuierlich weiter ab und verteilt sich über das ganze Containment, was schließlich zu der bereits diskutierten gleichmäßigen Beaufschlagung der verschiedenen Rekombinatorboxen führt.

3.10.1. Bildung zündfähiger Wasserstoff-Gemische

Die Containmentatmosphäre hat innerhalb der durchsichtigen gelben Temperaturwolke ($T > 560 \text{ K}$) in Abb. 3.19 überall einen Dampfanteil von mehr als 50%. Die nach dem Kernabsturz rot dargestellte Wasserstoffwolke ($> 6\%$) ist nicht zündfähig. Zündfähige Bereiche treten lokal nur für kurze Zeit bei 5932 s auf. Sie werden durch die Vermischung kurz nach der Wasserstoffeinspeisung aufgelöst. Die Containmentatmosphäre wurde abhängig von den lokalen Dampf- und Wasserstoffkonzentrationen im Hinblick auf zündfähige Bereiche mit den Shapiro-Zündgrenzen [3.2] für dampfhaltige wasserstoffreiche und -arme Zonen bei 5932 s ausgewertet (Abb. 3.20). Der Wasserstoff ist zu diesem

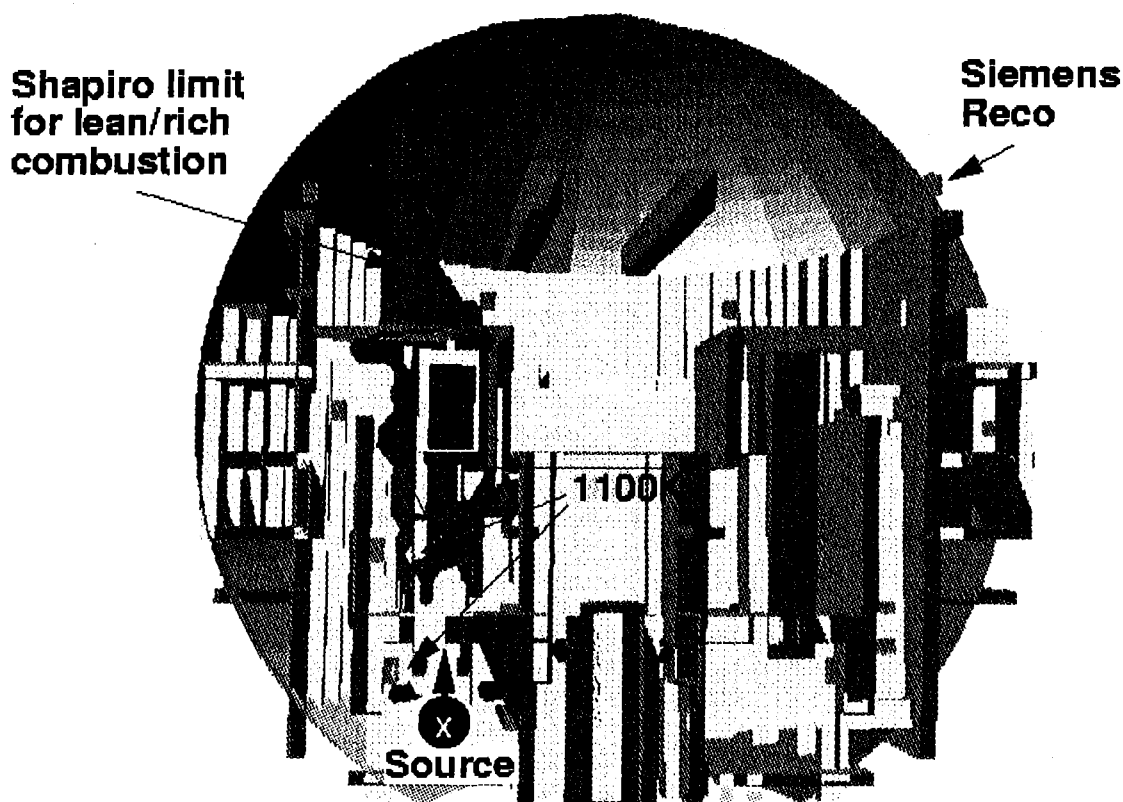


Abb. 3.20. Zündfähiger Quellstrahl (Shapiro Zündgrenzen) am Ende der Wasserstoffeinspeisung nach dem Kernabsturz (5932s)

Zeitpunkt nur innerhalb eines dünnen Strahls zündfähig, der sich von der Mitte des quellseitigen Dampferzeugerturms bis dicht unter die Kuppel erstreckt. Die quellnahen Zonen sind durch den hohen Dampfanteil im Quellstrahl inertisiert, die zündfähige Wolke ist folglich unten in den wasserstoffreichen Zonen unterbrochen. Die Selbstzündungstemperatur von 1150 K wird an keiner Stelle innerhalb der zündfähigen

gen Wolke überschritten. Eine Wasserstoffverbrennung zum Zeitpunkt maximaler Sensitivität könnte in diesen GASFLOW Analysen nur mit einem aktiven Zünder eingeleitet werden. Die Verbrennungssimulation war nicht Gegenstand dieser Untersuchungen.

3.10.2. Vermischungsmechanismen

Die Diskussion der Vermischungseffekte zusammen mit der temporären Zündfähigkeit der Wolke zeigt erneut die Bedeutung der zeitlichen Zusammensetzung des Quellterms und seiner Einspeisedynamik. Nun ist die Vermischung aber nicht allein durch die Dynamik des Quellterms bestimmt. Wichtig sind auch die Konvektionspfade, die durch Verbindungsöffnungen zwischen den Anlagen- und Betriebsräumen nach Versagen der Berstscheiben entstehen. Weiterhin sind auch Vermischungen durch lokale Wirbel und durch Kondensation von Bedeutung. Die dominierenden Vermischungsmechanismen wurden bereits vorher identifiziert und werden im folgenden anhand von detaillierten Sensitivitätsstudien erläutert und bewertet.

3.10.2.1. Kamineffekt der Dampferzeugertürme

Bei den ersten Auswertungen der GASFLOW Simulationen ergab sich der Eindruck, daß die Vermischung zumindest längerfristig auch durch einen Kamineffekt im quellseitigen Dampferzeugerturm aufrecht erhalten wird (Abb. 3.21). Die tief liegende Quelle heizt diesen Turm mit heißem Quellgas auf und erzeugt dadurch einen Auftriebseffekt. Im kälteren quellfernen Dampferzeugerturm sinkt das Gas aus dem Dombereich ab, so daß sich die in Abb. 3.21 angedeutete Konvektionsschleife ausbildet.

Der Kamineffekt wurde gezielt in einer Parameterrechnung (nrup2) untersucht, bei der das Versagen der Berstscheiben im quellfernen Dampferzeugerturm per Eingabe verhindert wurde. Das Ergebnis dieser Variation war überraschend, insofern als es nicht zu der ursprünglich erwarteten anstehenden Wasserstoffstratifikation im Dombereich führte.

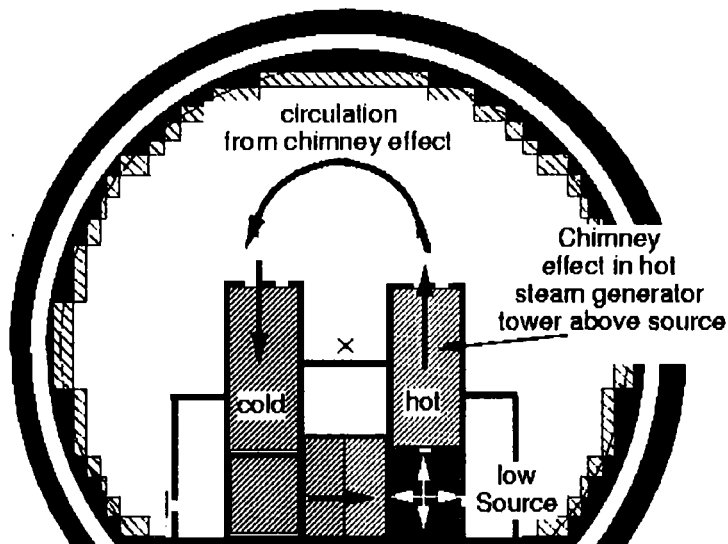


Abb. 3.21. Kamineffekt und Zirkulation durch den quellernen Dampferzeugerturm (Prinzip Bild)

Es kam wieder zu einer raschen Vermischung im Dom, und der Wasserstoff wurde auch in dieser Simulation homogen im Containment verteilt. Eine Zirkulation trat weiterhin vor allem durch die unteren Öffnungen zum Trümmerschutzzylinder in der Höhe des Rohrkanals auf, in denen die Berstfolien auch schon in der ersten Analyse versagt hatten. Die blauen Pfeile in Abb. 3.22 markieren die Hauptkonvektionspfade mit Spitzengeschwindigkeiten in den Verengungen von 3.5 m/s, die innerhalb des GASFLOW-Geschwindigkeitsfeldes identifiziert wurden. Offenbar hat die Zirkulation über den äußeren Ringraum zwischen Kugelschale und Trümmerschutzzylinder in GASFLOW eine größere Wirkung als der Kamineffekt der Dampferzeugertürme.

3.10.2.2. Mischung durch Wirbelbildung

In einer weiteren Variation (norupt_sg1_nrcyl) wurden zusätzlich die Rückströmöffnungen in den Trümmerschutzzylinder durch den Rohrkanal an den in Abb. 3.22 mit den roten Kreuzen markierten Stellen abgeriegelt. Diese Variation hatte zwar einen stärkeren Einfluß, führte aber ebenso wie die vorhergehenden Untersuchungen zu einer weitgehenden Wasserstoffdurchmischung. Die detaillierte Untersuchung der Strömungsverhältnisse ergab, daß die immer noch vorhandene relativ gute Durchmischung auf die Bildung von großen Wirbeln im Strömungsfeld zurückzuführen ist.

Das berechnete Strömungsfeld bei dieser Variation ist in Abb. 3.23 durch einen Längsschnitt in Containmentmitte und einen Horizontalschnitt oben an den Kranträgern zum Zeitpunkt 6000 s dargestellt. Das aufsteigende Quellgas im rechten Teil des Bildes trifft im Dombereich auf Gas, das durch Dampfkondensation entlang der Kugelschale herunterfließt. Das Quellgas wird abgelenkt, strömt zunächst oberhalb der Kranauflage zur Mitte und dann nach oben. Erkennbar ist dort ein vertikal über viele Zellen ausgedehnter vermischender Wirbel. Das horizontale Geschwindigkeitsfeld in Höhe der Kranträger zeigt verschiedene solcher großen Wirbel. Sie entstehen durch Strömungsumlenkungen an den Einbauten, durch Kondensation und durch Taylorinstabilitäten, die vom Quellstrahl bei der Beschleunigung eines schwereren Gases durch ein leichteres Gas induziert und in GASFLOW auch simuliert werden. Das horizontale Geschwindigkeitsfeld in Abb. 3.23 zeigt auch die horizontale Abströmung einiger Rekombinatorboxen im Dombereich und dokumentiert die lokalen Auswirkungen dieser Abgasströmungen und ihre verglichen mit den anderen Wirbeln nur geringen Vermischungswirkungen.

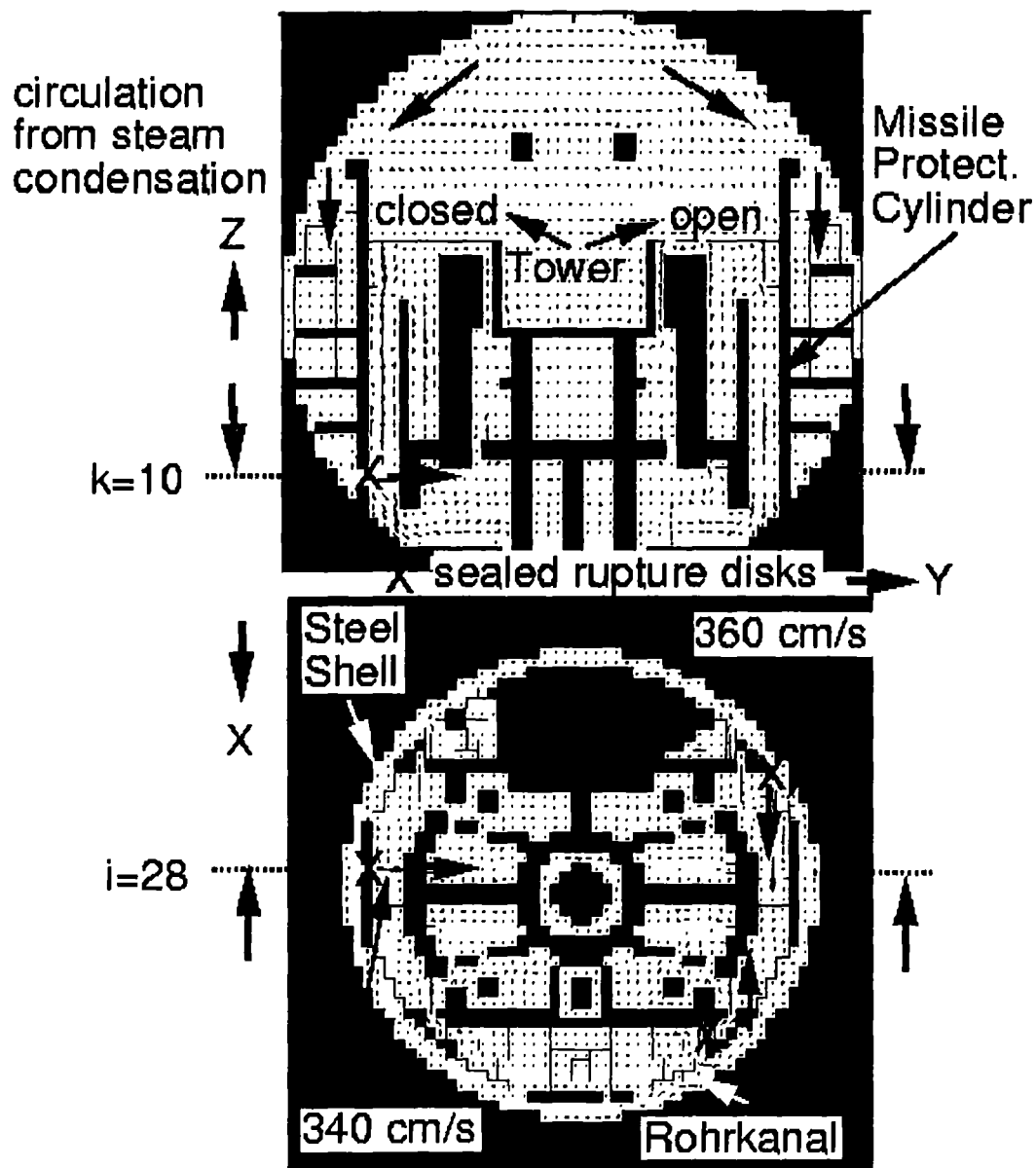


Abb. 3.22. Strömungsfeld bei abgeschlossenem quellfernen Dampferzeugerturm (Fall norupt_sg1). Die roten Kreuze markieren die bei zusätzlich abgeschlossenem Trümmerschutzzylinder (Fall norupt_sg1-nrcyl) verriegelten Berstfolien

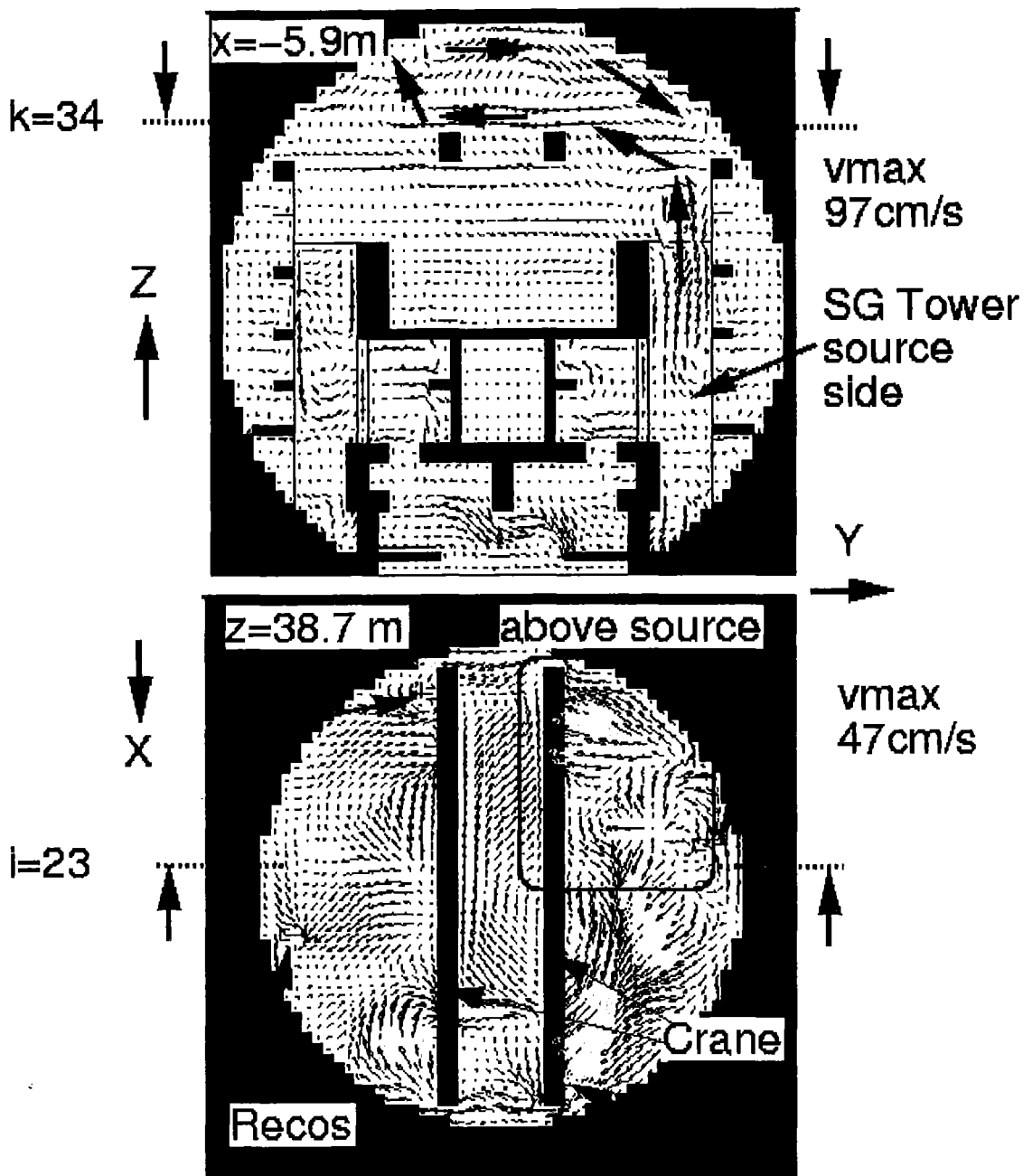


Abb. 3.23. Strömungsfeld bei 6000 s mit Wirbeln im Dom mit abgeschlossenem quellfernen Dampferzeugerturm (Fall norupt_sg1)

3.10.2.3. Mischeffekt durch Dampfkondensation

Der in Abb. 3.23 erkennbare kondensationsinduzierte Sedimentationseffekt nahe der Stahlschale wurde schon früher bei den GASFLOW Analysen des HDR Experiments E11.2 in der Außensprühphase beobachtet [3.3]. Dort führte dieser Effekt zu einer Wasserstoffanreicherung nahe den Wänden und schließlich zur Homoge-

nisierung der Gasatmosphäre oberhalb des Betriebsdecks. Auch bei den GASFLOW Simulationen für GKN trägt dieser Sedimentationseffekt offenbar längerfristig zur Wasserstoffhomogenisierung im Containment bei, was zu der weitgehend gleichmäßigen Beaufschlagung der Rekombinatoren führt. Das in Abb. 3.24

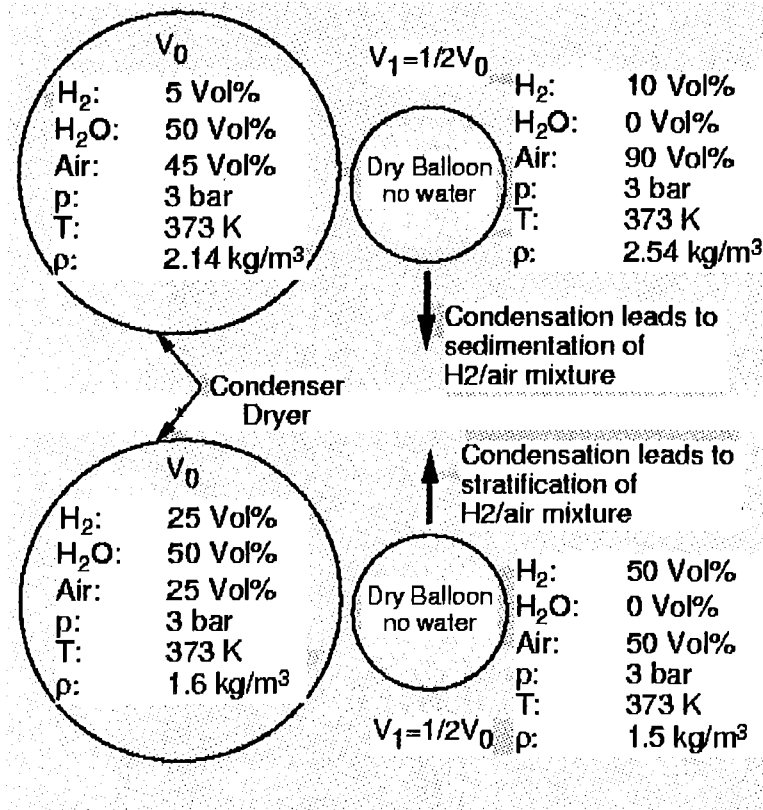


Abb. 3.24. Gedankenexperiment zum Vermischungseffekt der Kondensation bei den GASFLOW Analysen

skizzierte Gedankenexperiment erklärt den zugrundeliegenden Mechanismus. Die Containmentatmosphäre oben im Dom enthält nach der Wasserstoffeinspeisung typisch etwa 5 Vol% Wasserstoff, 50 Vol% Dampf und 45 Vol% Luft. Bei 3 bar und 373 K hat sie eine mittlere Gasdichte von 2.14 kg/m³. Würde man einen gewichtslosen Ballon mit einer Probe dieses Gases füllen, den Dampf (Molekulargewicht 18) durch Abkühlung außen wegkondensieren, das Wasser entfernen und das trockene Gas auf die gleiche Temperatur von 373 K erwärmen, dann würde sich der Volumenanteil von Wasserstoff und Luft verdoppeln (auf 10% bzw. 90%). In dem halbierten Ballonvolumen käme man zu einer Gasdichte von 2.54 kg/m³. Das Gas mit dem hohen Luftanteil (Molekulargewicht 28) wäre schwerer und würde nach unten sinken. Das gleiche Kondensationsexperiment mit anfangs 25% Wasserstoff, 50%

Dampf und 25% Luft würde zu einem Wasserstoff- und Luftanteil von je 50% führen. Wegen des niedrigen Molekulargewichts des Wasserstoffs in diesem Gemisch wäre seine Dichte von 1.6 kg/m^3 auf 1.5 kg/m^3 verringert. Die Dampfkondensation würde bei diesem Gemisch mit hohem Wasserstoffanteil den Ballon aufsteigen lassen, also zur Stratifikation führen.

Bei den GKN Analysen mit GASFLOW kondensiert der Dampf lokal als Film auf den Strukturflächen. Die Gasdichte erhöht sich dabei nahe der Wand, und es kommt zu der in Abb. 3.23 erkennbaren wandnahen Abwärtsströmung. Lumped Parameter Programme wie RALOC können solche lokalen Sekundärströmungen durch Kondensation, die den Wasserstoff nach untenbringen, mit den ursprünglich für diesen Vergleich vereinbarten Kontrollvolumina nicht auflösen [3.5]. Kondensation erhöht zwar den gemittelten Volumenanteil von Luft und Wasserstoff in den Kontrollvolumina und die dadurch verursachten Druck- und Dichteänderungen bewirken ebenfalls Ausgleichsströme zwischen den Kontrollvolumina aber nur im gemittelten Modell, nicht lokal aufgelöst. Bei den neuen RALOC Analysen mit der verfeinerten Domnodalisierung, die hier noch nicht ausgewertet wurden, hat man solche lokalen Effekte durch die Einführung von 10 zusätzlichen wandnahen Kontrollzonen zumindest teilweise berücksichtigt und dabei gleichzeitig den Wandkontakt der großen Kontrollvolumina der inneren Domräume aufgehoben, so daß es in RALOC wie in GASFLOW auch in den zentralen Zonen wesentlich rascher zur Dampfüberhitzung kam. Die kondensationsinduzierten Sekundärströmungen in den neuen wandnahen Kontrollzonen aus RALOC, die sich mit dieser verfeinerten Domnodalisierung ergeben, werden noch mit den GASFLOW Ergebnissen verglichen.

Im Hinblick auf die GKN Analysen ist anzumerken, daß der Sedimentations- und Vermischungseffekt der Dampfkondensation in der derzeitigen GASFLOW Version eventuell überschätzt wird. Erste Testrechnungen mit einem bewegten Film zeigen einen verringerten Trocknungseffekt für das abwärts strömende Gas, weil der abfließende Kondensatfilm die Wände nach unten hin zunehmend aufheizt. Die Dichteerhöhung durch Dampfkondensation wird weiter unten durch die Verdampfung des abfließenden noch heißen Films in die trockene Gasschicht z. T. kompensiert.

siert. Die Gasdichte nimmt dann nicht so stark zu. Mit einem dynamischen Filmmodell wird sich der Vermischungseffekt durch Kondensation daher vermutlich verringern. Auch die nicht berücksichtigten Verdunstungseffekte aus Sümpfen auf halber Höhe werden den Sedimentationsvorgang verlangsamen.

3.10.2.4. Mischungsverhalten mit adiabater Kugelschale

In einem weiteren Parameterfall (pnocon) wurde die Kondensation an der Innenseite der Stahlschale völlig abgeschaltet, um diesen Vermischungseffekt zu reduzieren und die Stratifikation im Dom zu verstärken. Der quellferne Dampferzeugerturm und der Trümmerschutzzylinder waren auch in diesem Fall verriegelt. Der Druckverlauf für diesen Parameterfall wird in Abb. 3.25 mit dem anfangs diskutierten Referenzfall (pgfin) verglichen.

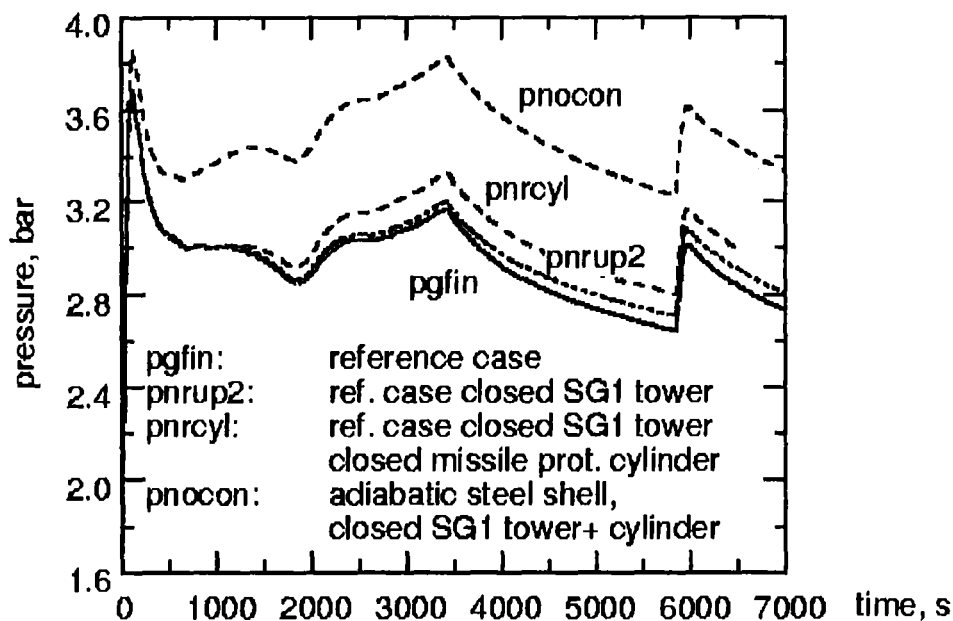


Abb. 3.25. Druckverlauf bei den Parameterfällen mit örtlich verriegelten Berstscheiben und unterdrückter Dampfkondensation an der Kugelschale

Mit dargestellt sind auch die Druckverläufe mit verriegeltem quellfernen Dampferzeugerturm und mit zusätzlich abgeschlossenen Trümmerschutzzylinder, die sich mit Kondensation an der Stahlschale ergeben. Der geschlossene quellferne Dampferzeugerturm verringert die Dampfkondensation etwas, was am Ende zu einem leicht erhöhten Druck führt. Das zusätzliche Abriegeln des Trümmerschutzzylinders

(pnr cyl) erhöht den Druck wesentlich mehr. Noch höhere Drücke und natürlich Dampfanteile bleiben erhalten, wenn die Dampfkondensation an der Stahlschale völlig unterdrückt wird.

Alle Variationen, auch die ohne Dampfkondensation an der Stahlschale, führen letztlich zu starken Vermischungen nach der Wasserstoffeinspeisung. Das zeigen auch die Raummittelwerte der Wasserstoffkonzentrationen im Domraum 45 und unten im Rohrkanal (Raum 72) für die verschiedenen Parameterfälle (Abb. 3.26). Durch den höheren Druck

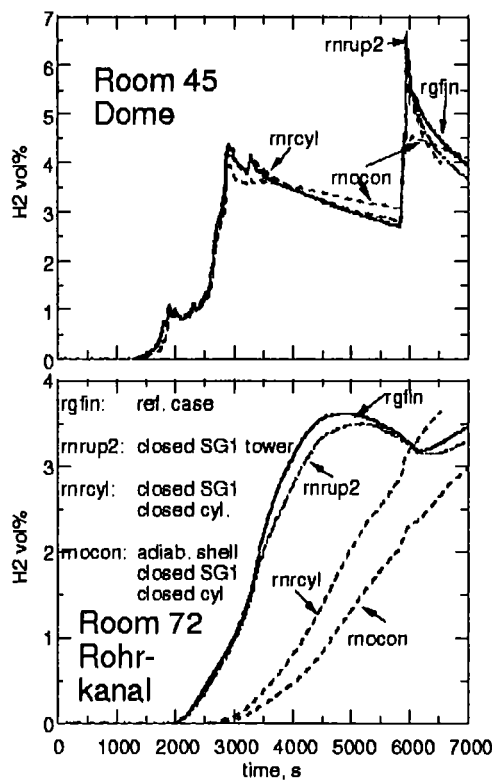


Abb. 3.26. Wasserstoffkonzentrationen im Domraum und im Rohrkanal bei den Parameterfällen mit örtlich verriegelten Berstscheiben und unterdrückter Dampfkondensation an der Kugelschale

nimmt der Wasserstoffanteil im Dom ohne die Kondensation an der Kugelschale sogar ab. Mit den Öffnungen unten im Trümmerschutzzylinder steigt der Wasserstoffanteil im Rohrkanal früher an. Dampfkondensation und die Zirkulation durch die Öffnungen im Trümmerschutzzylinder bringen den Wasserstoff nach unten. Die

Zirkulation durch die Öffnungen im Trümmerschutzzylinder beschleunigt den Wasserstofftransport gegenüber der reinen Kondensation. Allerdings gelangt der Wasserstoff auch mit verriegelten Öffnungen im Trümmerschutzzylinder nach unten in den Rohrkanal. Mit der Verriegelung steigt die Wasserstoffkonzentration zwar langsamer an, erreicht aber danach vergleichbare Werte wie mit den Öffnungen im Trümmerschutzzylinder. Auch bei Annahme einer adiabaten Stahlschale kondensiert Dampf außen am Trümmerschutzzylinder. Der Wasserstoffanteil steigt daher im Rohrkanal (im Fall rnocon) noch langsamer an. Die Tatsache, daß Wasserstoff auch bei einem verriegelten Trümmerschutzzylinder bis in den tiefliegenden Rohrkanal gelangt und die Konzentration dort am Ende nur unwesentlich kleiner als im Dom ist, bestätigt die Dominanz der Dampfkondensation als wichtigsten Mechanismus für die Wasserstoff- Sedimentation und Vermischung bei diesen GASFLOW Analysen, neben dem frühzeitigen Mischeffekt durch Wirbelbildungen im Dom.

3.10.2.5. Einspeisung von reinem Wasserstoff

Die gute Durchmischung des Wasserstoffs, die auch zu der relativ gleichmäßigen Beaufschlagung der Rekombinatoren führt, entsteht bei den GASFLOW Analysen letztlich durch den Dampf in der Containmentatmosphäre, der an den Wänden auskondensieren kann. Bei Einspeisung von trockenem Wasserstoff kommt man kurzzeitig zwar auch zu dynamischen Mischvorgängen durch Wirbelbildung im Dom, aber am Ende entsteht immer eine stratifizierte Schicht in der Kuppel. Um diesen Befund aus den geschilderten Testläufen weiter zu erhärten, wurde im Fall H2GRID ein Szenario mit trockener Wasserstofffreisetzung simuliert. Von den Einspeiseraten aus RALOC wurden separat als Testfall nur die 120 kg Wasserstoff eingeleitet, die nach dem Kernabsturz frei werden.

Der Wasserstoffquellterm für diesen Parameterfall ist oben in Abb. 3.27 zusammen mit der berechneten maximalen und mittleren Wasserstoffkonzentration im Domraum 45 eingetragen.

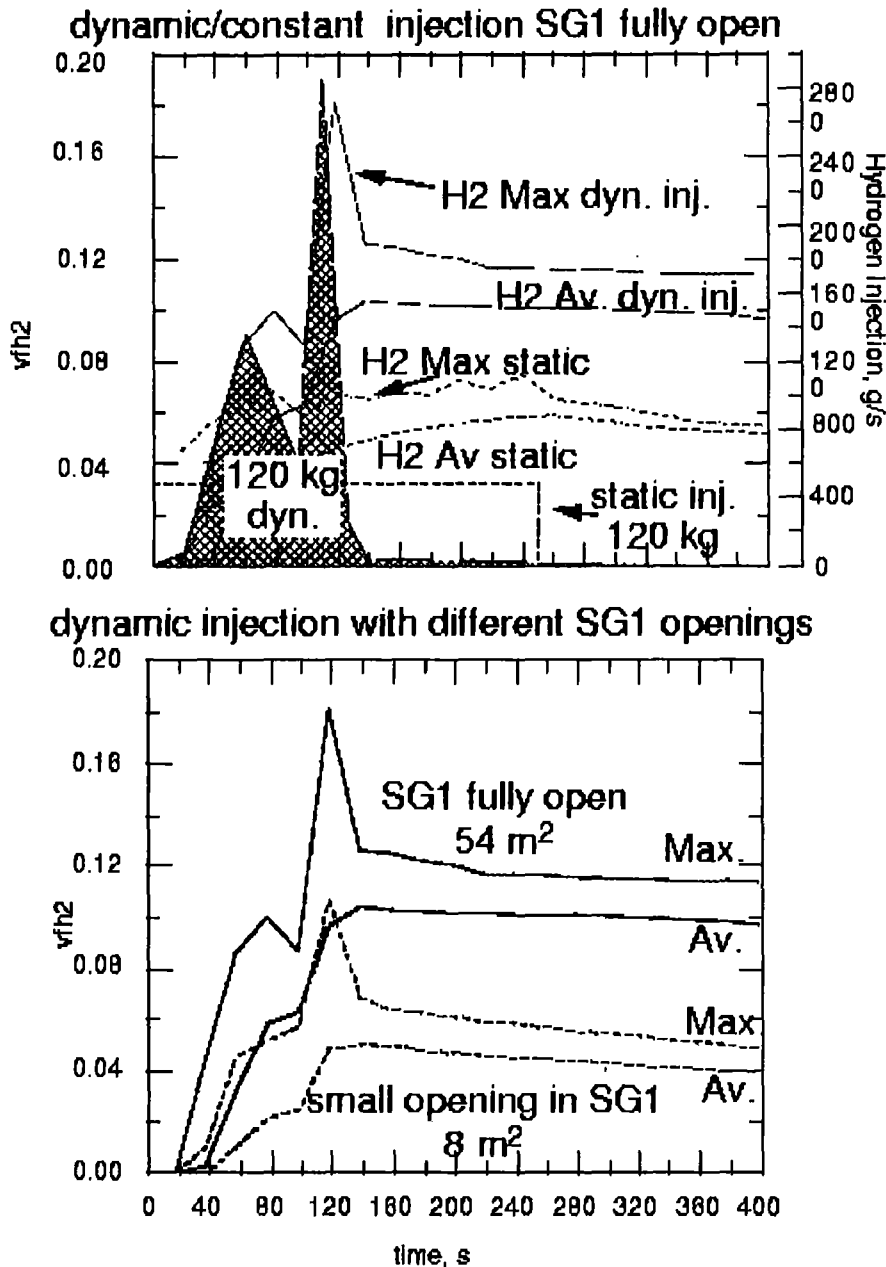


Abb. 3.27.Einfluß der Einspeisedynamik und der Turmöffnung auf die Vermischung im Dom

Gestrichelt überlagert sind die Konzentrationsverläufe im Dom, die sich bei Einspeisung der gleichen Wasserstoffmenge mit konstanter Einspeiserate ($0.48 \text{ kg H}_2/\text{s}$) ergeben. Die Simulationen betrachten beide einen Zeitraum von 400 s. Sie wurden alle mit verriegeltem quellfernen Dampferzeugerturm und Trümmerschutzzylinder durchgeführt. Da bei dem angenommenen Quellterm mit reiner Wasserstoffeinspeisung nur wenige Berstscheiben versagt hätten,

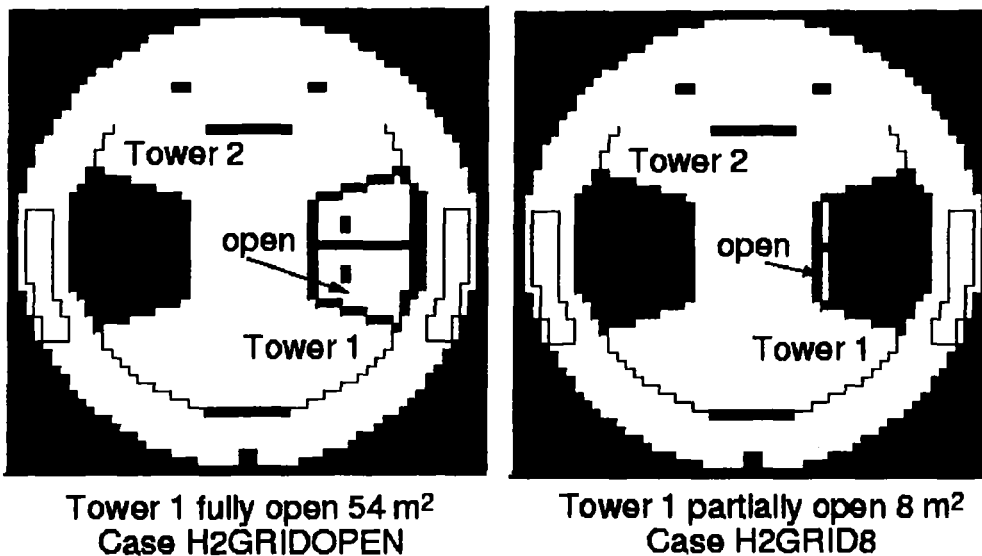


Abb. 3.28. Öffnungsquerschnitte im quellseitigen Dampferzeugerturm zur Untersuchung des Mischungseffekts bei dynamischer Einspeisung von trockenem Wasserstoff

wurden bei diesen Untersuchungen zunächst alle Berstscheiben im quellseitigen Dampferzeugerturm als geöffnet angenommen (Abb. 3.28 Fall mit 54 m²). Die schnelle Wasserstoffeinspeisung führt zu einem aufwärts gerichteten Quellstrahl mit einem maximalen Wasserstoffanteil von 18% in der Kuppel. Am Ende der Einspeisung kommt es wieder zu einer Vermischung im Dom, bei der der lokale Peakwert im Raum 45 sich dem Raummittelwert annähert. Der Peakwert bleibt jedoch auch längerfristig mit 11% um fast 2% über dem Raummittelwert. Das deutet auf eine stratifizierte Schicht im oberen Teil des Domraums 45 hin mit einer verglichen zum Raummittelwert erhöhten Wasserstoffkonzentration. Bei der langsamen Einspeisung der gleichen Wasserstoffmenge (gestrichelte Linien oben in Abb. 3.27) werden am Ende 5% Wasserstoff im Dom erreicht. Der Peakwert der Wasserstoffkonzentration übersteigt den Raummittelwert maximal nur noch um 2%. Der Vergleich mit den anderen Raumdaten zeigt auch bei der milden Einspeisung die Ausbildung einer stratifizierten aber dickeren Wasserstoffschicht mit geringerem Wasserstoffanteil, die sich über den Domraum 45 und auch in die darunterliegenden Räume 43 und 44 erstreckt. Offenbar verteilt und vermischt sich der langsam zugeführte Wasserstoff etwas besser im Betriebsraum. Nach unten in den Rohrkanaal gelangt kein Wasserstoff weder mit der dynamischen noch mit langsamen Wasserstoffeinspeisung.

Bei der gleichen dynamischen Wasserstoffeinspeisung mit einem nur lokal über 8 m² geöffneten quellseitigen Dampferzeugerturm (s. Fall H2grid8 Abb. 3.27 und 3.28) fließt wesentlich weniger Wasserstoff in die Betriebsräume. Die Anlagenräume haben ein größeres Rückhaltepotential durch den versperrten quellfernen und nur wenig geöffneten quellnahen Dampferzeugerturm. Im oberen Sackraum 22 des abgesperrten quellfernen Dampferzeugerturms sammelt sich der Wasserstoff und erreicht dort auch längerfristig wesentlich höhere Konzentrationen (über 12%). Der an den Überströmöffnungen des quellseitigen Dampferzeugerturms gedrosselte Quellstrahl dringt bis in den Domraum vor und führt dort zu maximalen Wasserstoffkonzentrationen von 10% gegenüber 18% bei ungedrosseltem Quellstrahl. Auch mit dem gedrosselten Quellstrahl bildet sich eine stratifizierte Zone unter der Kuppel mit einer maximalen Konzentration von 5% Wasserstoff gegenüber 11% bei ungedrosseltem Quellstrahl. Durch die Speicherung von Wasserstoff in den Sackräumen des quellfernen, abgeriegelten Dampferzeugerturms läßt sich das Wasserstoffinventar in den Betriebsräumen bei diesem Unfall verringern. Diese quellfernen Sackräume sind beim Unfall meist auch dampfinertisiert, so daß ein höherer Wasserstoffgehalt dort sicherheitstechnisch keine Bedeutung hätte.

Die durchgeführten Rechnungen bestätigen, daß die Dampfkondensation maßgeblich zur Durchmischung der Containmentatmosphäre beiträgt. Die zur Erhärtung dieser Erkenntnis durchgeführte Simulation einer Einspeisung reinen Wasserstoffs, die bei diesem Unfallszenario allerdings nicht auftritt, führte zu stratifizierten Wasserstoffschichten im Dom.

3.10.3. Fazit aus der Studie der Vermischungsmechanismen

Aus den diskutierten Parameterfällen und Detailauswertungen zum Mischungsverhalten lassen sich folgende wichtige Schlüsse ziehen.

- Die von der Quelle bestimmte Auftriebsströmung bringt das Wasserstoff/Dampfgemisch aus der Bruchzone mit begrenzter Verdünnung nach oben in den Dombereich und baut dort kontinuierlich eine Wasserstoff-Dampf Wolke auf.
- Der Auftrieb des Quellstrahls und die induzierten Verdrängungsströmungen

erzeugen Wirbel im Dom und anderen Bereichen, die bei Ausbleiben weiterer Wasserstoffzufuhr die transiente Wasserstoffstratifikation abbauen und die Wolke auflösen und verteilen.

-Bei einer dynamischen Wasserstoffzufuhr in einem Puls und einem oben weit geöffneten Dampferzeugerturm kommt mehr Wasserstoff in der Kuppel an als bei einer stetigen Zufuhr der gleichen Menge mit niedrigen Raten. Im letzteren Fall bleibt mehr Zeit für die ausgleichenden Verteilungsmechanismen der Anreicherung entgegenzuwirken.

-Stabile Wasserstoffstratifikationen treten bei Einspeisungen von Wasserstoff gleichzeitig mit einem großen Dampf volumenanteil nicht auf, entstehen aber praktisch immer bei trockenen Wasserstoffeinspeisungen.

-Durch die Dampfkondensation an den Wänden wird Wasserstoff nach unten transportiert. Dies ist der entscheidende Mechanismus für die bei allen GASFLOW Analysen langfristig entstehende fast homogene Verteilung. Der Mischungseffekt wird aber mit dem derzeit noch verwendeten statischen Filmmodell in GASFLOW vermutlich etwas überschätzt.

-Die Zirkulation durch den Kamineffekt im quellnahen und quellfernen Dampferzeugerturm ist nicht wesentlich an der Gasvermischung beteiligt.

-Die Überströmöffnungen im Trümmerschutzzylinder im Bereich des Rohrkanals haben einen wichtigen Einfluß auf die Zirkulation.

3.11. Schlußfolgerungen aus den Analysen

Die Ergebnisse der 3D GASFLOW Simulation eines Kühlmittelverlustunfalls durch Abriß der Verbindungsleitung zum Druckhalter wurden für das beschriebene Containmentmodell von GKN- 2 im Detail dargestellt. Der Darstellung ging eine Diskussion des zugrundeliegenden Blowdown Quellterms und des Quellterms für die Einspeisung von überhitztem Dampf und Wasserstoff voraus, auf die im Verlauf der Ergebnisdarstellung immer wieder Bezug genommen wird. Der Erhalt von Masse und Energie wurde bei den GASFLOW Analysen nachgewiesen. Der Energiestrom in dem abfließenden Wasserfilm und dem ausregnenden Wasser wurde vernachläss-

sigt. Der berechnete Containmentdruck liegt in GASFLOW (0.3 bar) höher als in RALOC, trotz der im Unterschied zu RALOC nicht in die Simulation einbezogenen Wasser- und Sumpfenergie. Der berechnete Druckverlauf und das Versagensmuster der Berstfolien wurden erläutert und ein charakteristisches Geschwindigkeitsfeld im Hinblick auf die Umverteilungen von Dampf und Wasserstoff ausgewertet. Die Diskussion konnte nur eine beschränkte Datenmenge einbeziehen, deckt aber die für das Verständnis der Ergebnisse wesentlichen Phänomene ab. Die berechneten zeitlichen Verläufe der Dampf- und Wasserstoffkonzentrationen sowie der Temperaturentwicklungen wurden dokumentiert und mit ihren Peakwerten und Mittelwerten für die 106 Räume aufgeschlüsselt, mit denen das Containment in RALOC dargestellt wird. Ein Vergleich der GASFLOW Ergebnisse mit den RALOC Raumdaten wurde im Detail für den Domraum 45 und mit ausgewählten Daten auch für wichtig anderen Räume durchgeführt. Die Wirkung einiger Rekombinatoren, die an besonders interessanten Stellen im Gasfeld liegen, wurde zeitlich dargestellt, wobei auch wenige meist tief liegende Rekombinatoren identifiziert wurden, die sich in Toträumen befanden.

Die den Untersuchungen zugrundeliegende Rekombinatoranordnung war an einigen Stellen zwar etwas anders als die Rekombinatoranordnungen für die RALOC Analysen. Die Ergebnisse erlauben trotzdem einen Detailvergleich zur grundsätzlichen Wirksamkeit der Rekombinatoren bei den RALOC und GASFLOW Analysen. Eine Neuberechnung mit der heute vom Betreiber favorisierten Rekombinatoranordnung ist der Vollständigkeit halber noch geplant, wird aber keine neuen Erkenntnisse bringen. Da die RALOC Raumnodalisierung inzwischen mit Kenntnis des Strömungsfeldes aus GASFLOW im Dom verfeinert wurde und die nachträgliche neue RALOC Raumdefinition im 3D- GASFLOW Modell recht aufwendig ist, sind die GASFLOW Ergebnisse für die neue Anordnung der Rekombinatoren nicht mehr unmittelbar mit den RALOC Ergebnissen vergleichbar. Die neue Anordnung wird das GASFLOW Ergebnis kaum verändern, aber das Auftreten von Toträumen bei der Rekombinatoraufstellung für dieses Unfallszenario ganz ausschließen können. Die nahezu homogene Wasserstoffverteilung, die sich bei allen GASFLOW Analysen fast überall im Containment nach kurzer Zeit ergibt, bedingt ohnehin eine weitgehend gleichmäßige Beaufschlagung aller Rekombinatoren, so daß leicht

veränderte Rekombinatoranordnungen oder- zahlen auch keine nennenswerten Veränderungen im integralen Abbauverhalten zur Folge haben.

Die verschiedenen Mechanismen, die zu der guten Wasserstoffvermischung bei allen GASFLOW Analysen geführt hatten, wurden anhand einer ausführlichen Sensitivitätsstudie einzeln untersucht und erläutert. Der Vermischungsbeitrag der Rekombinatorabgase am gesamten Vermischungsvorgang ist vernachlässigbar.

Die Auswertung der GASFLOW Rechnungen und der Vergleich mit den RALOC Ergebnissen führt zu den im folgenden zusammengestellten Schlußfolgerungen.

Eine volle 3D- Containmentanalyse mit dem GASFLOW Code für das Szenario des Surge Line LOCA in GKN- 2 mit 7000 s Problemzeit ist heute mit einem vertretbaren Aufwand an Rechenzeit möglich. Eine Berechnung für dieses Szenario kann heute auf dem FZK eigenen Rechner in 4 Tagen durchgeführt werden. Die inzwischen durch die verbesserte Vektorisierung erreichte Recheneffizienz erlaubt außer der Referenzrechnung in vertretbarer Zeit, auch eine Ergebnisabsicherung durch Sensitivitätsuntersuchungen, wie sie früher nur mit Lumped- Parameter- Modellen durchgeführt werden konnten. Auch Unfallszenarien mit längeren Problemzeiten können jetzt mit GASFLOW simuliert werden. Das für die GKN Analysen entwickelte erweiterte Geometriemodell für GKN- 2 mit 185000 Rechenzellen simuliert auch die für solche Anwendungen erforderliche Außenkühlung der Stahlschale durch die Gaskonvektion im Ringspalt. Dieser Effekt hatte bei der Simulation der ersten 7000 s des Surge Line LOCA aber noch keinen nennenswerten Einfluß.

Bei dem untersuchten Surge Line LOCA kommt es in allen GASFLOW Analysen zu einer raschen Wasserstoffvermischung nach den verschiedenen transienten Einspeiseperioden. Die typischen Zeitkonstanten liegen in der Größenordnung von 500s. Die Wasserstoffkonzentrationen liegen am Ende der Rechnung mit Rekombinatoren fast überall bei 4% und stimmen gut mit den Ergebnissen der RALOC Anal-

ysen überein. Eine begrenzte Vermischung entsteht lokal durch Wirbelbildungen und Strömungsumlenkungen im gesamten Containment. Die längerfristige globale Durchmischung entsteht in den GASFLOW-Rechnungen vor allem durch Sekundärströmungen entlang der Wände aufgrund von lokalen Dichteerhöhungen durch Dampfkondensation. Die gute Vermischung, die sich auch in den RALOC Analysen ergibt, entsteht durch großskalige Ausgleichsströmungen aufgrund der Dichteunterschiede zwischen den Kontrollvolumina, wahrscheinlich zusätzlich verstärkt durch die niedrigeren Gastemperaturen im Dom, die in RALOC gegenüber GASFLOW berechnet werden. GASFLOW könnte auch einen zusätzlichen Vermischungseffekt durch Sumpfordunstung parametrisch abbilden. GASFLOW berechnet aber ohnehin schon sehr gute Vermischungen, so daß ein zusätzliches Sumpfmodell keine wesentlichen Veränderungen ergäbe. Bei tiefliegendem Leck entstehen in GASFLOW Bereiche mit stabiler Wasserstoffstratifikation nur nach Freisetzung von trockenem Wasserstoff.

Bei der Wasserstoff-/Dampffreisetzung kommt es in GASFLOW zur Ausbildung eines Quellstrahls durch eine Auftriebsströmung, die das Quellgas mit wenig Verdünnung nach oben bringt und dort eine Wasserstoffwolke aufbaut. Die starke transiente Wasserstoff-/Dampffreisetzung nach dem Kernabsturz führt kurzzeitig sogar zu brennbaren Gemischen, die mit dem Quellstrahl bis in den Dombereich transportiert werden, die aber innerhalb von wenigen Minuten wieder verdünnt werden, sobald die Wasserstoffzufuhr nachläßt. Die lokal hohen Wasserstoffkonzentrationen im Quellstrahl wurden in der ersten groben Raumaufteilung von RALOC nicht erfaßt, konnten aber mit einer an die GASFLOW Ergebnisse angepaßten feineren Raumaufteilung im Strahlbereich nachträglich auch mit RALOC berechnet werden. Die erste RALOC-Rechnung zeigt im Dom Wasserstoffkonzentrationen von 3 % beim Erreichen des Peakwerts in GASFLOW von 11%. Mit der feineren Kontrollzonenaufteilung konnte RALOC ähnliche Konzentrationswerte erzielen. Auch die Wasserstoffkonzentrationen in den Betriebsräumen zeigen in den RALOC-Analysen im allgemeinen verlangsamte Anstiegszeiten während der Wasserstoffeinspeisung. Die Konzentrationsverläufe von RALOC zeigen keinen Peak am Ende der Einspeisung und nähern sich dem homogenen Mischwert mit einer gewissen zeitlichen Verzögerung nach den Einspeisephase. Dieser Effekt beruht vor allem auf

der integrierenden Wirkung der relativ großen Kontrollzonen in RALOC (bis 3000 m³). Lokal an einer Stelle eintretender Wasserstoff wird sofort über das gesamte Kontrollvolumen verteilt und erst nach hinreichender Zeit ergeben sich höhere Wasserstoffkonzentrationen in diesem Volumen. (Vergleiche Abschnitt 4.4)

Alle GASFLOW Rechnungen ergaben höhere Gastemperaturen und Drücke als die RALOC Simulationen. Verantwortlich für die erhöhten Temperaturen in GASFLOW ist eine Gaserwärmung und Dampfüberhitzung durch die luftgetragenen Spaltproduktwärmequellen. Die Betriebsräume zeigen in GASFLOW fast überall eine trockene Atmosphäre, d.h. die Gasüberhitzung wird nicht durch Verdampfung von Kondensatfilmen verlangsamt bzw. unterdrückt.

Die erste Druckspitze beim Blowdown wird in GASFLOW und RALOC thermodynamisch durch die isentrope Expansion des Zweiphasengemischs bestimmt. Sie erreicht 3.7 bar. Der Druck bleibt danach in GASFLOW etwas höher und liegt am Ende der Rechnung mit 2.7 bar um 0.3 bar über dem RALOC Druck. Ursachen für die niedrigeren Containmentdrücke in RALOC sind möglicherweise die in RALOC homogen über die Kontrollvolumina verteilten Wärmesenken. Analog zum instantanen Massentransport im Gasvolumen einer Zelle des Lumped Parameter Codes wird auch die Energie im Gas sofort verteilt (eine mittlere Gastemperatur), was einem zusätzlichen numerischen Energietransport entspricht. Die numerischen Aspekte der RALOC-Rechnung wurden durch MELCOR-Kontrollrechnungen verifiziert. Weitere Möglichkeiten für die leicht unterschiedlichen Containmentdrücke liegen in den physikalischen Modellen, die in beiden Programmen zur Beschreibung der Dampfkondensation verwendet werden. Allerdings ist dieser Punkt nicht kritisch für die Wirksamkeit des untersuchten Rekombinatorkonzepts.

Wie beim Containmentdruck führt auch die unterschiedliche Rekombinatormodellierung in RALOC und GASFLOW nur zu geringen systematischen Unterschieden im berechneten Abbauverhalten der Rekombinatoren. Die verbleibende Unsicherheit in den Rekombinatorabbauleistungen von ca. 13% sollte durch einen detail-

lierten Vergleich der Rekombinatormodellverifikationen weiter verringert werden. Das verwendete GASFLOW- Modell wurde an den Battelle- Versuchen Gx6 und Gx7 validiert [3.7]. Der etwas höhere Druck in GASFLOW führt bei den homogenen und mit RALOC vergleichbaren Wasserstoffkonzentrationen am Ende zu sehr ähnlichen Mengen an rekombiniertem Wasserstoff pro Rekombinator. Auch mit der geringfügig anderen Rekombinatoranordnung werden in beiden Programmen ca. 40% des freigesetzten Wasserstoffs innerhalb des Analysezeitraums von 7000s abgebaut. Festzustellen bleibt ein verglichen mit GASFLOW früheres Anfahren der Rekombinatoren in den RALOC-Simulationen durch einen anderen Schwellenwert und durch die Verwendung von Raummittelwerten am Eintritt der Rekombinatorboxen. Die Rekombination erfolgt in GASFLOW während der Wasserstoffeinspeisung mit höheren Spitzenraten. Das frühere Anfahren der Rekombinatoren und die geringeren Spitzenabbauraten in RALOC gleichen sich im zeitlichen Mittel aus.

Die Selbstzündungstemperatur von 1150 K wird in dem kurzzeitig brennbaren Quellstrahl zu keinem Zeitpunkt überschritten. Ein Verbrennungsvorgang könnte nur durch aktive Zündung in dem engen zeitlichen Bereich des Kernabsturzes in bestimmten Strahlzonen eingeleitet werden. Das Auftreten zündfähiger Gemische wird vor allem durch die Zusammensetzung des Quellstrahls bestimmt, der bei diesen Analysen immer mit einem hohen Dampfanteil im Quellbereich einhergeht.

Die verschiedenartigen Mechanismen für die gute Durchmischung der Atmosphäre wurden mit GASFLOW durch sorgfältige Detailuntersuchungen identifiziert. Die erzielte Durchmischung ist szenarioabhängig. Die Überströmöffnungen zwischen den Anlagen- und Betriebsräumen, insbesondere die unteren Öffnungen in Höhe des Rohrkanals tragen stark zur Vermischung bei.

Die RALOC und GASFLOW Analysen weisen zweifelsfrei nach, daß das untersuchte Rekombinatorkonzept eine sicherheitsgerichtete Maßnahme ist, die im untersuchten Szenario des Surge Line LOCA innerhalb der ersten Stunden greift. In beiden Analysen rekombinieren innerhalb der ersten 7000s des Unfalls rund 40 %

des freigesetzten Wasserstoffs in den untersuchten Rekombinatoranordnungen. Die Dampf inertisierung führt sowohl mit wie ohne Rekombinatoren am Ende der Analysen zu nicht zündbaren weitgehend homogenen Zuständen. Mit Rekombinatoren wird der verbleibende Wasserstoff auch über die Analysezeit hinaus parallel zur fortschreitenden Dampfkondensation homogen weiter abgebaut. Mit dem eingesetzten Rekombinatorsystem kann man bei der angenommenen Wasserstoffquelle kurzzeitig zündfähige Gemische zwar nicht ganz ausschließen. Die kurzzeitig zündbaren Bereiche wurden mit der 3D GASFLOW Analyse sehr genau lokalisiert. Längerfristig wird das Auftreten von zündfähigen Gemischen bei der fortschreitenden Deinerisierung der Containmentatmosphäre durch die Dampfkondensation mit dem eingesetzten Rekombinatorsystem aber zuverlässig ausgeschlossen.

Literatur

Kapitel 3

- 3.1. P. Royl, J. R. Travis, W. Breitung, L. Seyffarth: "Simulation of Hydrogen Transport with Mitigation Using the 3D Field Code GASFLOW", Procs. 2nd International Conference on Advanced Reactor Safety, June 1-4, 1997, Orlando, Florida
- 3.2. Z. M. Shapiro, T. R. Moffette: "Hydrogen Flammability Data and Application to PWR Loss-of-Coolant Accident", WAPD-SC-545, Bettis Plant, September 1957
- 3.3. P. Royl, J. R. Travis, E. A. Haytcher, and H. Wilkening: "Analysis of Mitigating Measures during Steam/Hydrogen distributions in Nuclear Reactor Containments with the 3D Field Code GASFLOW," presented at the OECD/NEA CSNI Workshop on the Implementation of Hydrogen Mitigation Techniques, Winnipeg, Canada, May 13–15, 1996.
- 3.4. GRS-Handouts, Bilder (Plots) aus RALOC- MOD4- Rechnungen zum ND-Fall (Abriß der Surge- Line an der Einbindung zur HKL) Nur "In- vessel-Phase" bis ca. 7000s ohne Rekos. Besprechung am 13. Nov. 1997 in Köln.
- 3.5. GRS-Handouts, Bilder (Plots) aus RALOC- MOD4- Rechnungen zum ND-Fall (Abriß der Surge- Line an der Einbindung zur HKL) Nur "In- vessel-Phase" bis ca. 7000s ohne / mit Rekos. Besprechung am 5. Mai.1998 in Karlsruhe.

- 3.6 GRS-Handouts, Bilder (Plots) aus RALOC- MOD4- Rechnungen zum ND-Fall (Abriß der Surge- Line an der Einbindung zur HKL) Nur "In- vessel-Phase" bis ca. 7000s ohne / mit Rekos. Besprechung am 13. Mai. 1998 in Neckarwestheim.
- 3.7 P. Royl , G. Necker, J. W. Spore, J.R. Travis, "3D Analysis of Hydrogen Recombination Experiments in the Battelle Model Containment with the GASFLOW Code ", Jahrestagung Kerntechnik 1998, München.

4 ANHÄNGE

4.1 Anlagenmodellierung

Das Modell für die Anlage des Kernkraftwerkes Neckarwestheim 2 wurde auf der Basis von folgenden Unterlagen erstellt:

- Pläne im Maßstab 1:100 mit folgenden Informationen
 - Komplette Geometrie der Betonstrukturen und Großkomponenten (Beton, Stahl)
 - Verteilung von Berstfolien (vgl. auch [1])
 - Lüftungspläne (auch persönliche Mitteilungen der GRS)

- Angaben über die im Containment verteilten Oberflächen und Massen von Beton und Metall, die von der Gesellschaft für Reaktorsicherheit (GRS), Köln zur Verfügung gestellt wurden. Zur Verwendung dieser Daten mußten auch die Definitionen der RALOC-Räume in das GASFLOW-Rechengitter übernommen werden.

- Verteilung der vorgesehenen Rekombinatoren aufgrund einer Liste die Reko-Typ und Position im Containment spezifiziert [2].

Weitere Eingabe ist die Quelle des überhitzten Wasserstoff-/Wassergemisches entsprechend einer Berechnung mit dem Programm MELCOR.

4.1.1 Allgemeines zur Modellierung der Geometrie

Ingenieurtechnische Probleme, besonders die aus der Wärme- und Strömungsmechanik, werden im allgemeinen in diskretisierter Form gelöst. Bei den bisher in der Reaktorsicherheit gebräuchlichen Lumped-Parameter-Programmen werden die diskreten Rechengebiete durch Zonen

dargestellt, die durch Strömungswege miteinander verbunden sind und bei denen der Austausch von Stoffen und Stoffgrößen über diese Verbindungen erfolgt. Im Gegensatz dazu sind die diskreten Gebilde im verwendeten 3-D Programm GASFLOW Quader, die auch als Rechenzellen oder Zellen bezeichnet werden. Der Stoffaustausch erfolgt hier über die Grenzen der Rechenzellen. Weiterhin ist es möglich, an jeder der sechs Flächen der Quader andere Randbedingungen zu setzen, wie z.B. Festkörper-randbedingungen mit Kondensation oder auch eine vorgegebene Geschwindigkeit (z.B. an der Quelle).¹

Im vorliegenden Fall beträgt die Gesamtzahl der Rechenzellen im Rechengebiet $56 \times 56 \times 42$, was insgesamt 131712 Rechenzellen bedeutet². Nach Abzug der inneren Strukturen und der äußeren Betonschale verbleiben etwa 55300 Zellen, in denen strömungsmechanische Rechnungen stattfinden. Bei den Rechnungen mit Ringspalt besteht das gesamte Rechengebiet aus 218000 Zellen, wovon etwa 70000 strömungsmechanisch berechnet werden.

Zur Modellierung einer realen Containment-Geometrie wird zunächst das Rechengebiet definiert (vgl. Abb. 4.1). Hier ist ein Kompromiß zwischen Machbarkeit (d.h. Anzahl der möglichen Rechenzellen bzw. Rechenzeit) und Auflösung der für die Simulation relevanten physikalischen Phänomene zu finden. Um die Übertragung der Containmentabmessungen von den vorhandenen 2-D Schnitten zu vereinfachen, wurde für das x-y-Grundgitter eine Zahlenweite von 1m gewählt.

Als nächstes definiert man die Zellen bzw. Volumina, in denen *keine* Strömung stattfindet. Diese stellen „dicke“ Wände oder auch andere Strukturen (Kranbahn, reaktortechnische Einbauten, Kugelschale) dar. Die Modellierung „dünner“ Wände besteht darin, über die Fläche zwischen zwei benachbarten Zellen ein Austausch von strömungsmechanischen Größen zu verhindern. Allerdings bleiben ihre Wärmeleitungsparameter erhalten. Dünne und dicke Wände bzw. Strukturen besitzen dann definierte

¹ Aus numerischen Gründen werden die Quader im Rechenprogramm nicht einzeln abgespeichert, sondern zusammenhängend in einem Rechengebiet. Dieses wird als Rechennetz oder auch als Gitter bezeichnet.

Wärmeleitungseigenschaften, wobei ihre Flächen redefiniert bzw. der Realität angepaßt werden können.

Berstoffolien (wie auch Türen) werden wie „dünne“ Wände modelliert, die bei Erreichen einer gewissen Druckdifferenz öffnen.

Somit geschieht die Modellierung von gasgefüllten Volumina indirekt, über die Abbildung von festen Wänden und Einbauten. Die freibleibenden Restvolumina stellen die Räume innerhalb des Reaktorsicherheitsbehälters dar.

4.1.2 Darstellung der Geometrie

Für die schnelle Überprüfung der Gebäudegeometrie und der korrekten Position der Anlageneinbauten wurde eine Grafikschnittstelle geschaffen³, mit dem dreidimensionale Festkörpervolumina, zweidimensionale „dünne“ Wände, Berstoffolien und verteilte Wärmesenken im Rechengebiet identifiziert werden können. Die Grafikschnittstelle benutzt eine farbliche Kodierung, um den notwendigen Überblick zu erhalten. Diese Kodierung wurde folgendermaßen festgelegt:

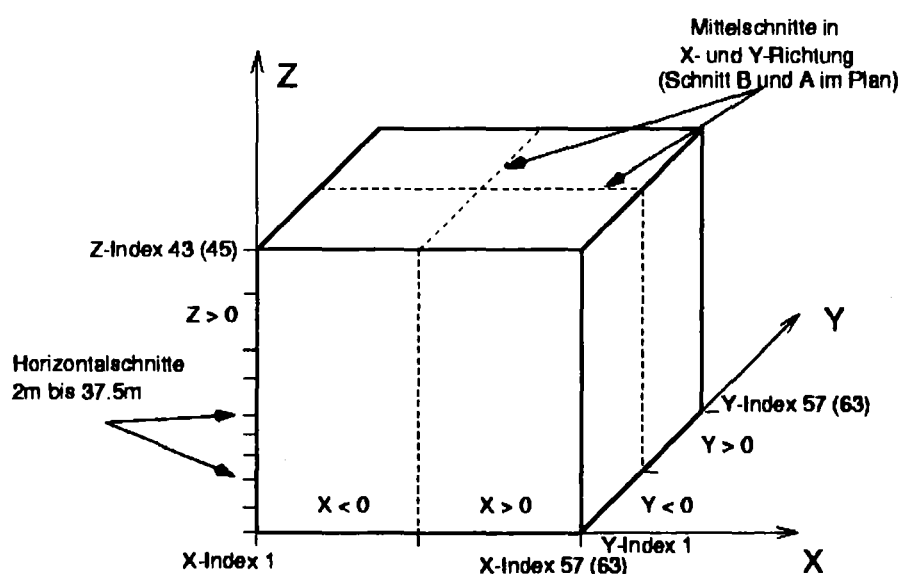


Abb. 4.1: Rechengebiet für das GKN -2 Containment ohne Ringspalt bzw. mit Ringspalt (in Klammern).

² 58x58x44 Rechenzellen inklusive der Randzellen

³ Das benutzte Visualisierungsprogramm heißt „SPEAKEASY“

Farbe	Modellierung
grau	- Festkörpervolumen, z.B. dicke Wände/Decken/ Einbauten
rot	- Infinitesimal dünn modellierte Wände/Decken
blau	- Berstfolien (infinitesimal dünne Wände)
helles blau/rot	- Infinitesimal dünne Strukturen enden in dieser Ebene (kommt nur bei ganzzahligen Indizes vor)
Kreuzschraffur 45°	- Monitorzellen für die jeweiligen RALOC-Räume
Kreuzschraffur 90°	- Rekombinatoren
Hellblaue Linien	- Rechengitter (vgl. folgende Ausführungen)

Die Position der im folgenden aufgezeigten Schnitte folgt aus der Bildunterschrift. Bei diesen Bildern sind die verwendeten Koordinatenachsen links bzw. unten vermerkt, während die Indizes des Rechengitters in den jeweiligen Koordinatenrichtungen rechts und oben vermerkt sind. Die Indizes stehen dabei mit den Koordinaten in folgendem Zusammenhang:

Flächensenkrechte des Schnittes	Index	Koordinate
x	1 - 57	-27.5m - +27.5m
y	1 - 57	-27.5m - +27.5m
z	1 - 42	-2.0m - +50m

Schnitte in der Mitte von Zellen werden in den Bildunterschriften z.B. mit „11 to 12“ bezeichnet. Dieser Schnitt bzw Z-Index wird in der unten aufgeführten Tabelle als 11.5 bezeichnet. Die Überprüfung von horizontalen, unendlich dünnen horizontalen Flächen (wie z.B. die Berstfolien über den Dampferzeugern) erfolgt über ganzzahlige Indizes. Weiterhin werden die ganzzahligen Indizes benötigt, um zu überprüfen, ob z.B. Räume geschlossen sind.

Beispielsweise bedeutet ein Schnitt bei dem X-Index 29, daß es sich hier exakt um einen vertikalen Mittelschnitt mit der Flächensenkrechten in x-Richtung handelt. (In den Plänen Schnitt B).

Rote Strukturen dürfen in graue hineinreichen, lediglich Berstfolien müssen von beiden Seiten frei sein.

4.1.3 Erläuterung zu einigen Anlagenschnitten

In diesem Kapitel werden nur diejenigen Schnitte der Anlagenräume gezeigt, die auch als Konstruktionspläne existieren. Die Querschnitte sind farbig für das erste Anlagenmodell, bei dem der Ringspalt durch Wärmesenken modelliert wurde. Für das erweiterte Geometriemodell mit Stahlschale und Ringspalt sind nur Schwarz/Weiß-Bilder vorhanden. Der komplette Satz aller horizontalen und vertikalen Schnitte ist in Abschnitt 4.1.4 zu finden. Bei allen Schnitten ist zu bemerken, daß sie, im Gegensatz zu den Konstruktionsplänen, *keine* „Tiefe“ haben, d.h. im Horizontalschnitt von $z=9$ m sind nur die Anlageneinbauten dieser Horizontalebene zu erkennen, während in dem entsprechenden Konstruktionsplan auch Einbauten eingezeichnet sind, die in darunterliegenden Ebenen angeordnet sind.

4.1.3.1 Schnitt A

Hier ist in der unteren Mitte unten der RDB zu erkennen, die rechte rote Struktur bei Index 14 bis 21 zeigt das Treppenhaus im Osten und oben ist ein Teil des Krans dargestellt.

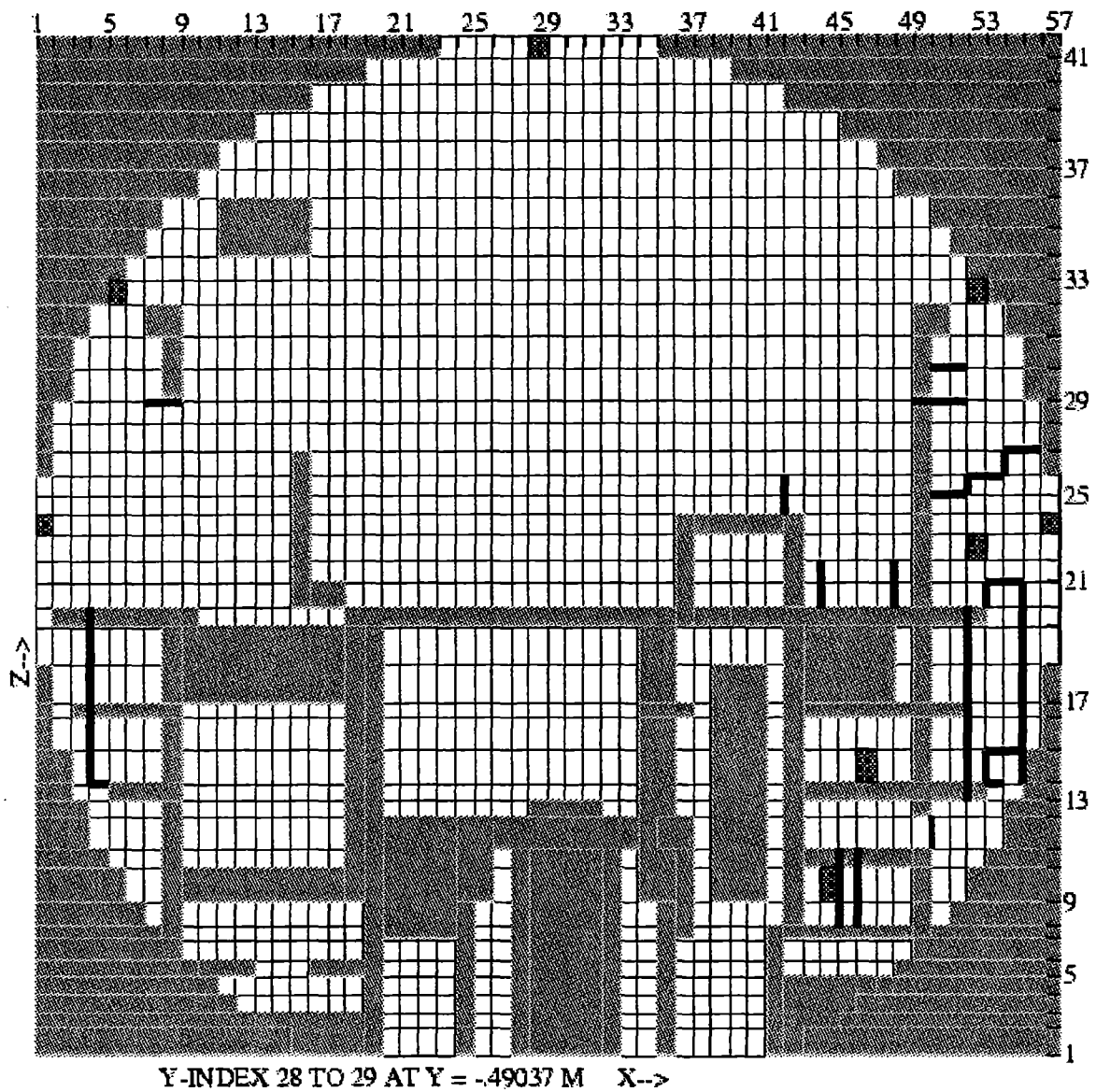


Abb. 4.2: Schnitt A (Schnitt in y-Richtung in Mittelebene)

Der gleiche Schnitt für die Geometrie mit voll modelliertem Ringspalt zeigt die kugelförmige Stahlschale, den Ringspalt, und die daran anschließende Betonschale. Die Modellierung unterhalb des Index 22 ist jeweils zylindrisch.

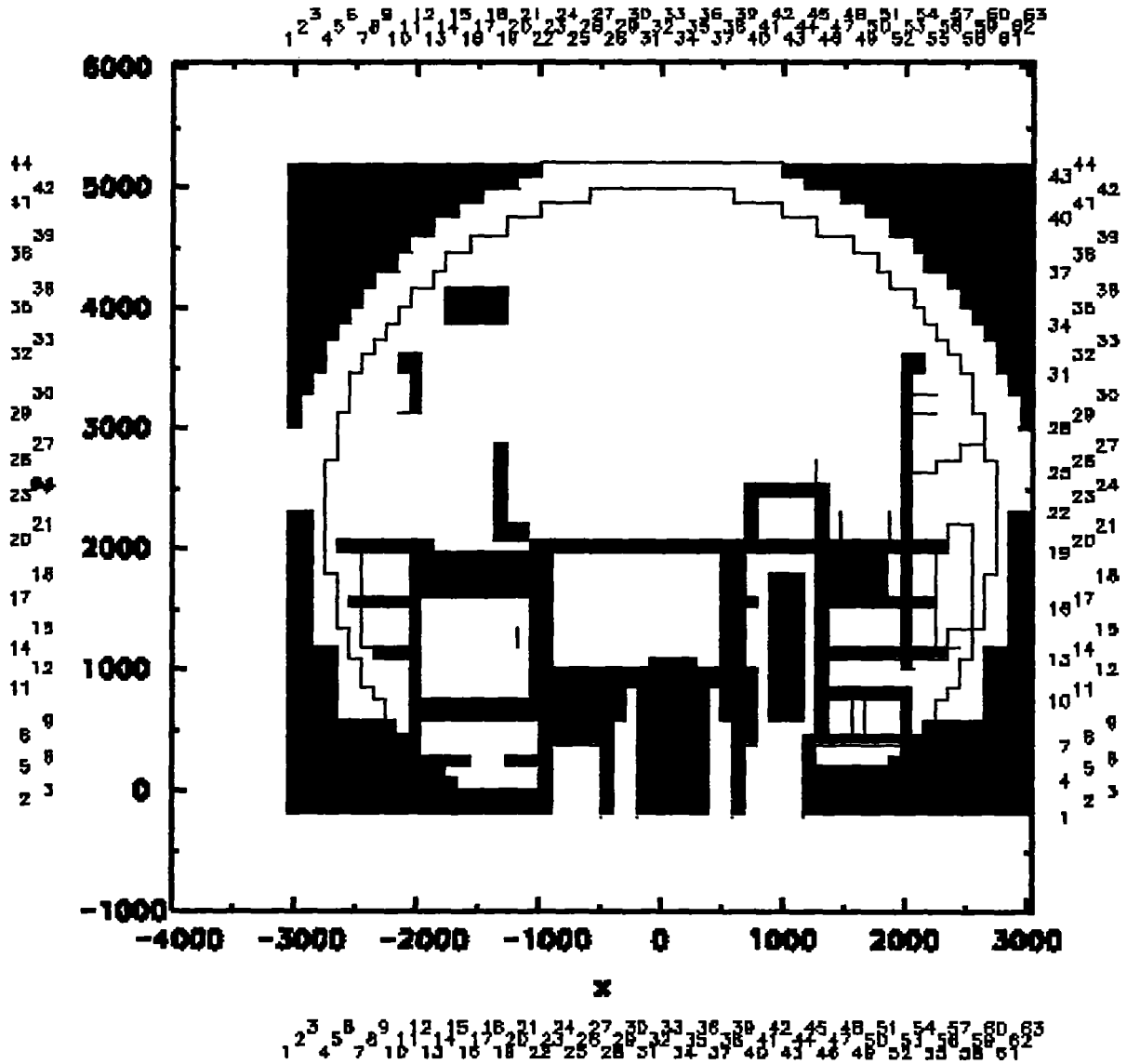


Abb4.3: Schnitt A mit Darstellung des Ringspaltes

4.1.3.2 Schnitt B

Auch hier ist in der Mitte der angeschnittene RDB zu erkennen, rechts und links im Bild sind die Lüfterzentralen dargestellt. In diesem Schnitt liegen auch die Rekombinatoren 5, 6, 17, 19 und 23. Die Schraffur unterhalb der Rekombinatoren bedeutet, daß auch hier die Zustandsgrößen der Rechnung überwacht werden, um die Zuströmung zu dem Rekombinatoren zu registrieren. Die übrigen schraffierten Zellen kennzeichnen Sensorpositionen.

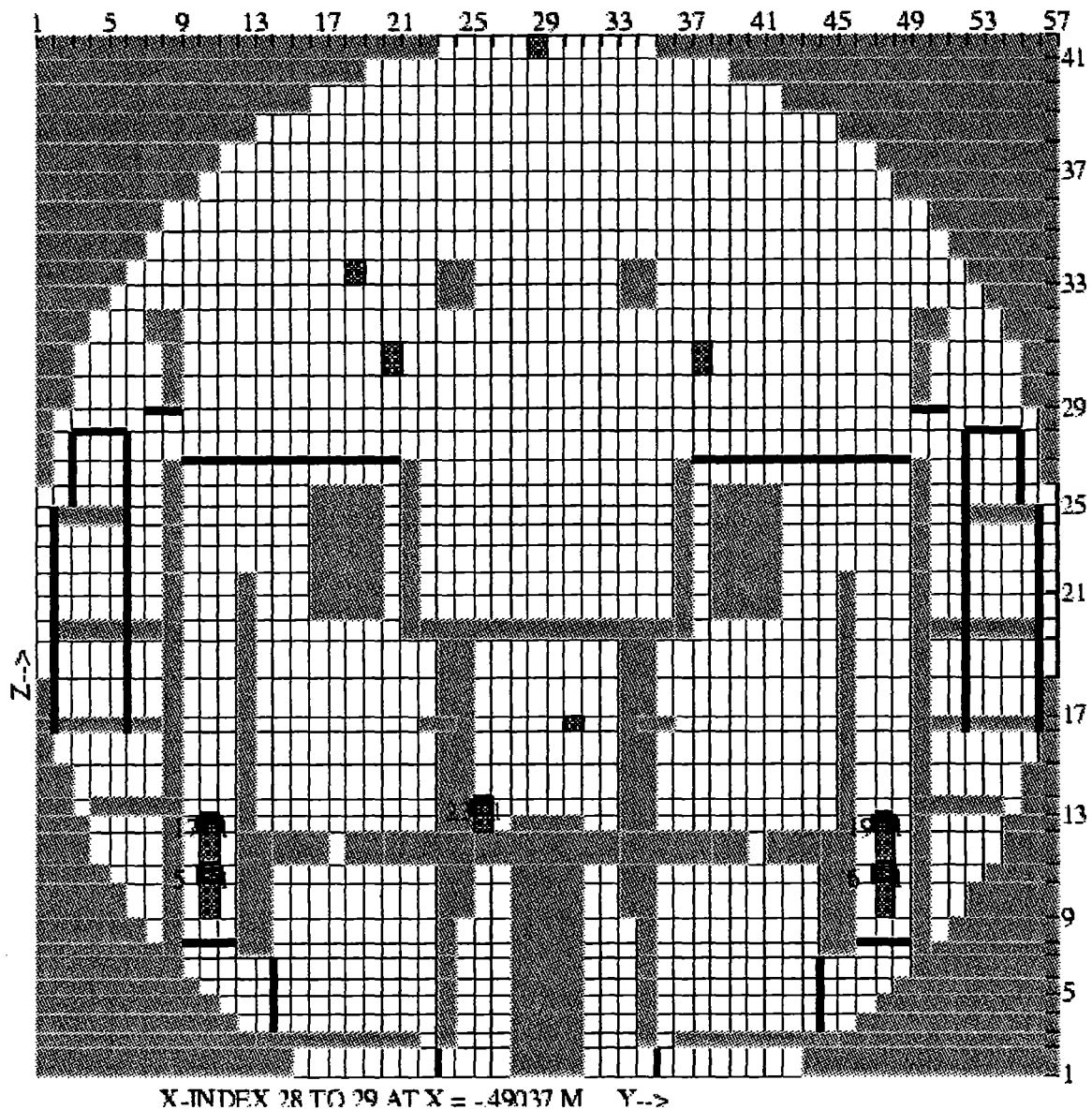


Abb.4.4: Schnitt B (Schnitt in x-Richtung in Mittelebene)

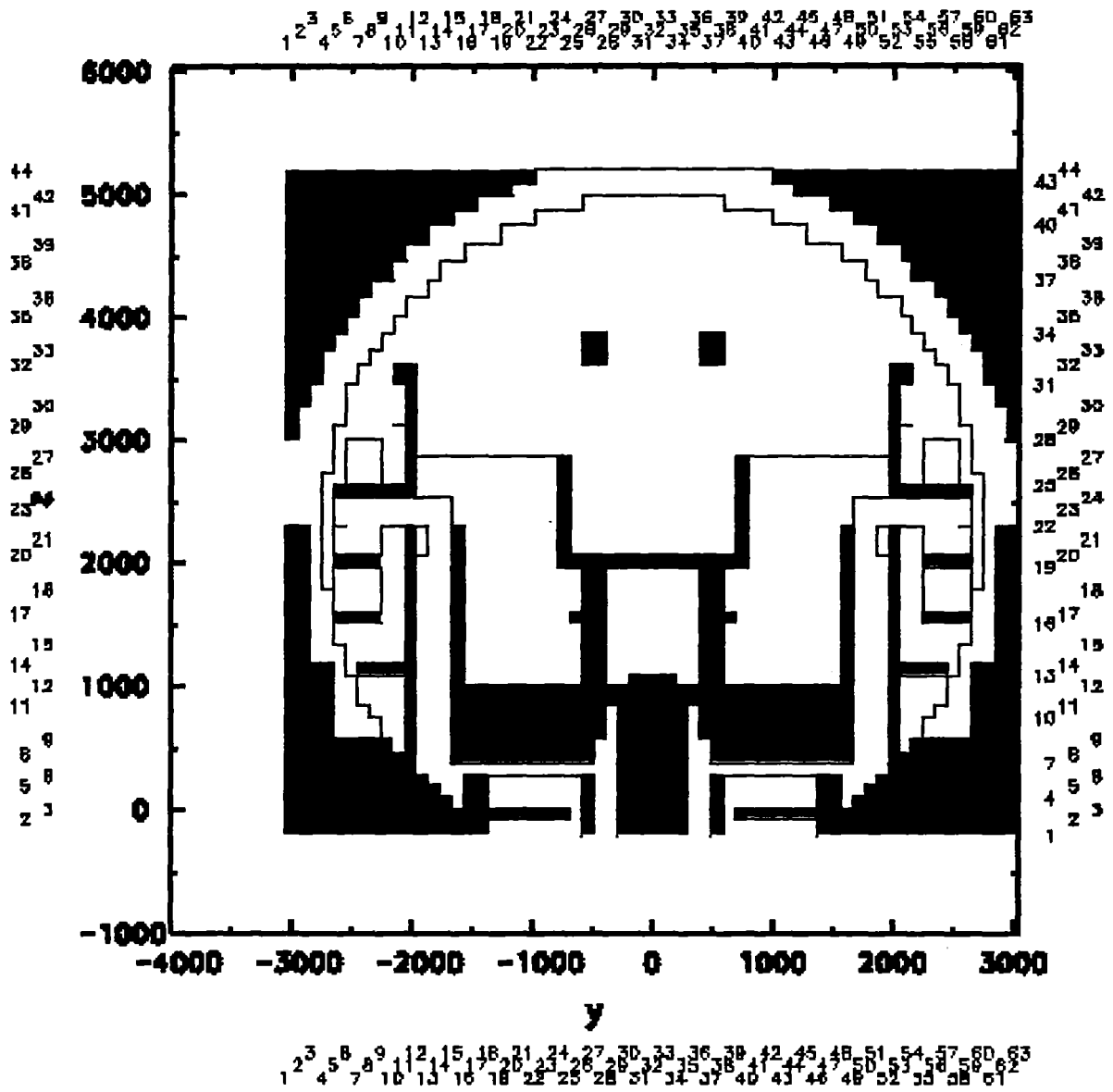


Abb.4.5: Schnitt B mit Darstellung des Ringspaltes

4.1.3.3 Schnitt C

Hier ist links der Aufzug dargestellt. Weiterhin geht der Schnitt durch zwei Hauptkühlmittelpumpen (Z-Index 9 bis 17). Die grossen Vierecke in der Mitte des Bildes stellen die vertikal angeschnittenen „Köpfe“ der Dampferzeuger dar. Unten in der Mitte sind noch zwei Rohre des Hauptlüftungssystems zu erkennen.

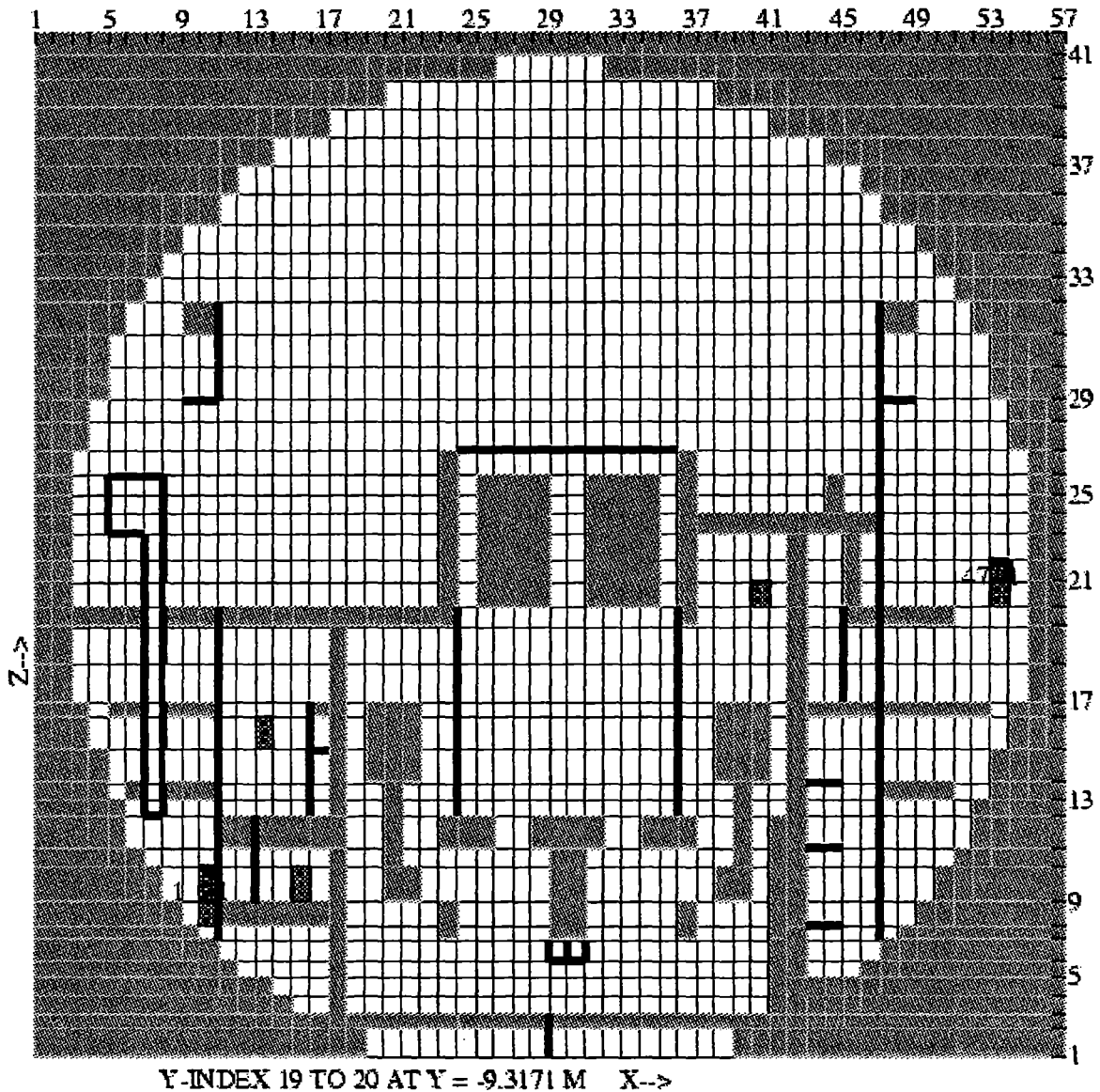


Abb.4.6: Schnitt C (Schnitt in y-Richtung in Mittelebene minus 9 m)

4.1.3.4 Schnitt D

In diesem Schnitt sind ebenfalls zwei Hauptkühlmittelpumpen zu erkennen, weiterhin der Druckhalter und der Druckhalterabblasetank. Unten in der Mitte sind wieder zwei Rohre des Hauptlüftungssystems zu erkennen. Schraffiert dargestellt sind Sensorpositionen, an denen die berechneten Zustandsgrößen als Funktion der Zeit registriert werden. Die Sensoren wurden meist in der Mitte von RALOC-Räumen gesetzt.

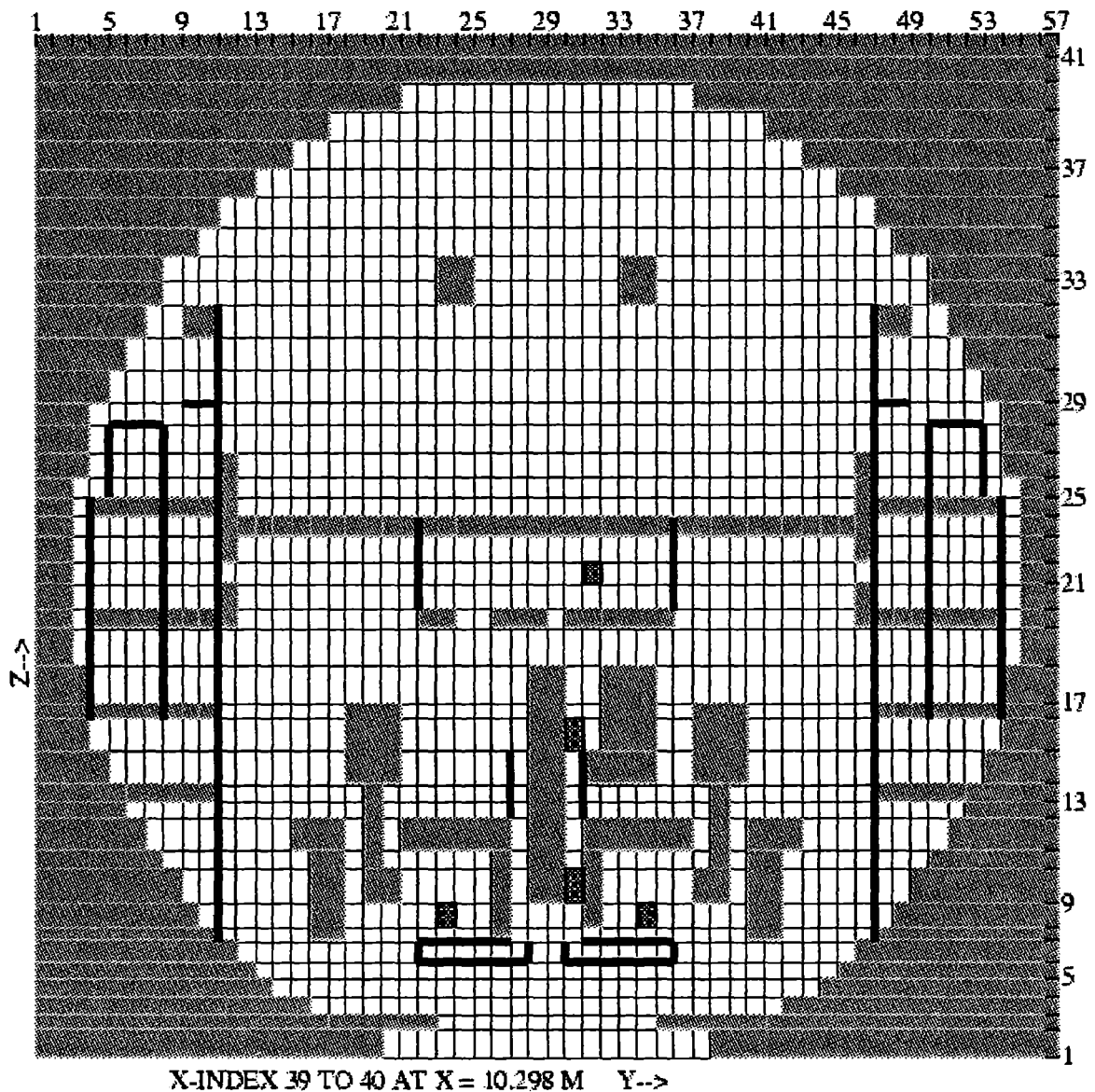


Abb.4.7: Schnitt D (Schnitt in x-Richtung in Mittelebene plus 10.7m)

4.1.3.5 Schnitt E

Hier sind die Treppenhäuser im Nord- und Südwesten modelliert, weiterhin sind außen zwei teilweise angeschnittene Druckspeicher zu erkennen.

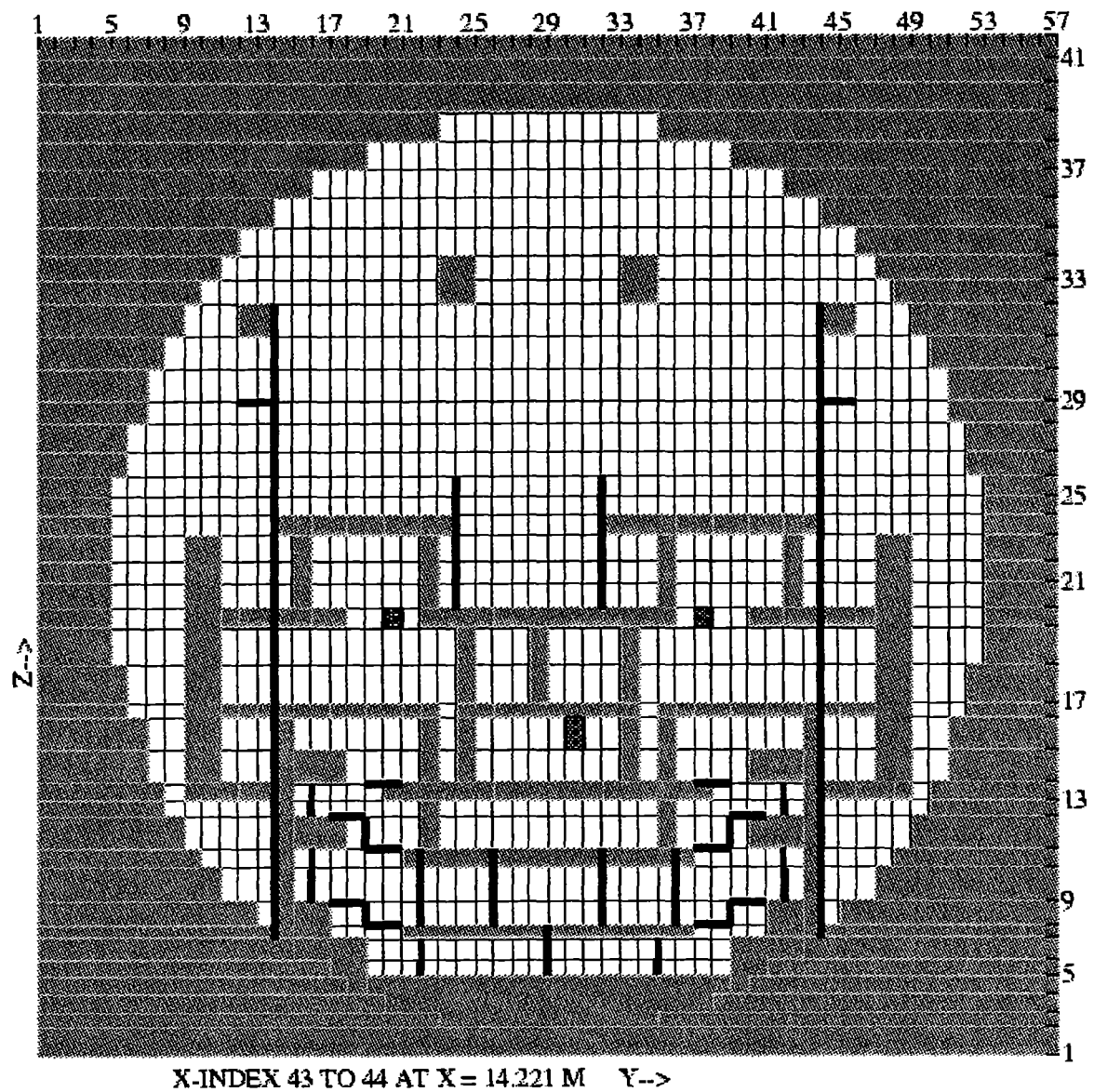


Abb.4.8: Schnitt E (Schnitt in x-Richtung in Mittelebene plus 14.7m)

4.1.3.6 Horizontalschnitte

Ebene 2,0 m

Hier erkennt man den RDB in der Mitte, oben und unten ist das Hauptlüftungssystem mit den Auslässen zu erkennen, Das linke Langloch der Größe 1 x 3 m stellt einen Durchbruch für eine Treppe dar.

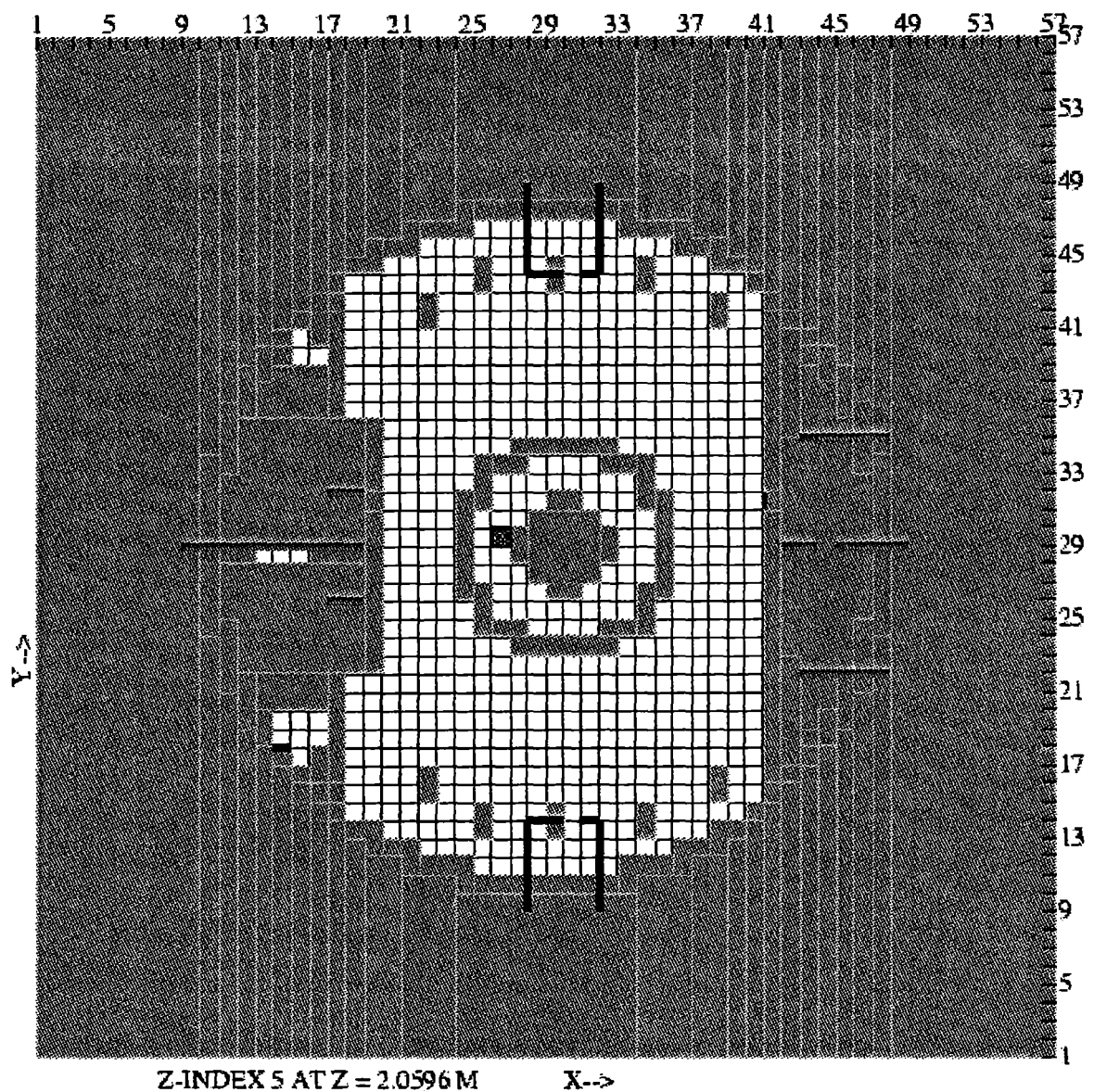


Abb. 4.9: Schnitt in der Ebene z=2.0 m

Ebene 6,0 m

In dieser Ebene liegen viele Rekombinatoren, außen ist der Spalt zwischen Kugelschale und Decke modelliert, rechts sind die Anlagenräume zu sehen.

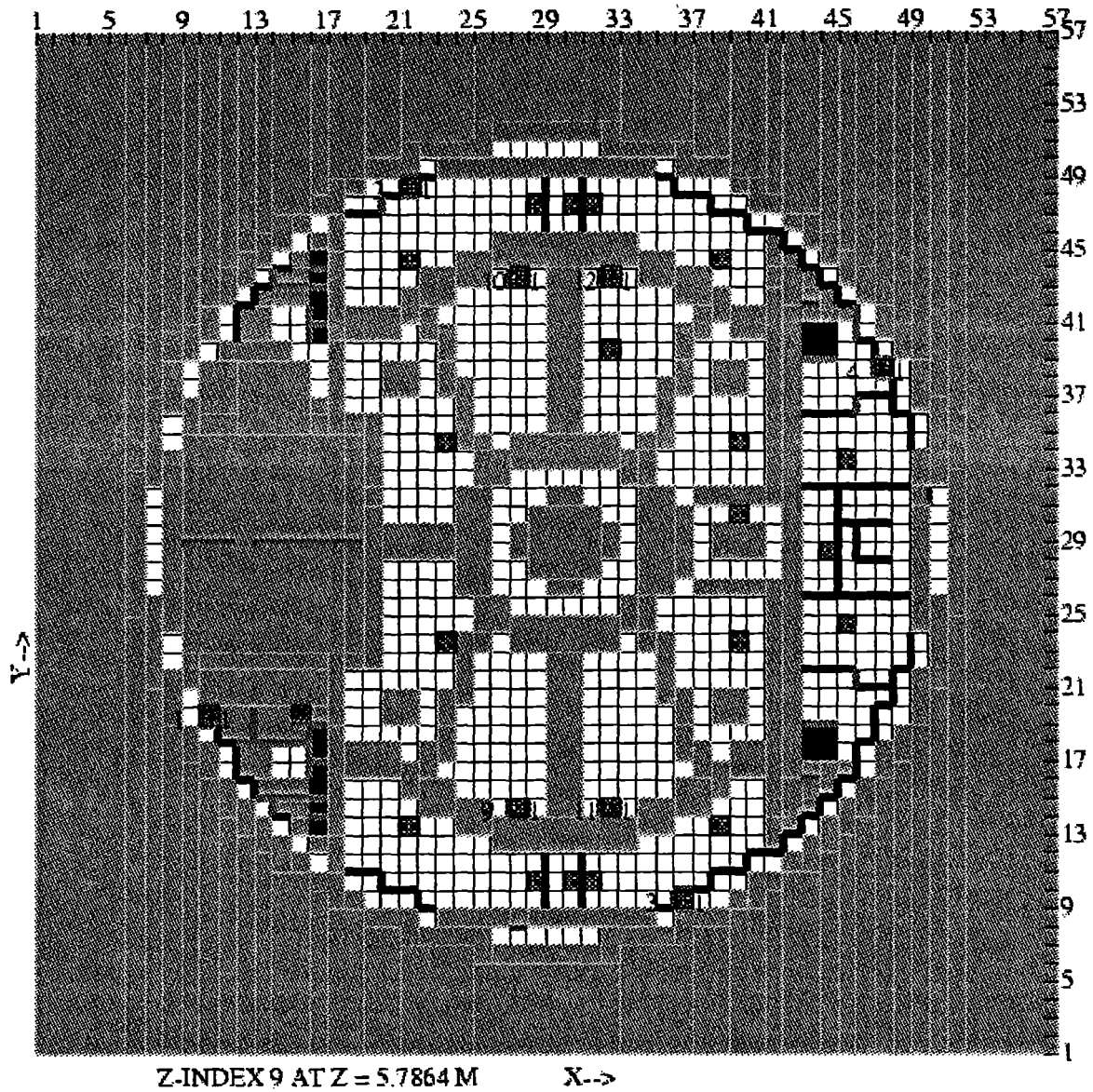


Abb. 4.10: Schnitt in der Ebene z=6.0 m

Ebene 9,0 m

Die 9-m-Ebene ist relativ geschlossen. Zu erkennen ist links das Abklingbecken, ein Schnitt durch die Pumpenschäfte an vier Stellen. Zwischen den Pumpen befinden sich die Dampferzeuger. Der eigentlich gleichmäßige Spalt um die Dampferzeuger ist durch je 6 Löcher gleichen Querschnittes modelliert. Rechts befindet sich der Druckhalter.

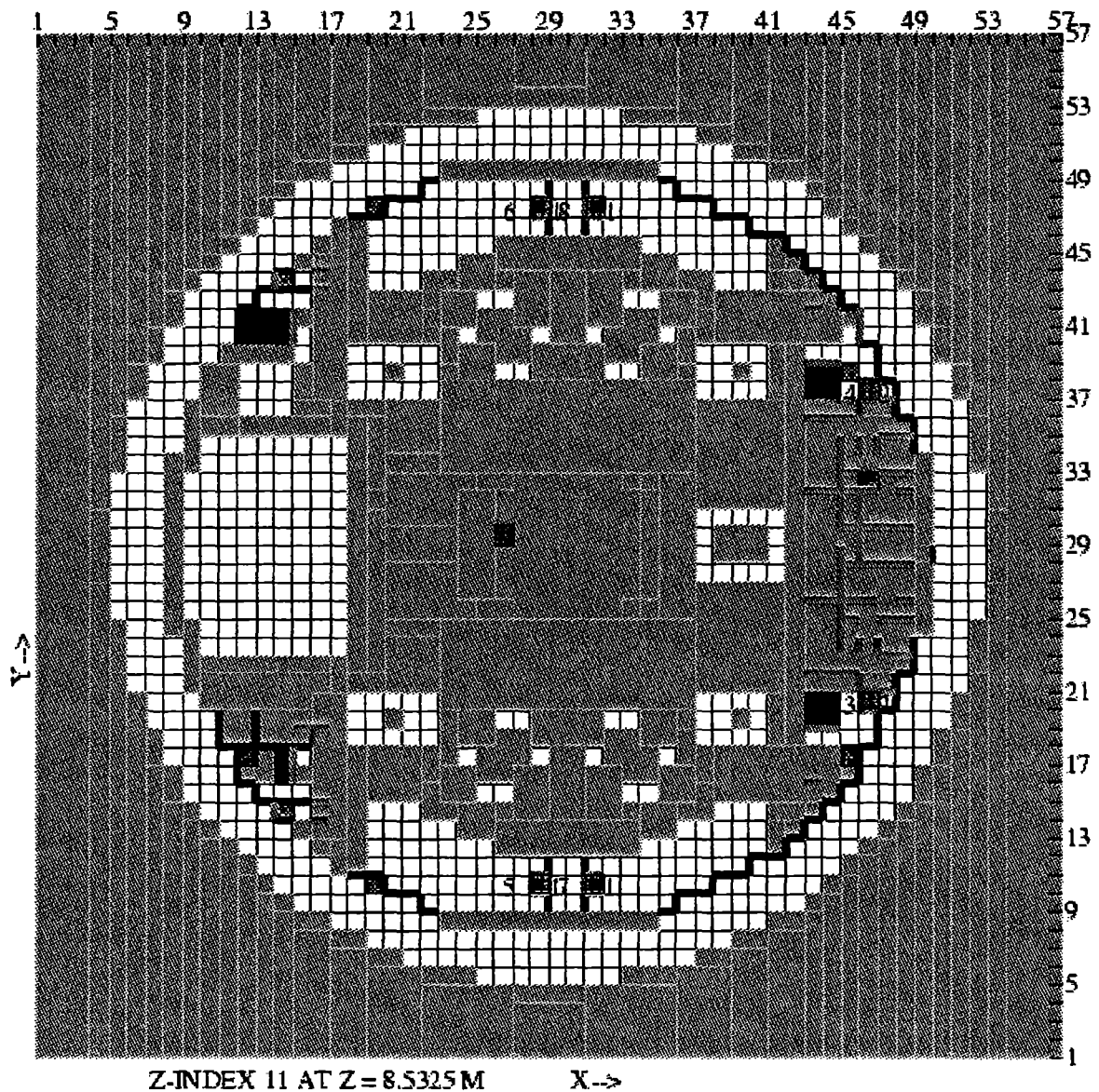


Abb.4.11: Schnitt in der Ebene z=9.0 m

Ebene 12,0 m

Dieser Horizontalschnitt geht durch die vier Pumpen und Dampferzeuger sowie durch den Druckhalter und den Druckhalterabblasetank.

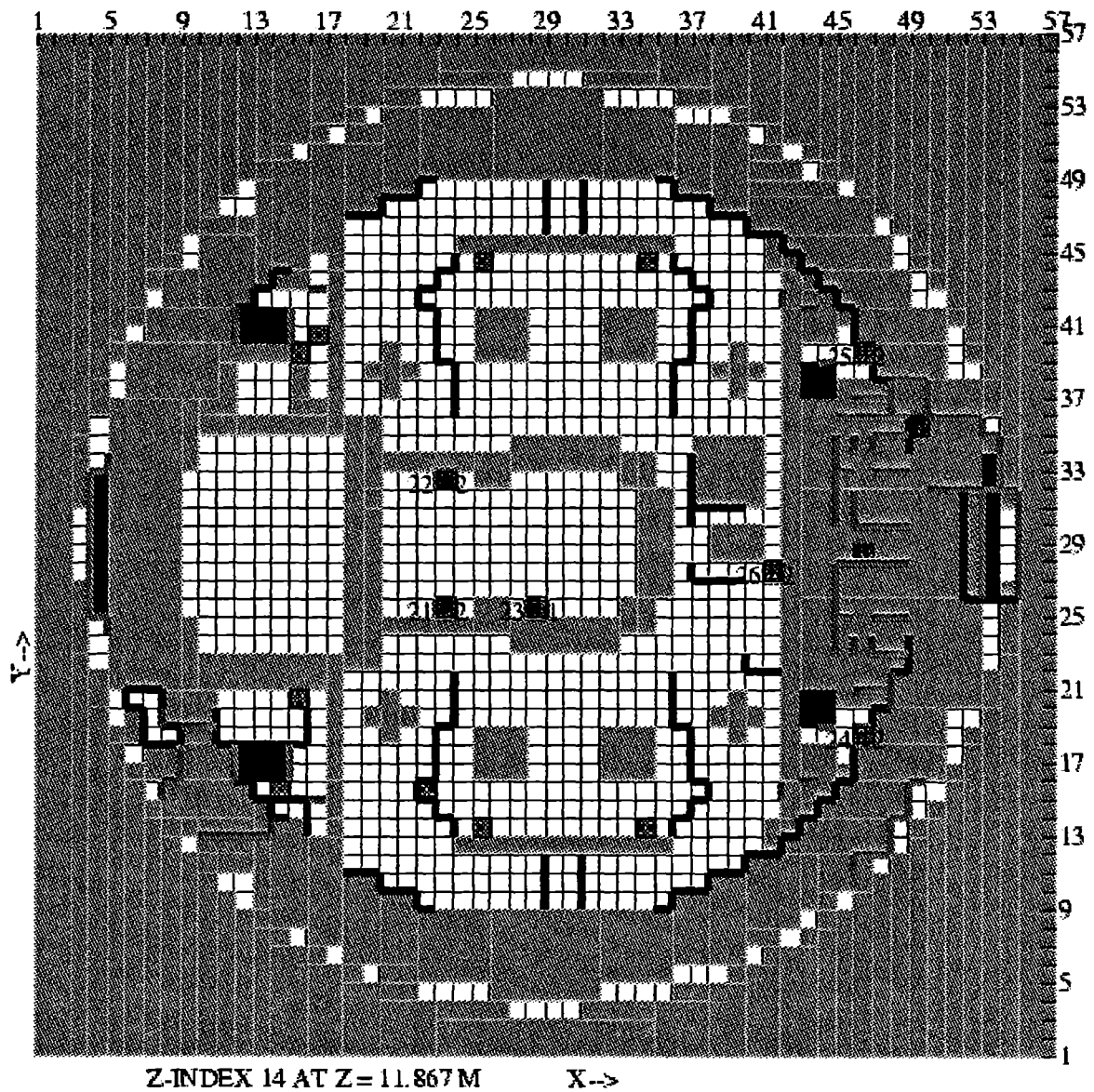


Abb.4.12: Schnitt in der Ebene $z = 12,0$ m

Ebene 16,4 m

Hier ist rechts das Treppenhaus geschnitten, links unten der Aufzug, weiterhin sind die Köpfe der Pumpen zu sehen. Diese Ebene stellt gleichzeitig den Boden der unteren Hauptlüfterräume dar. Auch hier sind Druckhalter und Druckhalterabblasetank dargestellt.

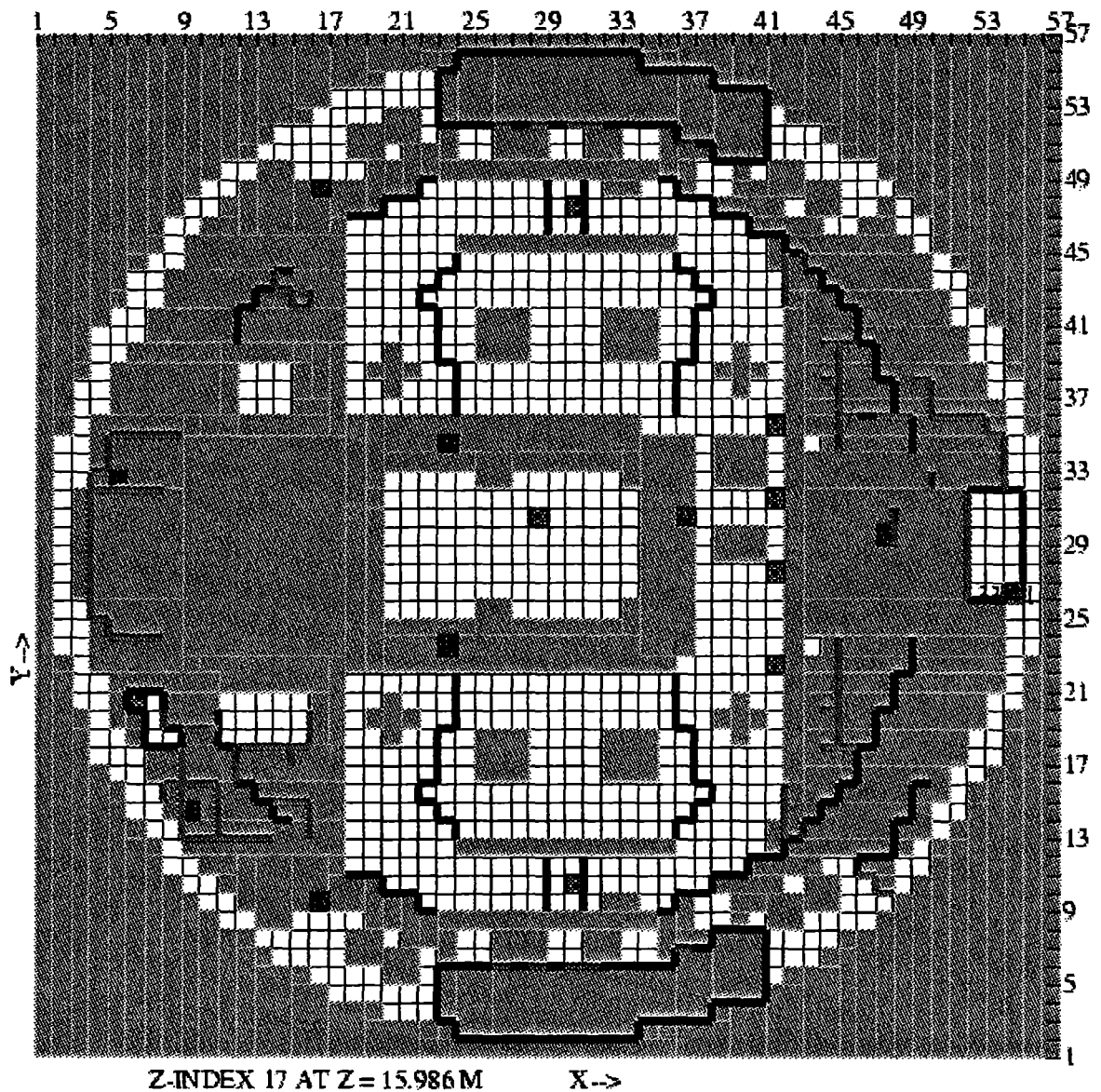


Abb. 4.13: Schnitt in der Ebene $z = 16.4$ m

Ebene 21,5 m

Diese Ebene stellt den Boden der oberen Hauptlüfterräume dar. Oben und unten sind die 8 Druckspeicher zu sehen, rechts ist das Treppenhaus und unten links der Aufzug abgebildet.

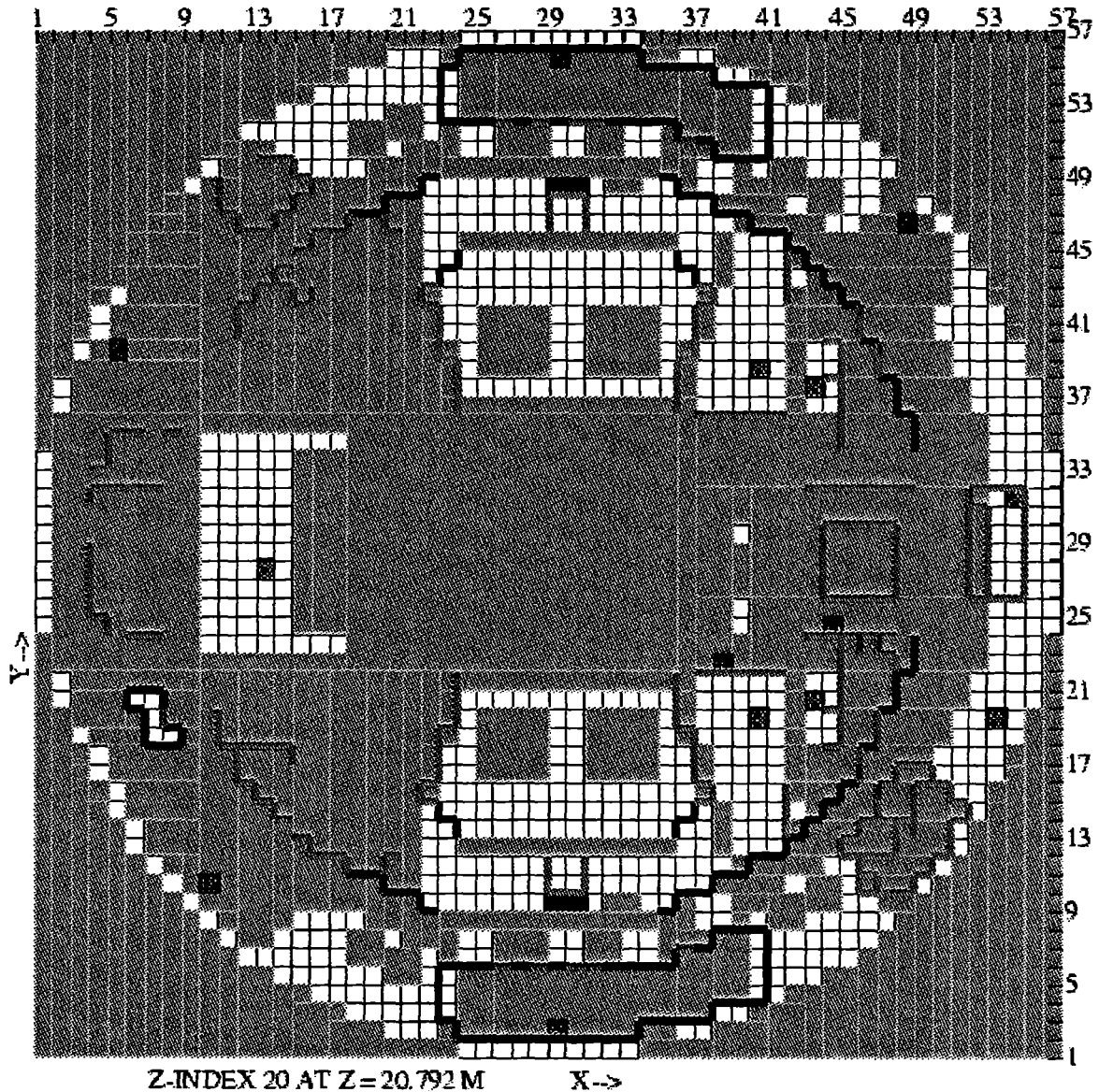


Abb.4.14: Schnitt in der Ebene z = 21.5 m

Ebene 29,3 m

Hier ist die Ebene mit den Berstfolien in den Dampferzeugertürmen zu erkennen. Jede Folie hat eine Fläche von rund 2 m^2 , die beim Überschreiten des Berstdrucks zu 70% öffnet. Die verschiedenen Berstdrücke sind über die gezeigten Folien statistisch gleichverteilt.

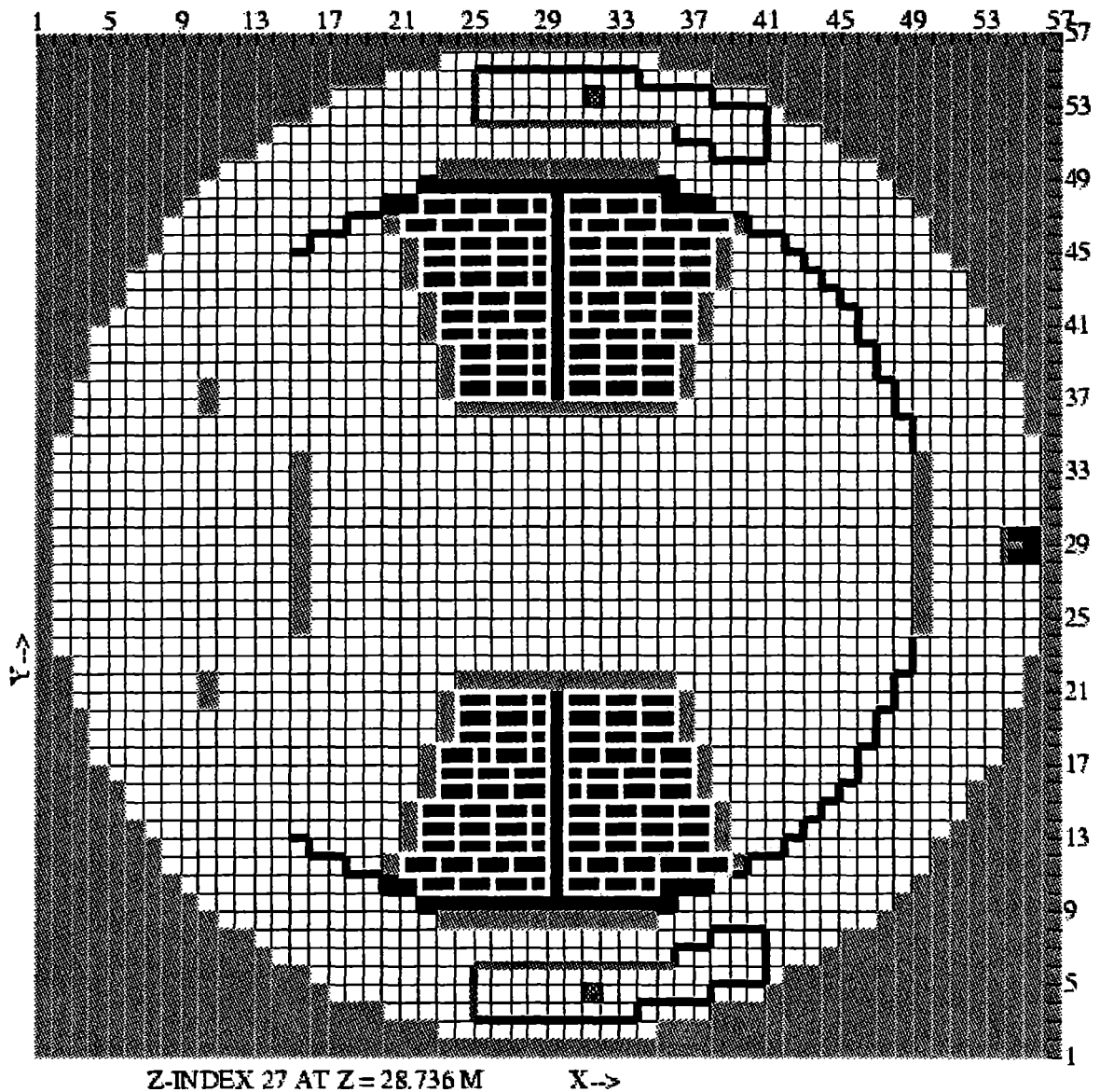


Abb.4.15: Schnitt in der Ebene $z=29.3 \text{ m}$ (Berstfolienebene)

Ebene 37,0 m

Zu erkennen sind hier die Krantragebalken und die zugehörige Rundlaufauflage.

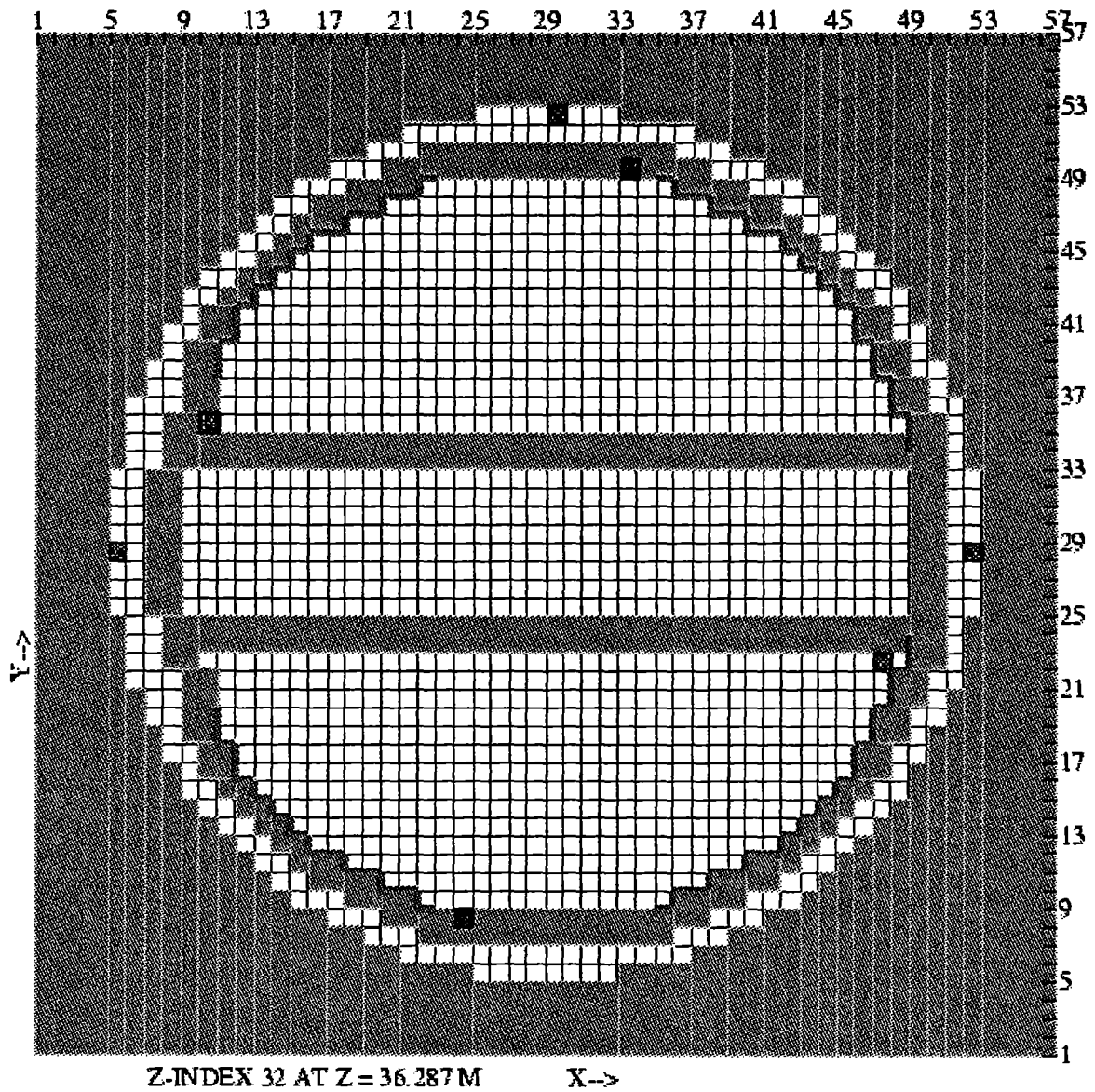


Abb. 4.16: Schnitt in der Ebene z = 37,0m

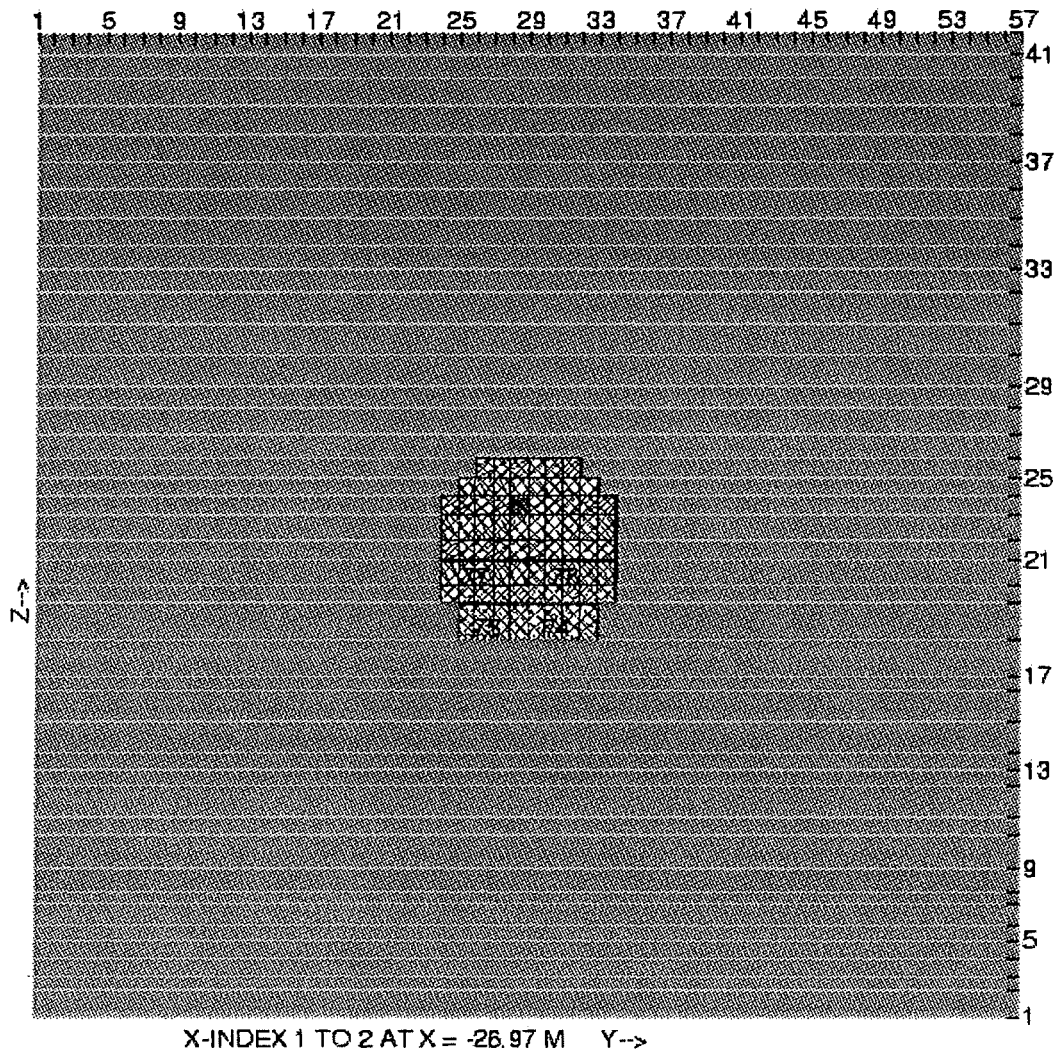
4.1.4 Gesamtdarstellung aller Anlagenschnitte

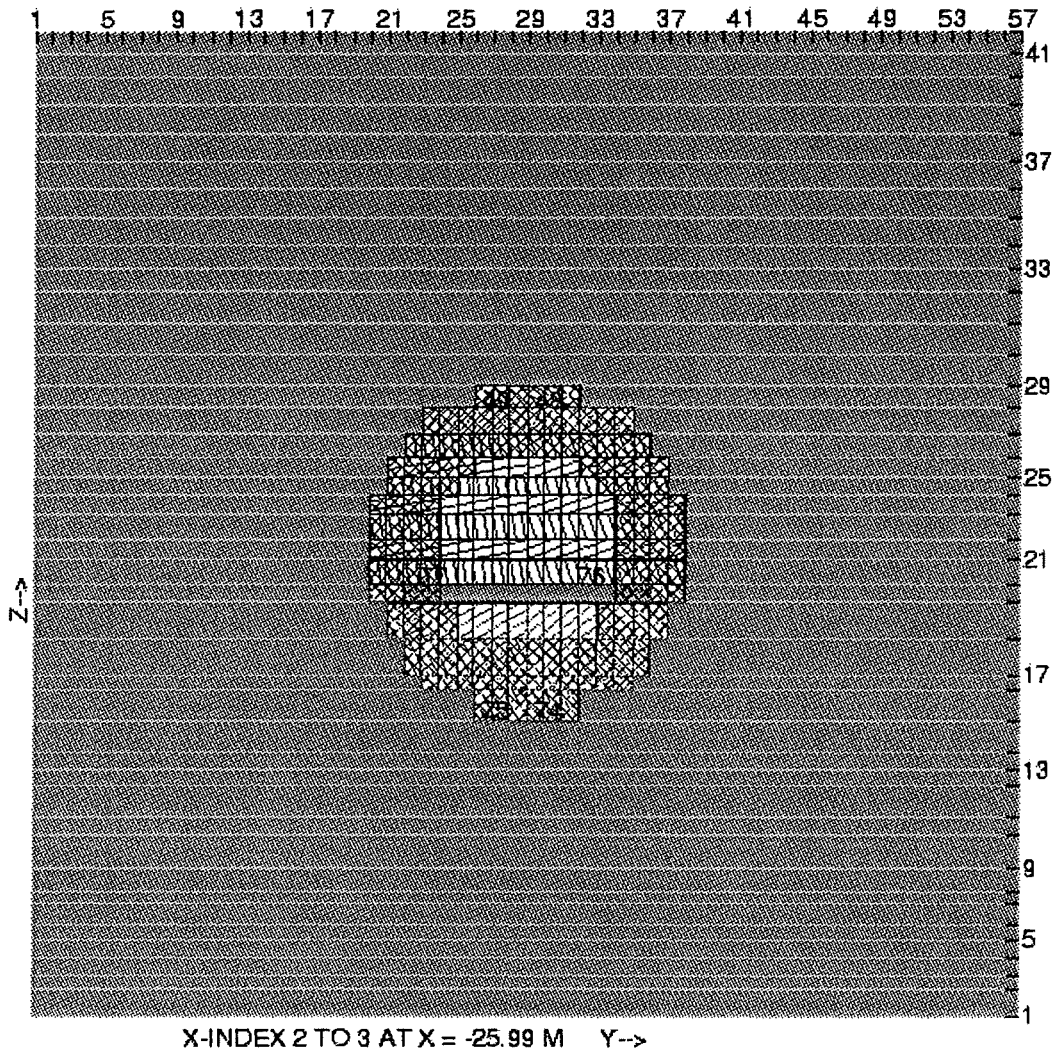
Zur Dokumentation des verwendeten 3-D Anlagenmodells werden in diesem Abschnitt je ein vollständiger Satz von horizontalen und vertikalen Schnitten gezeigt (x -y -bzw. y -x -Ebenen).

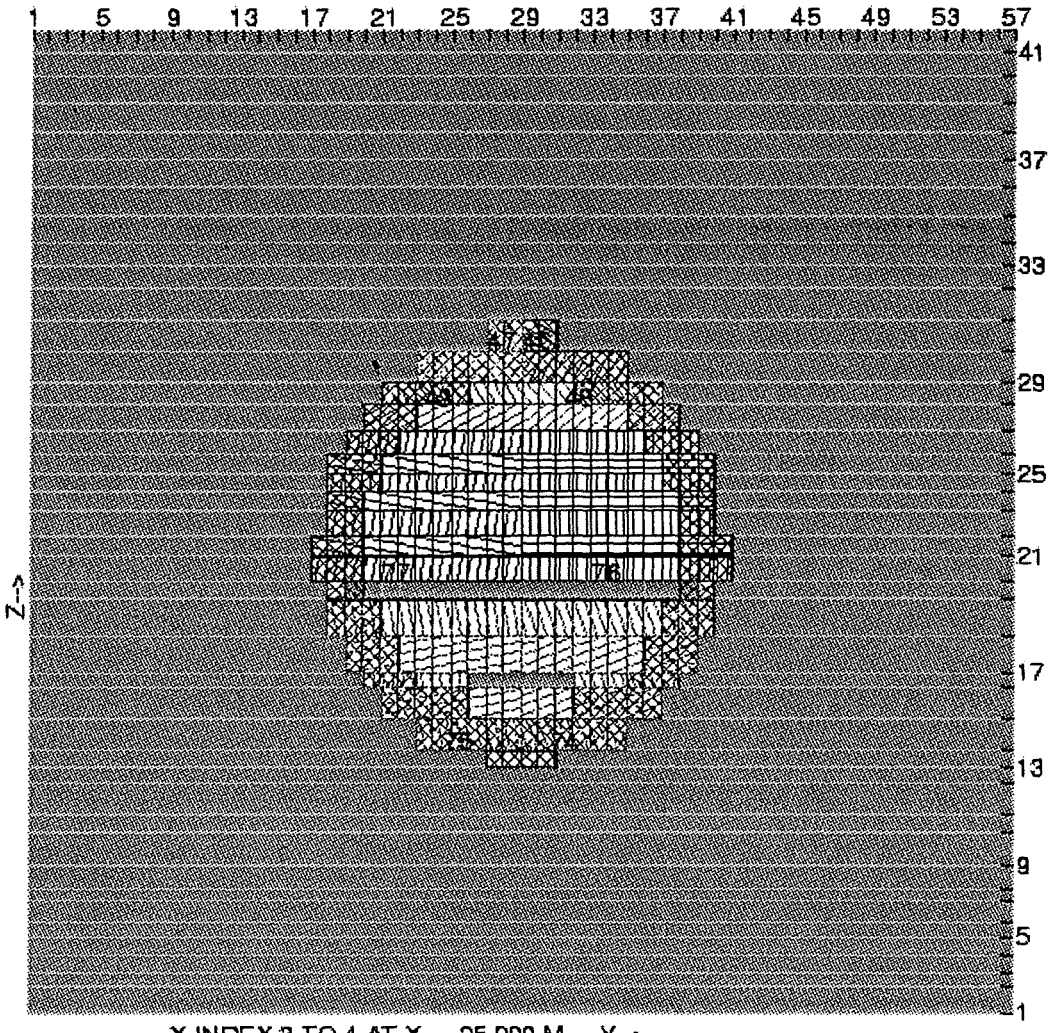
Die Schnitte verlaufen durch die Mitte der Raumzellen und der räumliche Abstand zwischen zwei aufeinanderfolgenden Schnitten beträgt eine Gitterzelle, d.h. 1 m.

Die Geometrieinformation in den nachfolgenden Schnitten wurde aus vorhandenen 2-D-Plänen der Anlage GKN-2 entnommen und per Hand in das 3-D GASFLOW-Rechennetz übertragen. Zur Qualitätssicherung wurde das Geometriemodell in mehreren Treffen mit GKN-2 und GRS-Mitarbeitern überprüft. Die nachfolgenden Abbildungen verdeutlichen die Tatsache, daß die Erstellung des Geometriemodells für GKN-2 den größten Arbeitsanteil an den Analysen insgesamt erforderte.

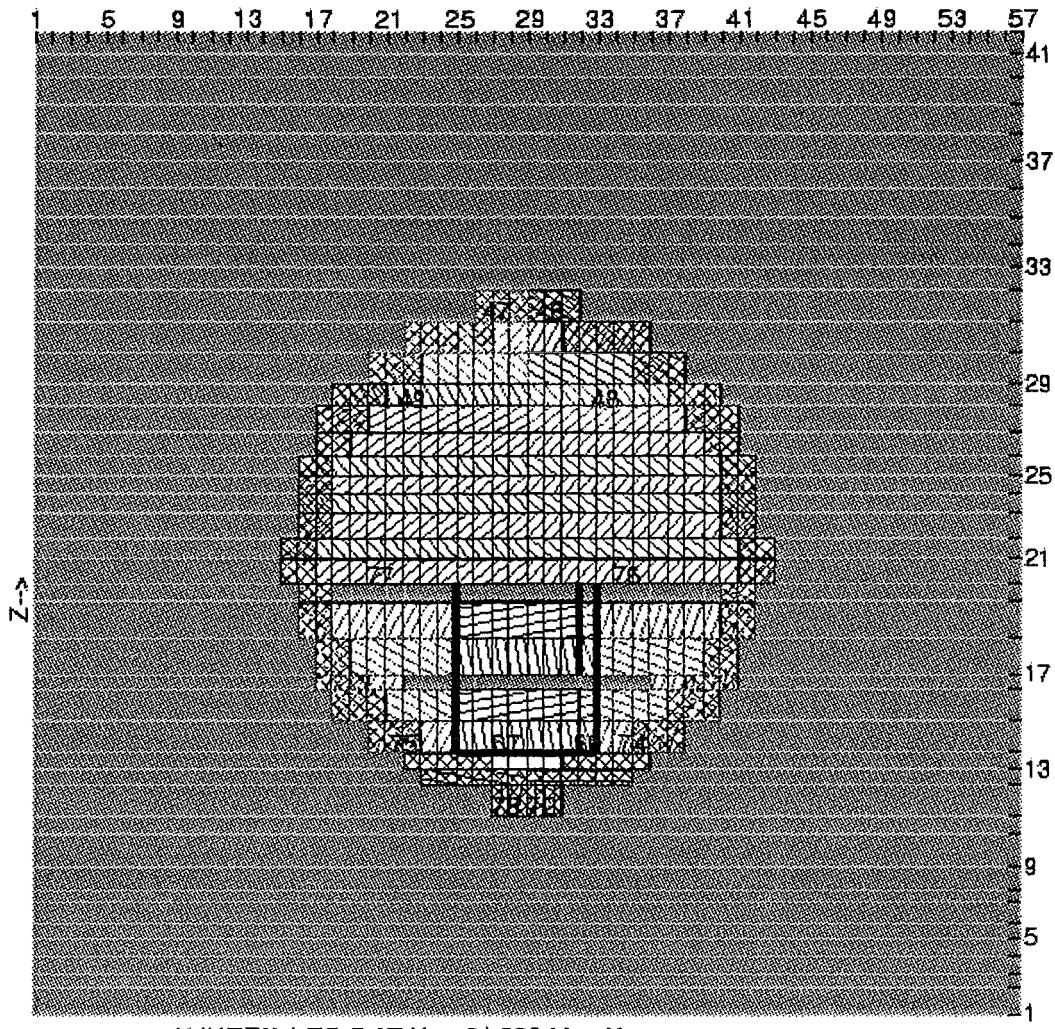
Auf die Darstellung der RALOC-Raumdefinitionen in diesen Schnitten wurde aus Gründen der Übersichtlichkeit verzichtet, ebenso sind die Rekombinatoren und Sensoren hier nicht eingetragen.



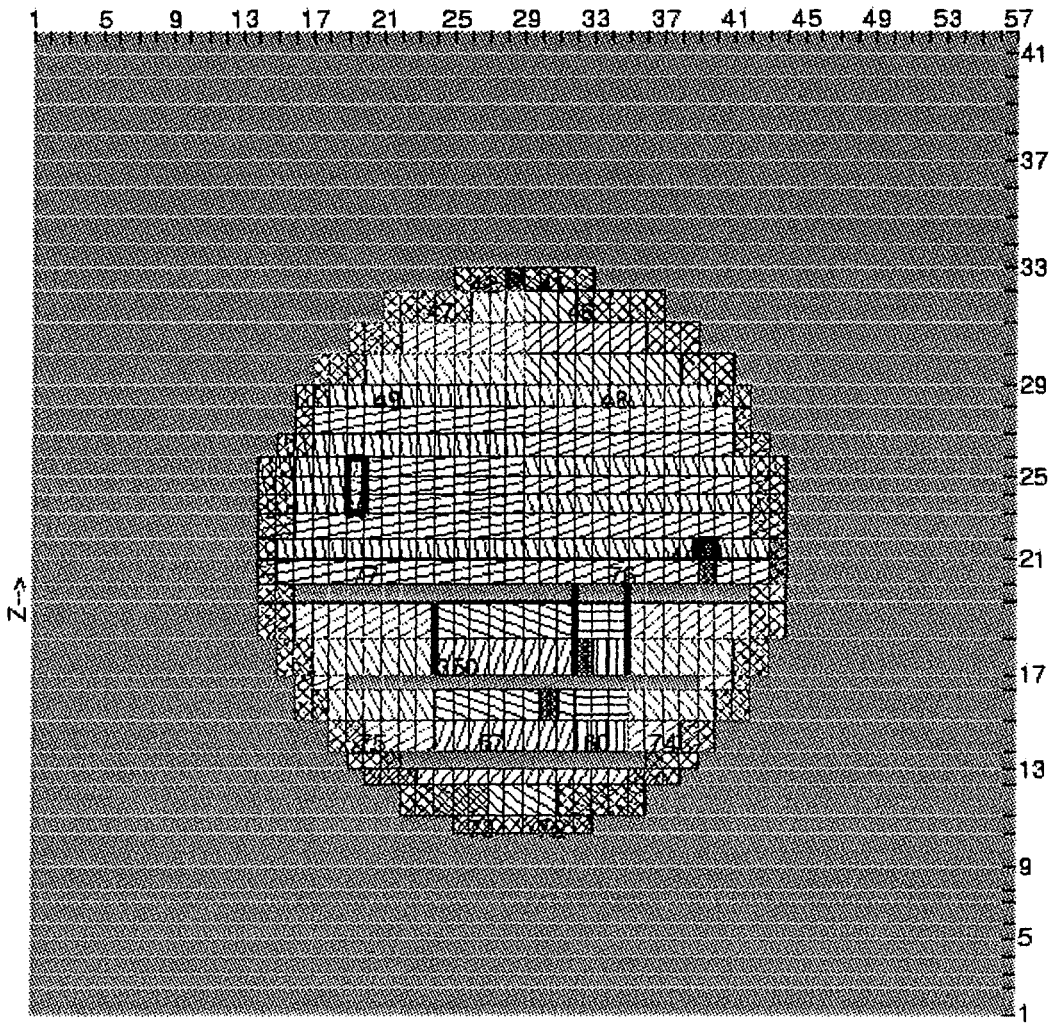




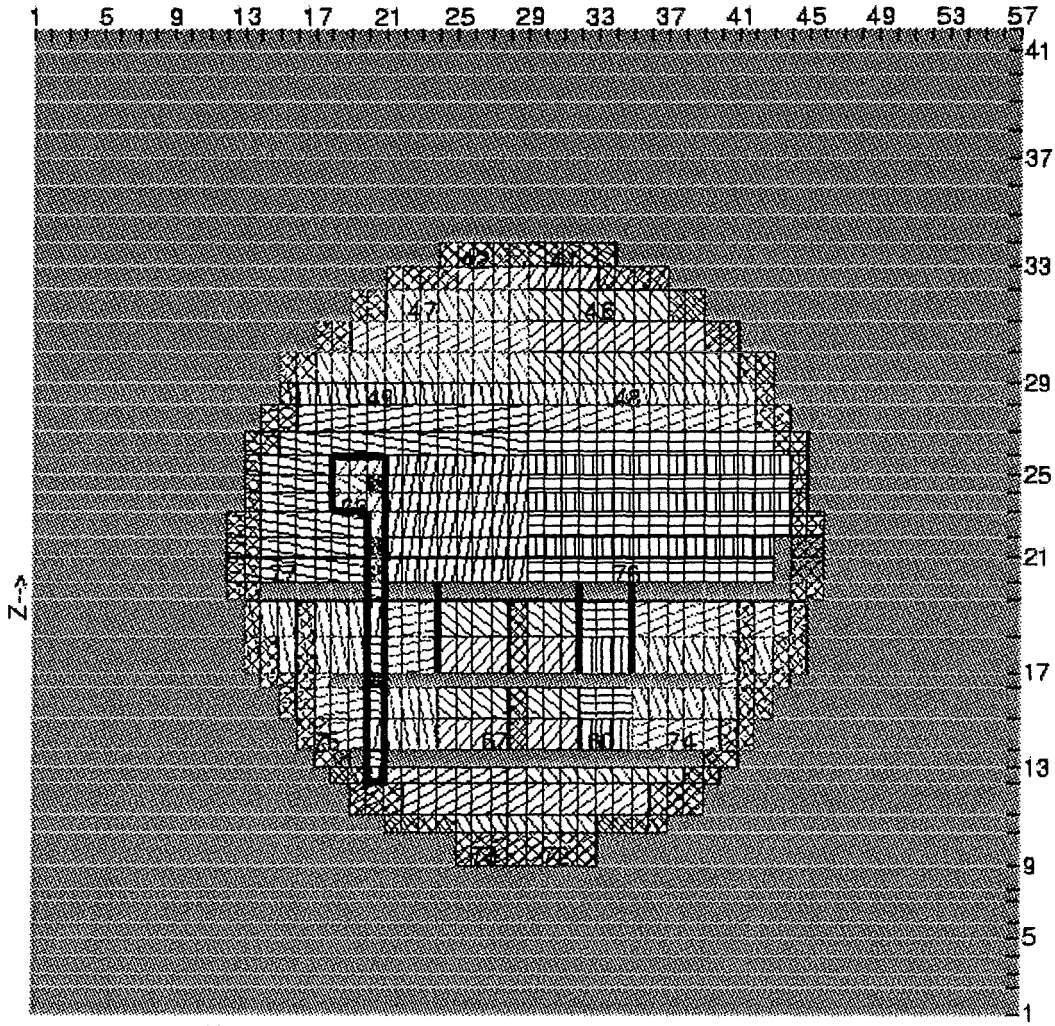
X-INDEX 3 TO 4 AT X = -25.009 M Y-->



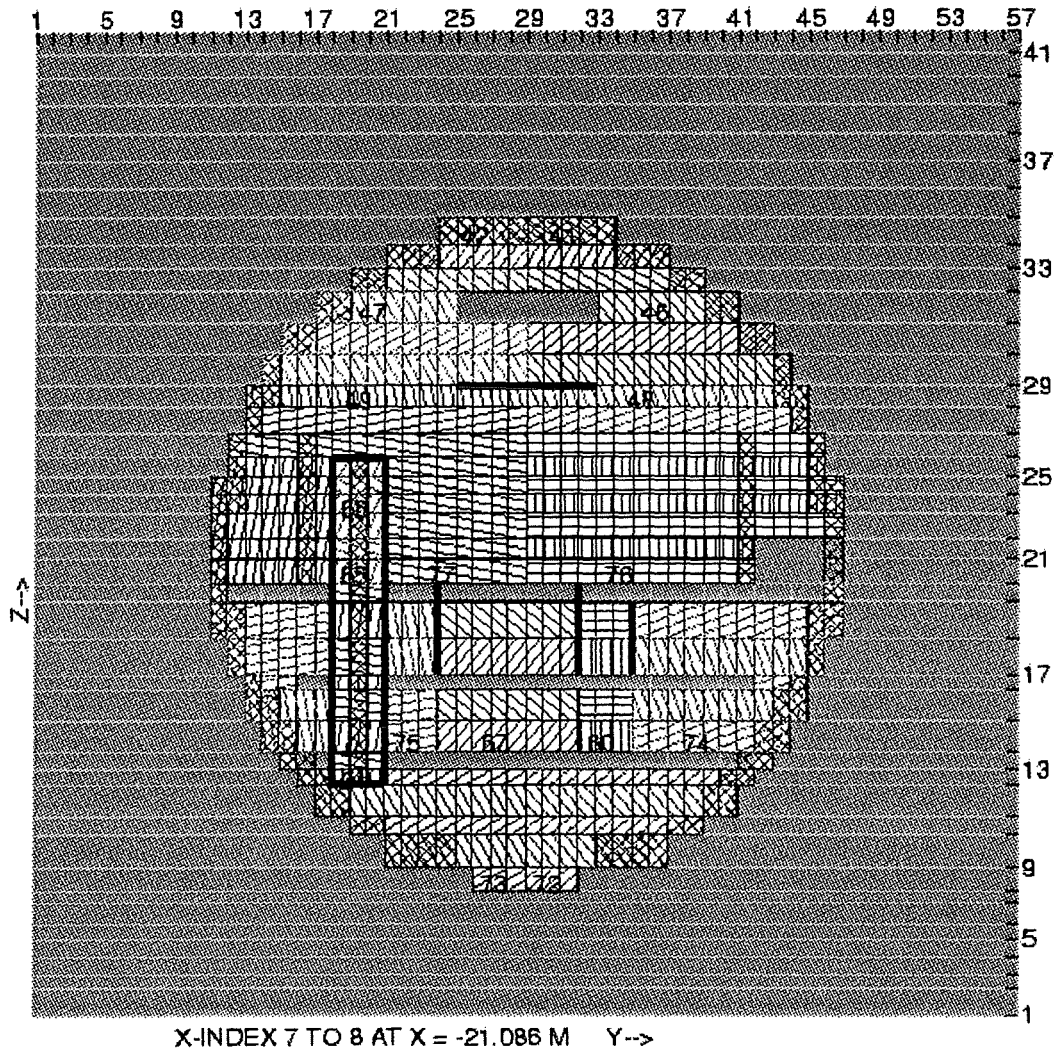
X-INDEX 4 TO 5 AT X = -24.028 M Y-->

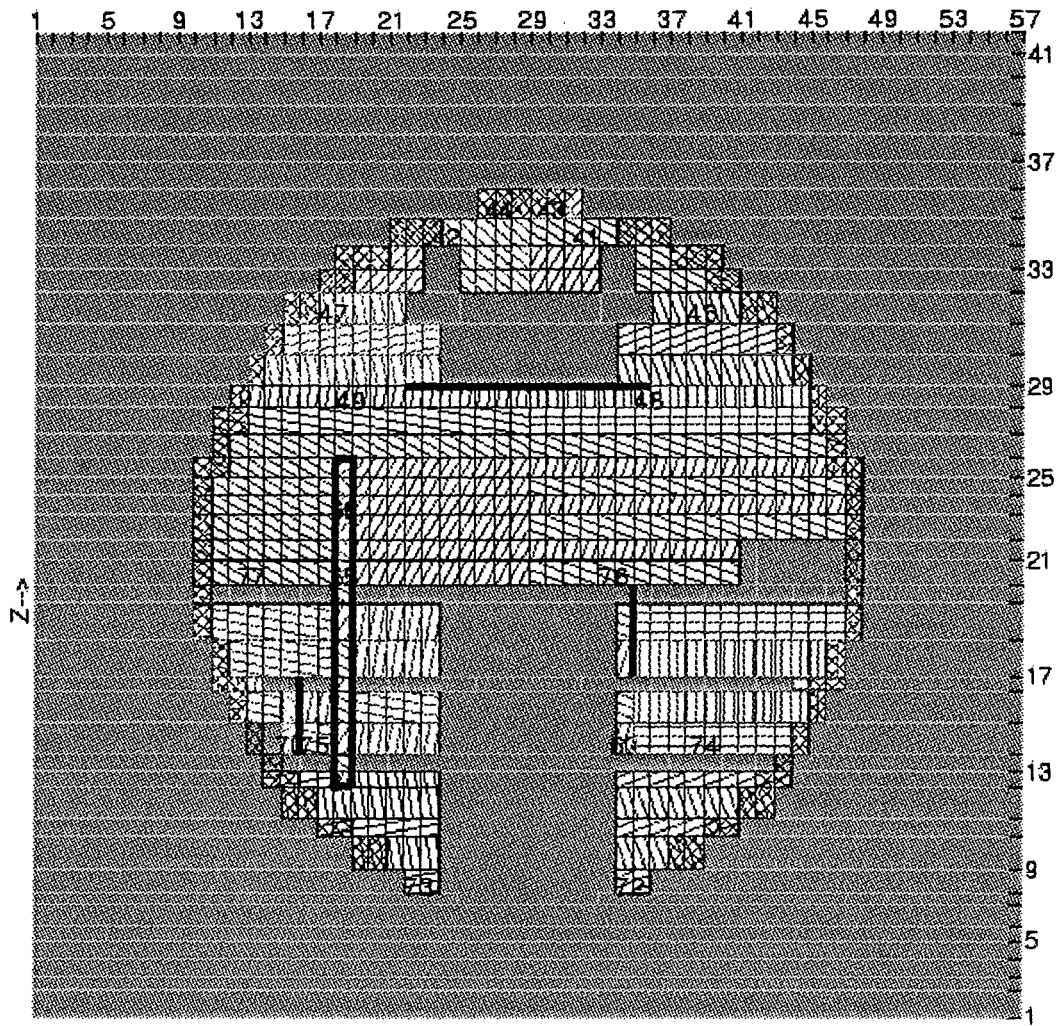


X-INDEX 5 TO 6 AT X = -23.047 M Y-->

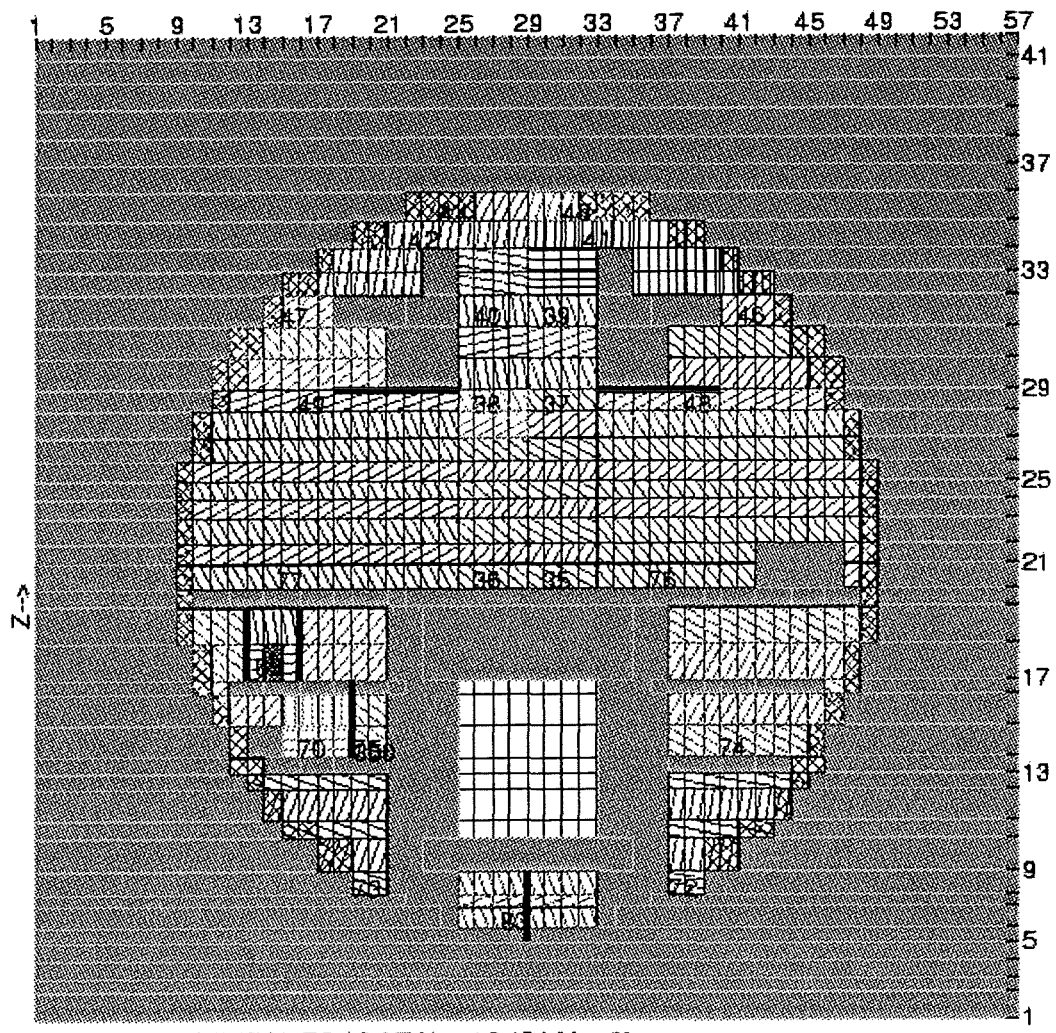


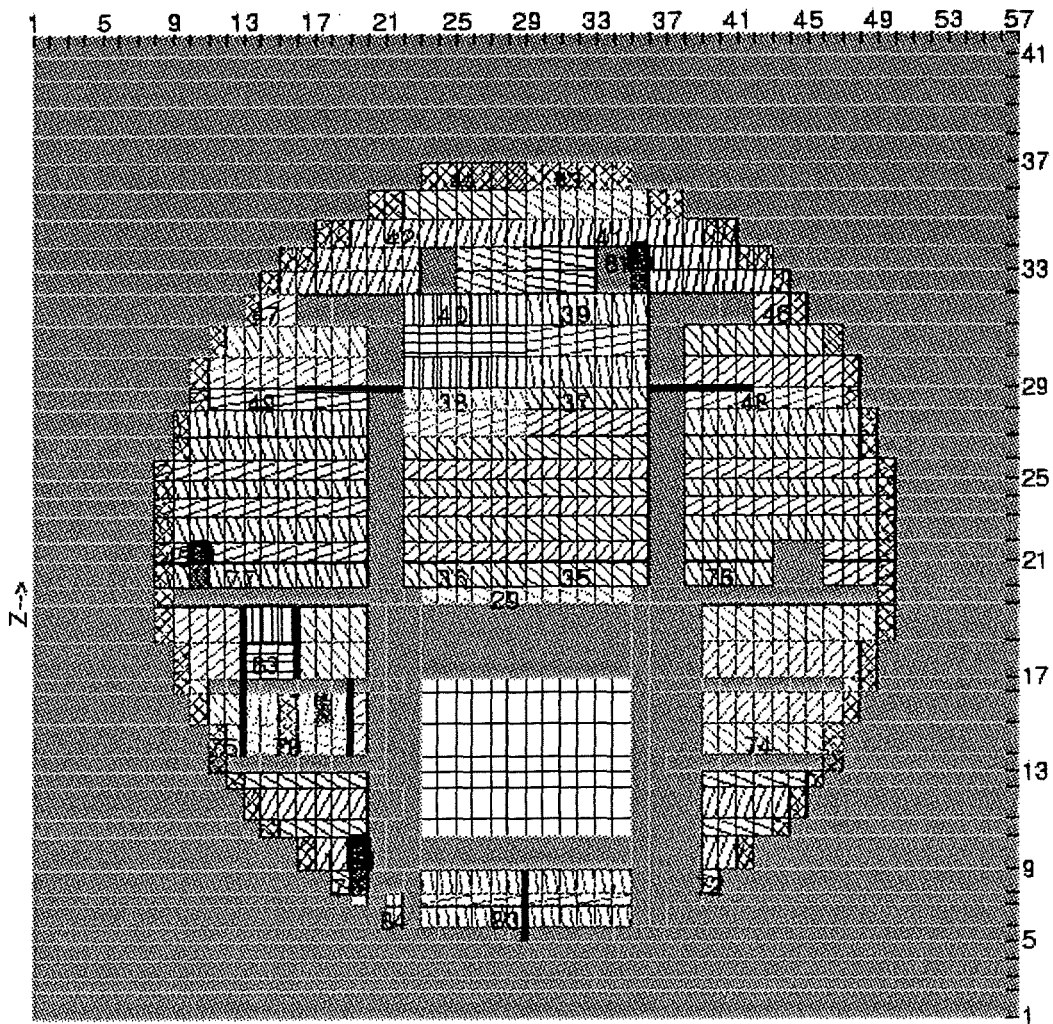
X-INDEX 6 TO 7 AT X = -22.067 M Y-->



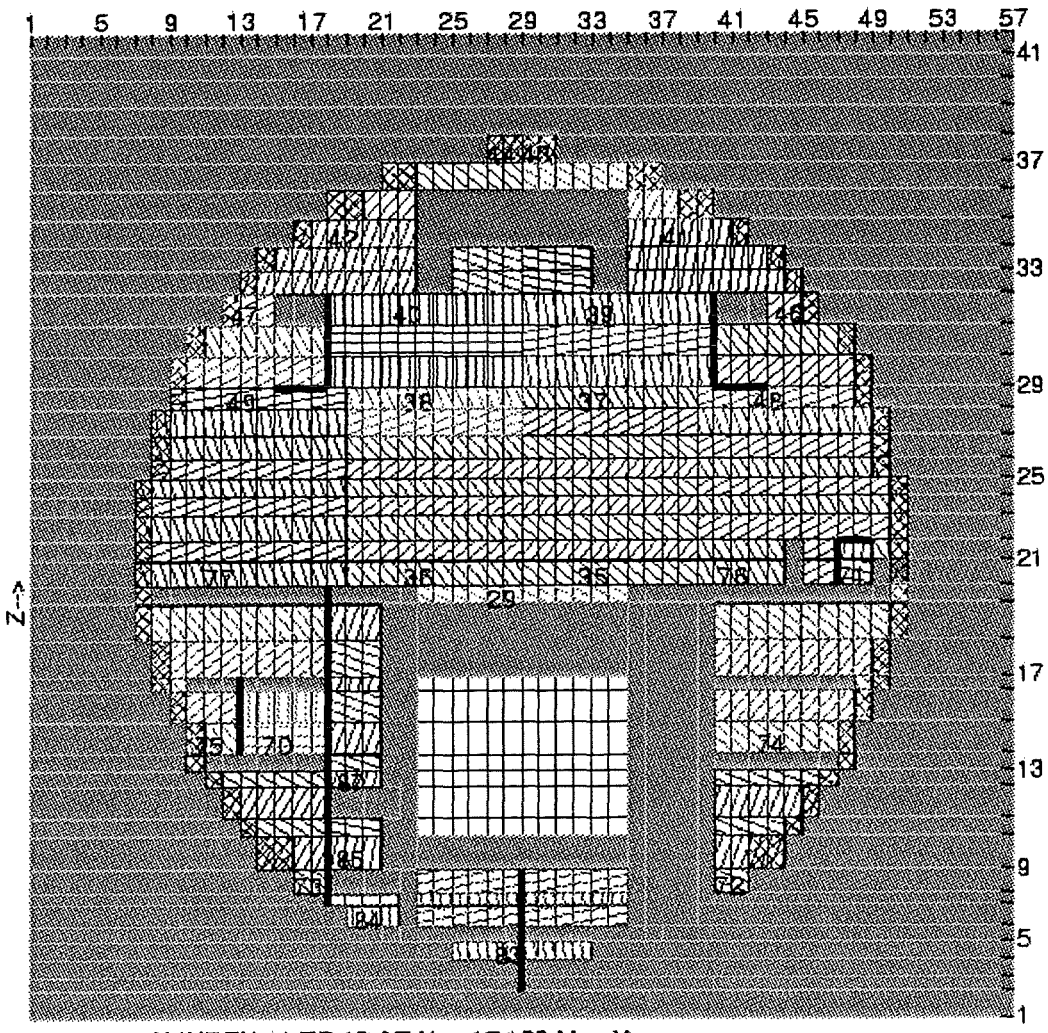


X-INDEX 8 TO 9 AT X = -20.105 M Y-->

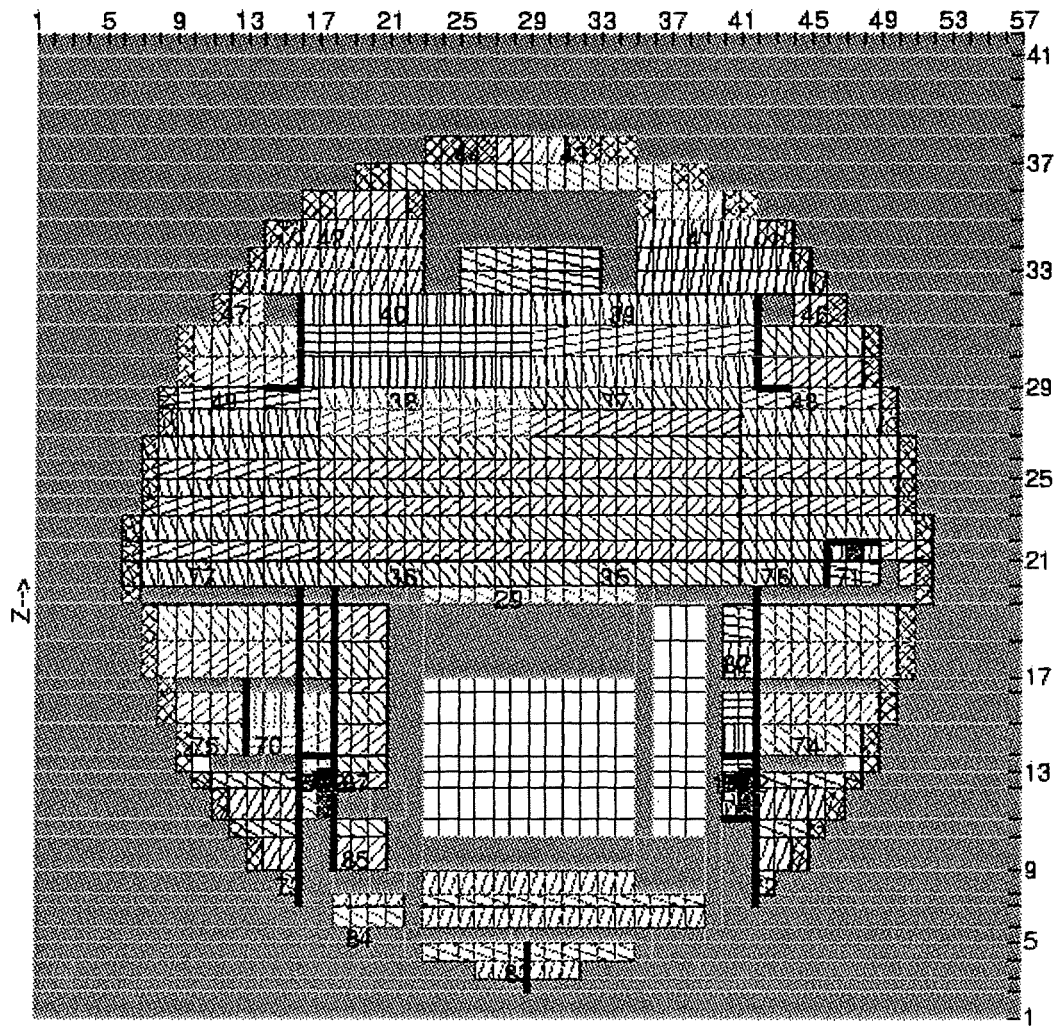




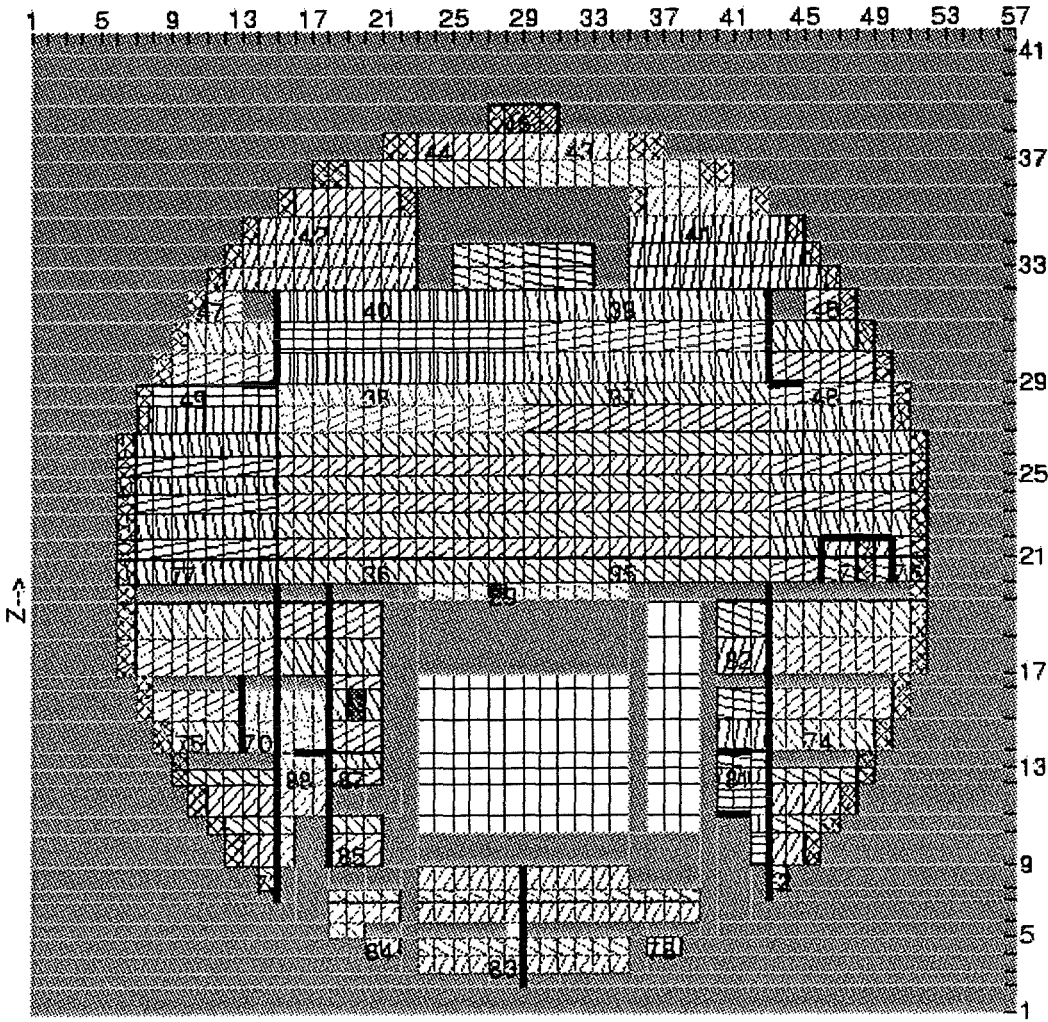
X-INDEX 10 TO 11 AT X = -18.144 M Y->



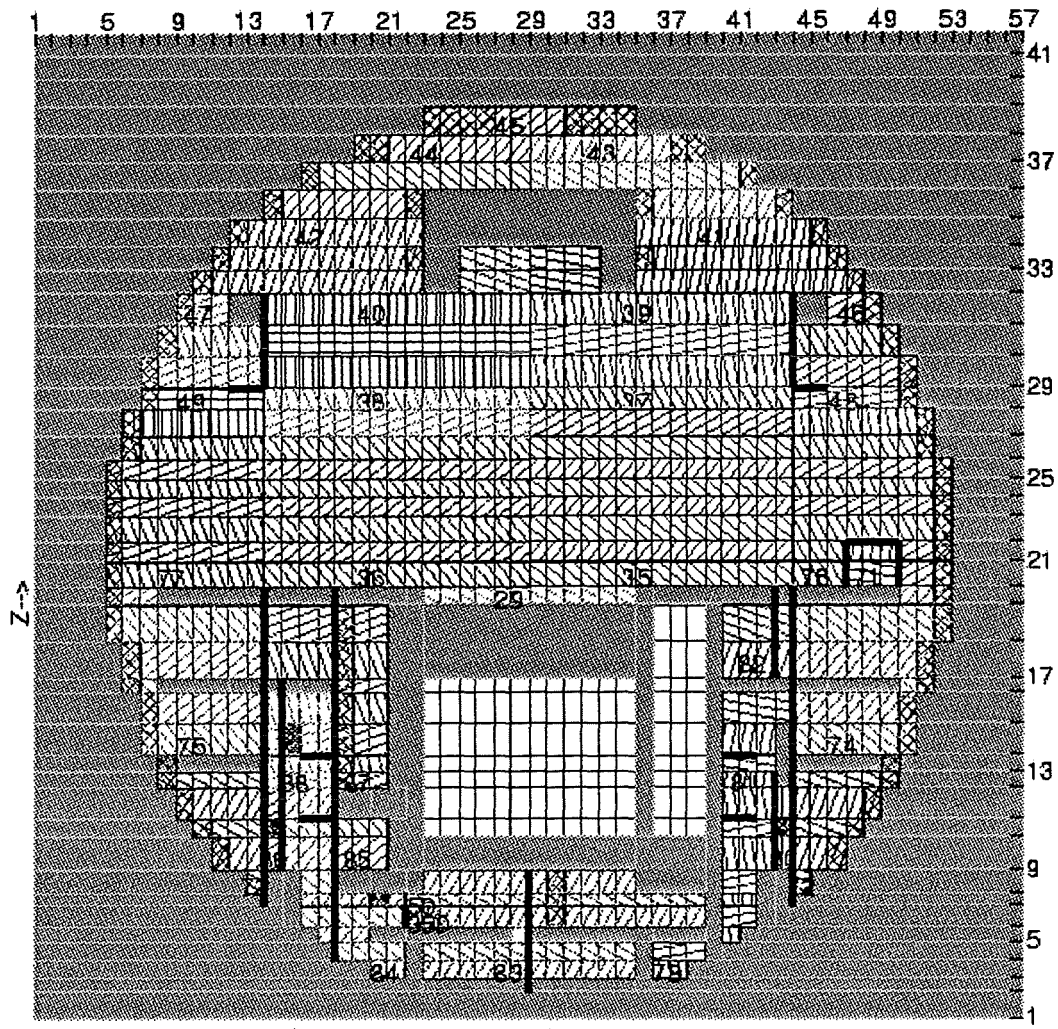
X-INDEX 11 TO 12 AT X = -17.163 M Y->



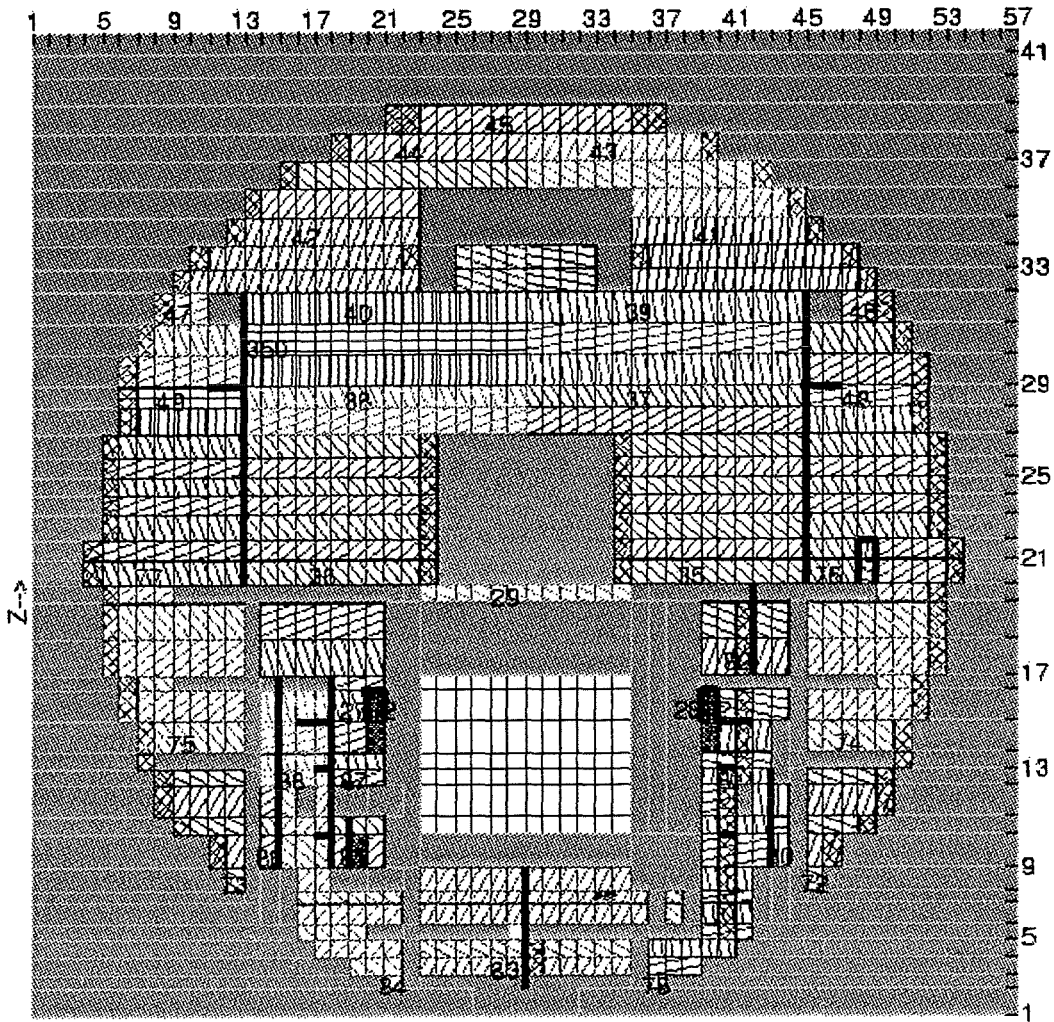
X-INDEX 12 TO 13 AT X = -16.182 M Y-->



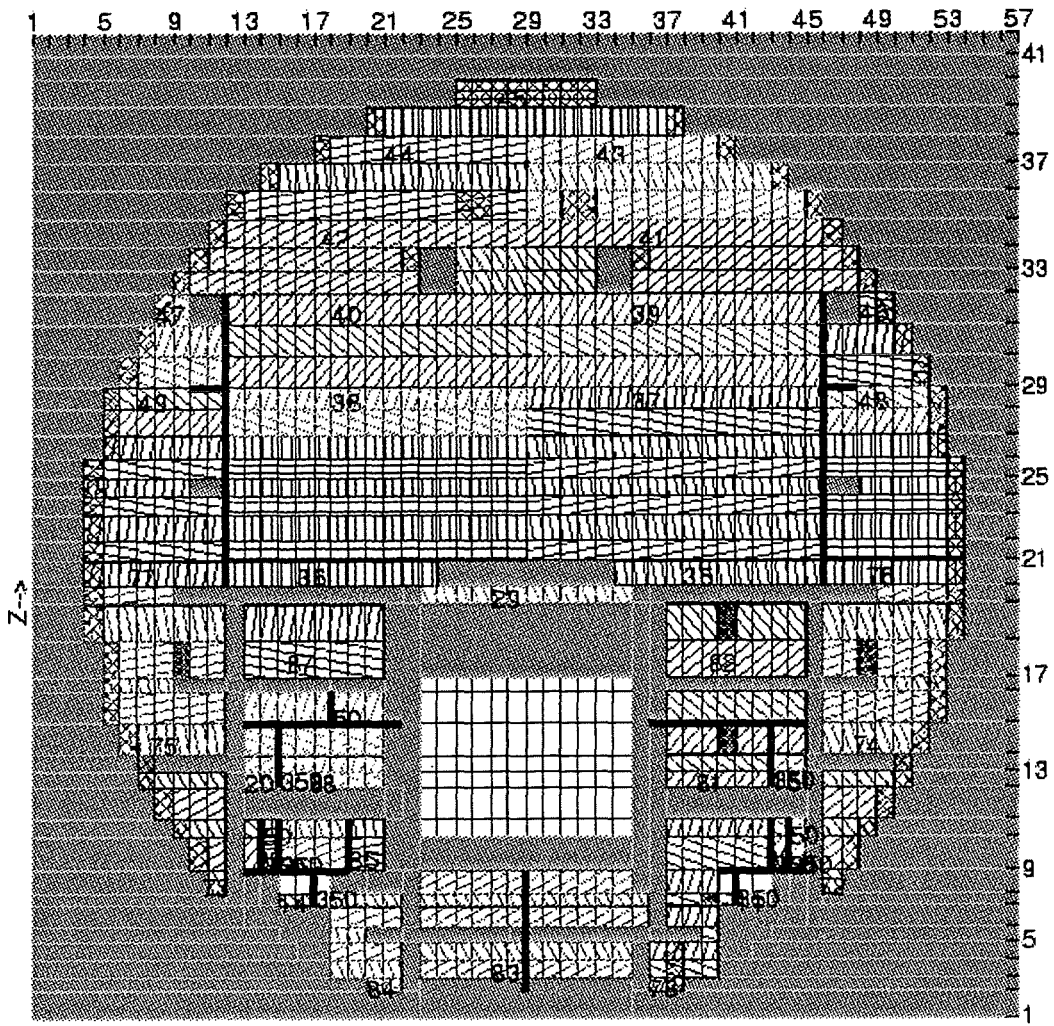
X-INDEX 13 TO 14 AT X = -15.202 M Y-->



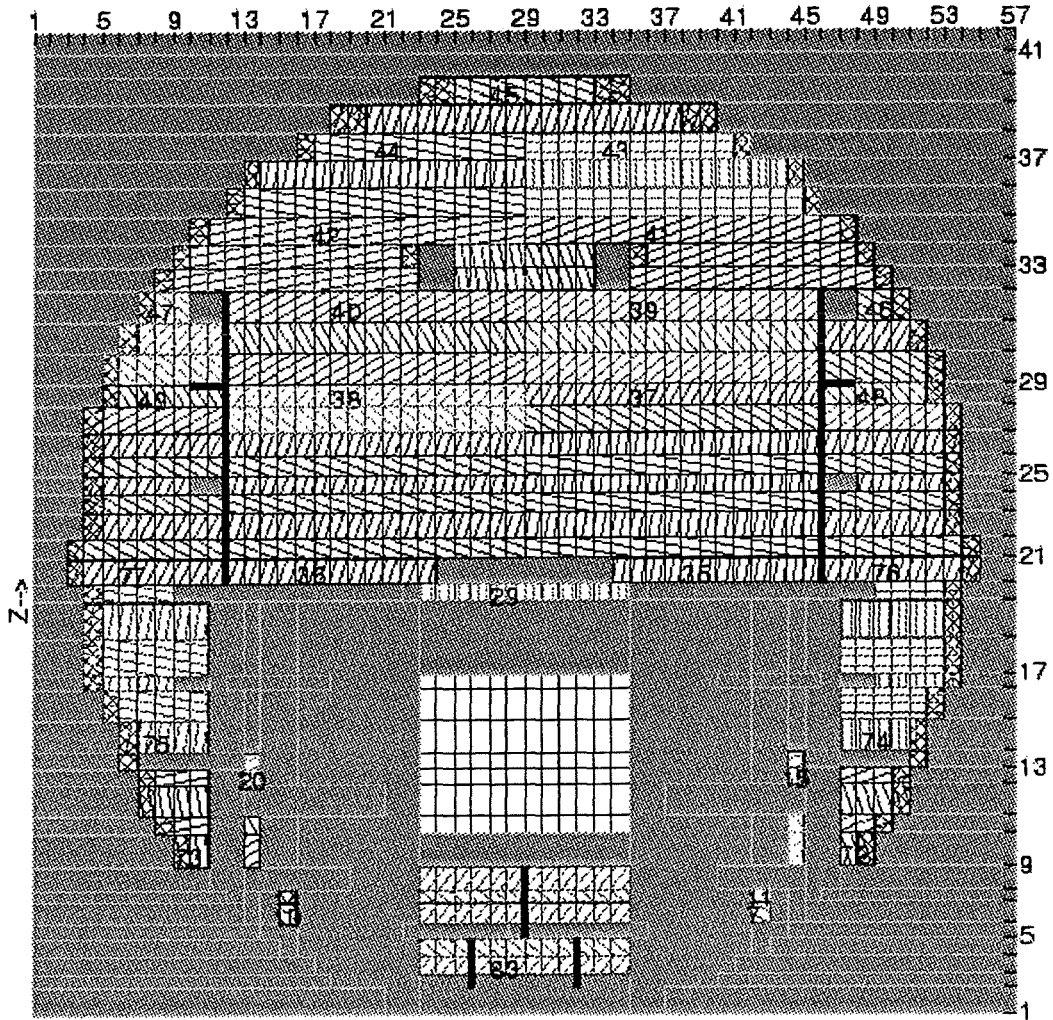
X-INDEX 14 TO 15 AT X = -14.221 M Y-->



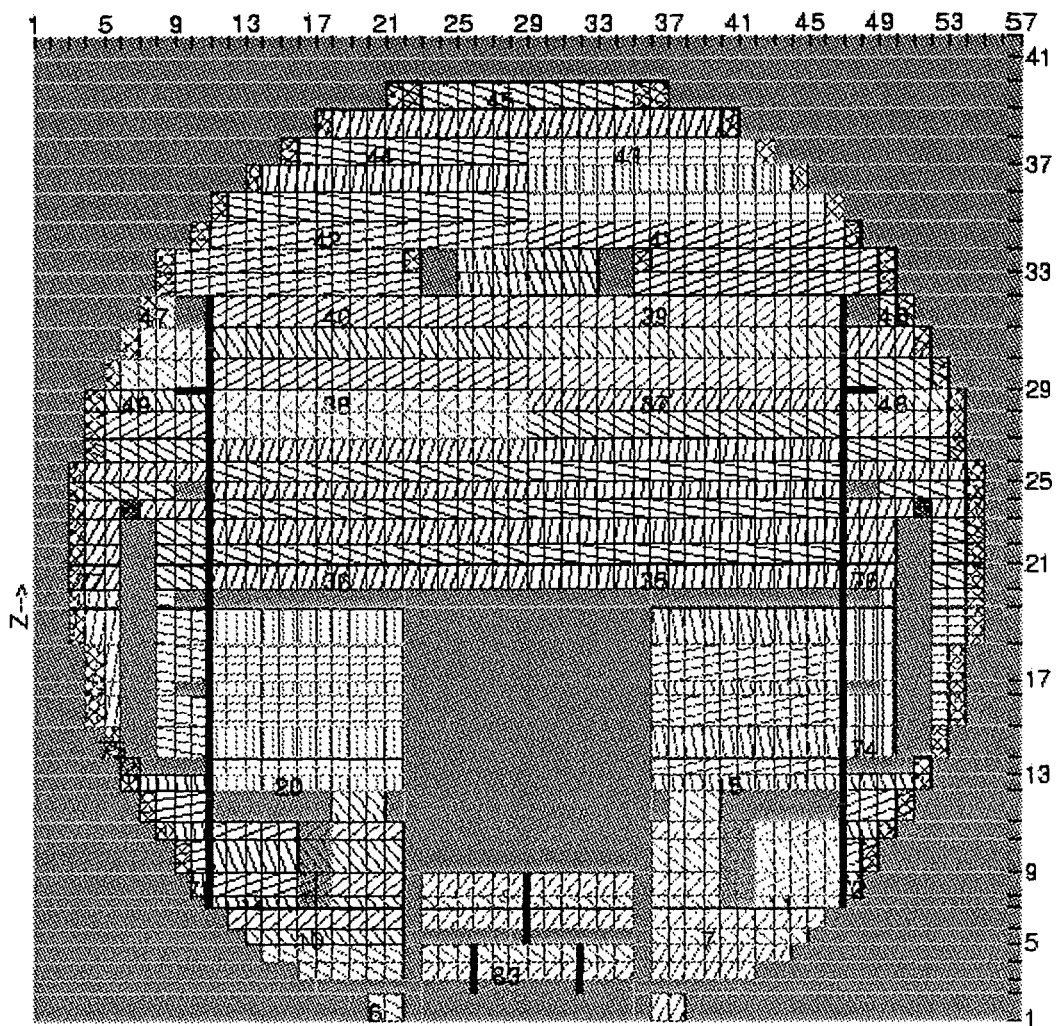
X-INDEX 15 TO 16 AT X = -13.24 M Y-->



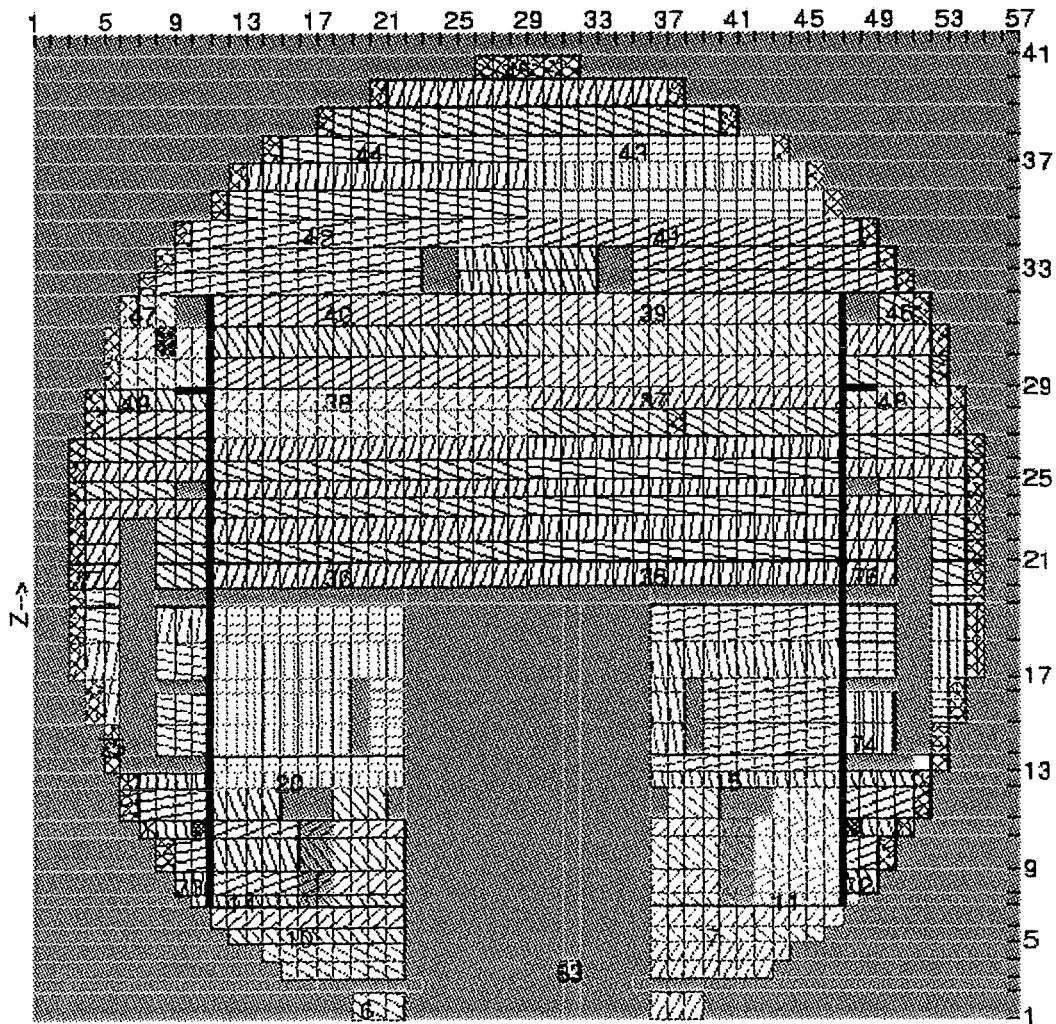
X-INDEX 16 TO 17 AT X = -12.259 M Y-->



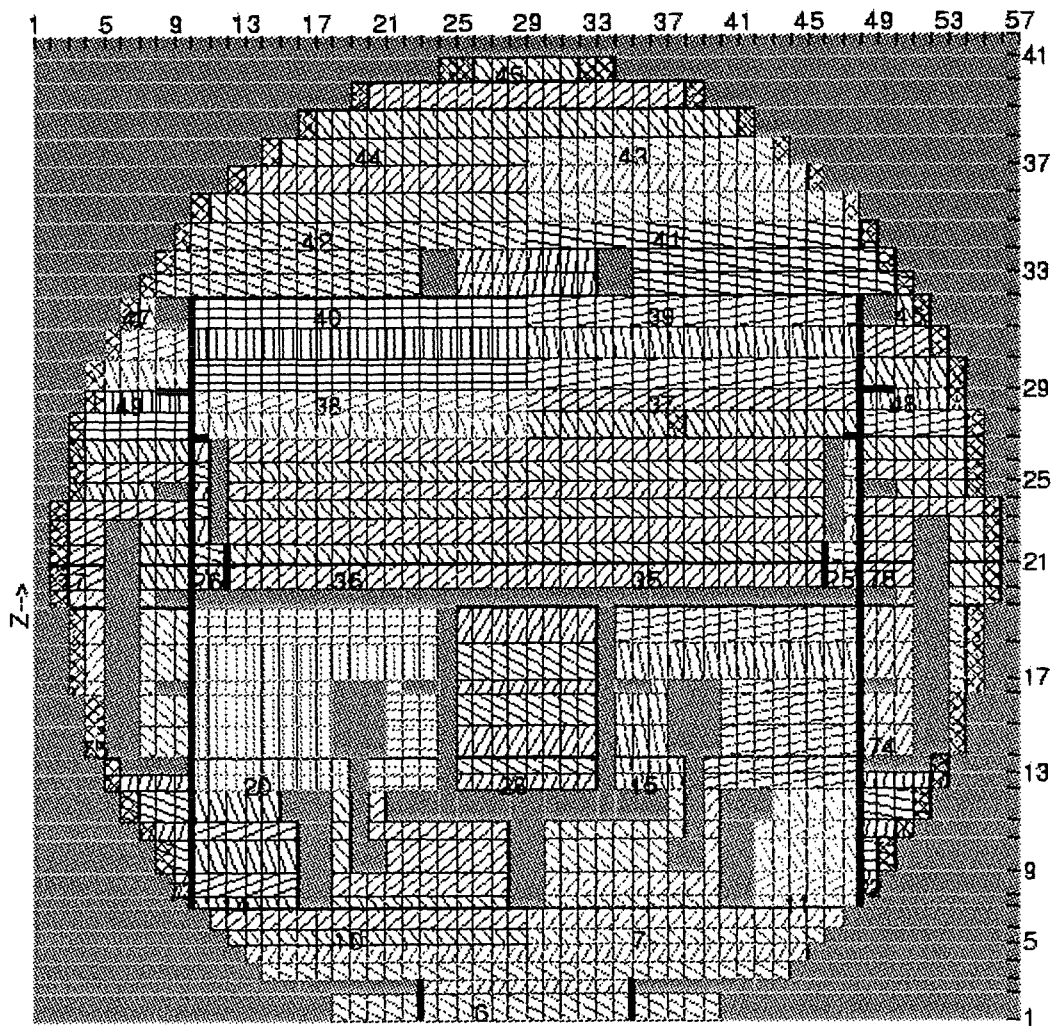
X-INDEX 17 TO 18 AT X = -11.279 M Y-->



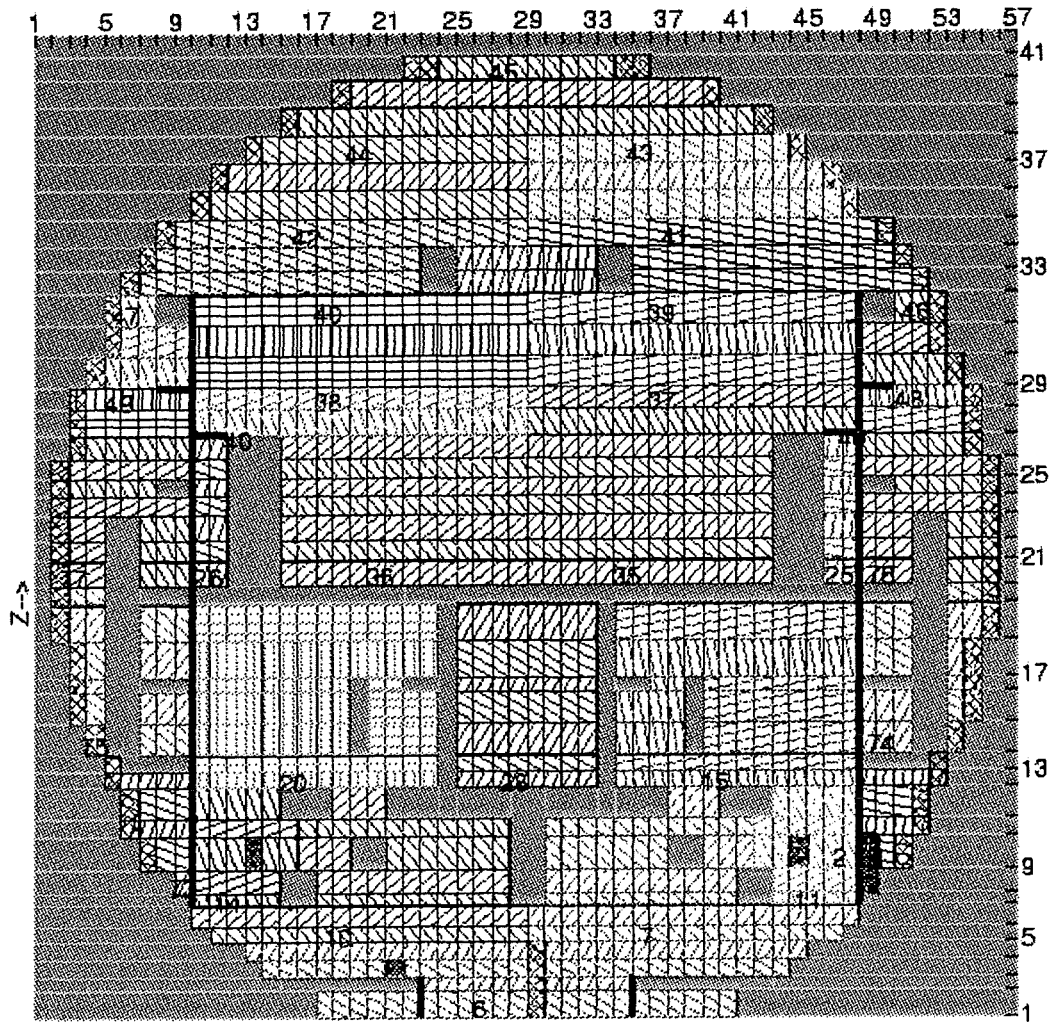
X-INDEX 18 TO 19 AT X = -10.298 M Y-->

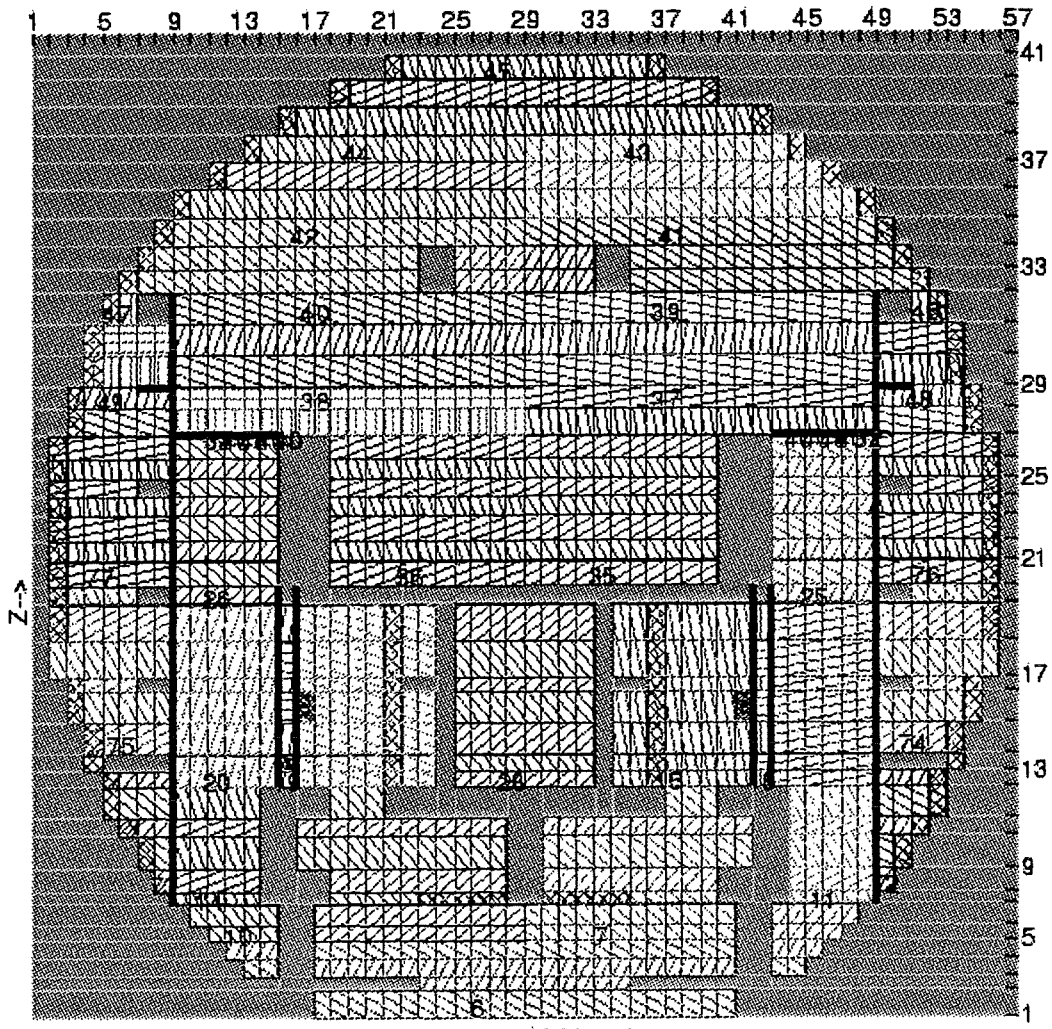


X-INDEX 19 TO 20 AT X = -9.3171 M Y-->

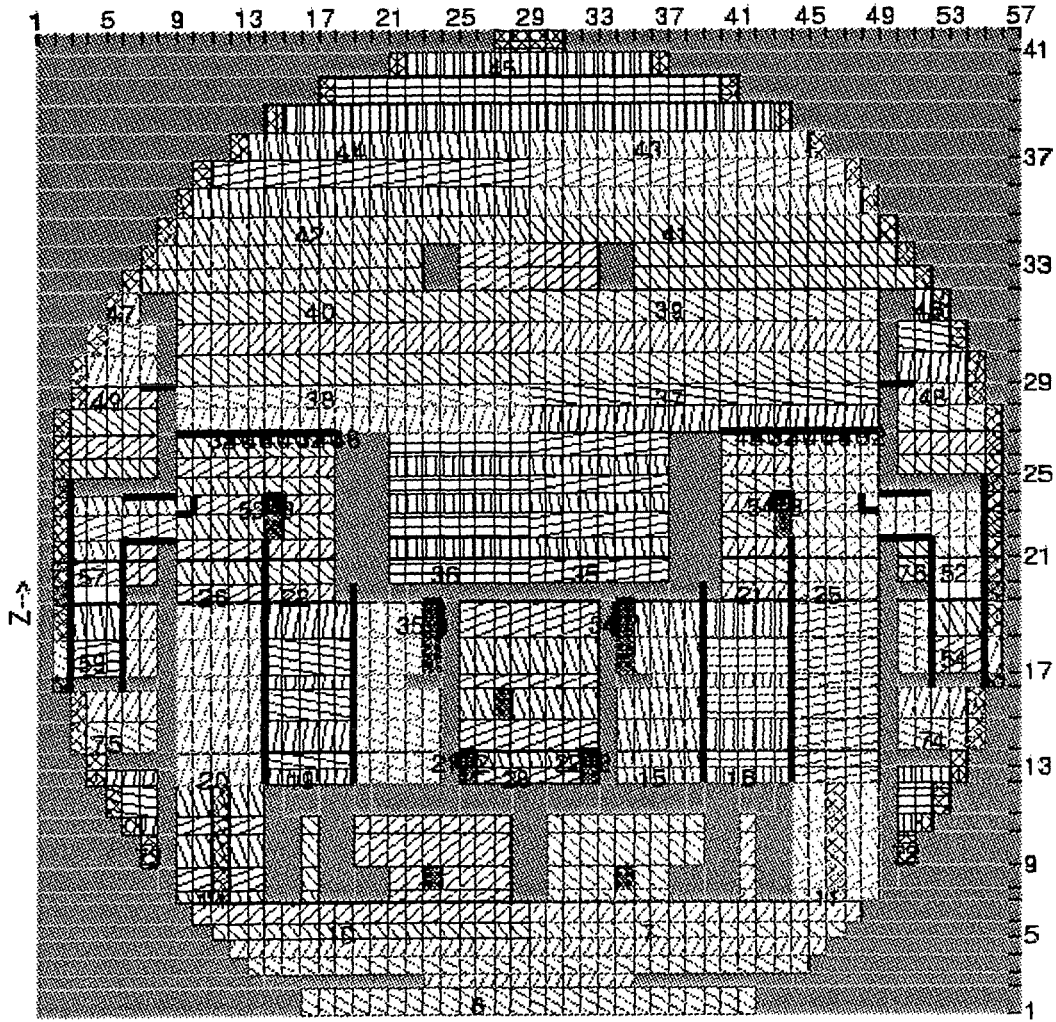


X-INDEX 20 TO 21 AT X = -8.3363 M Y-->

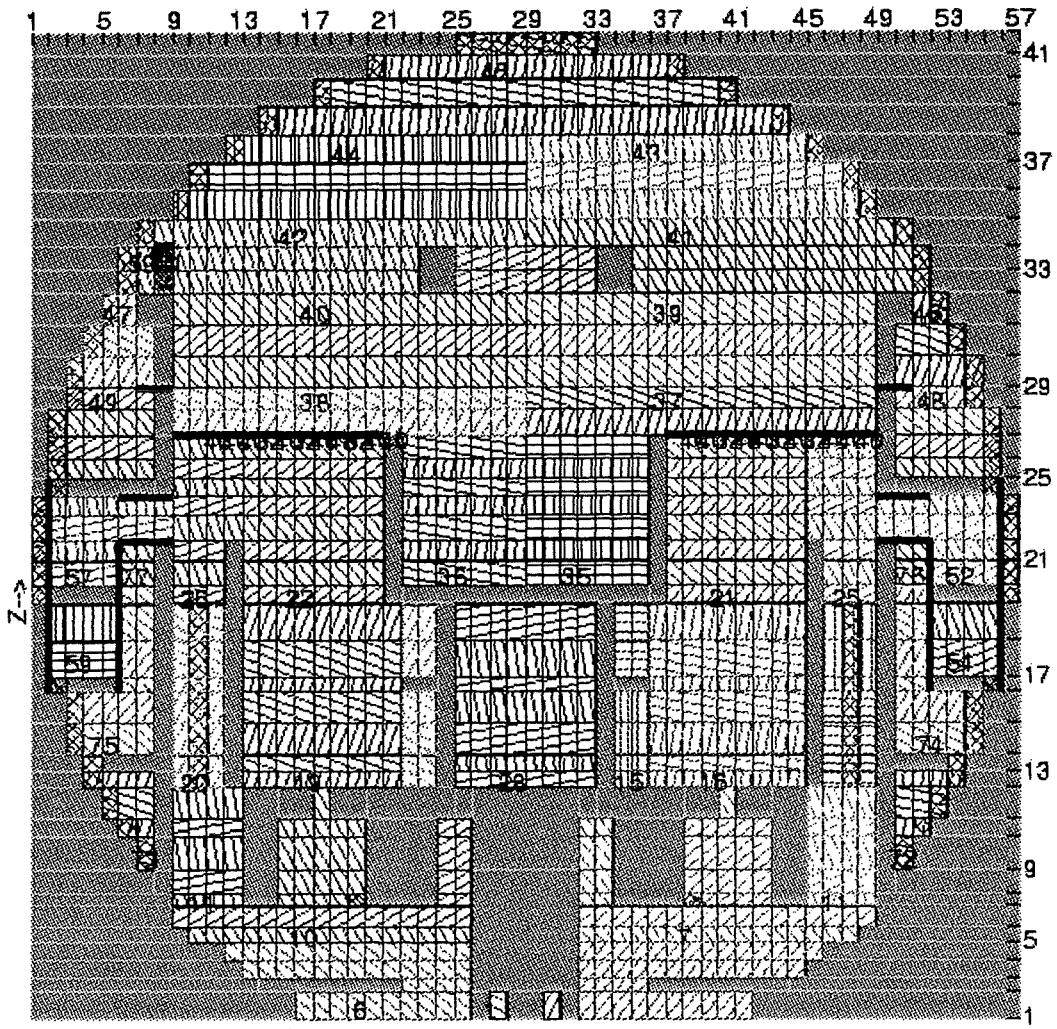




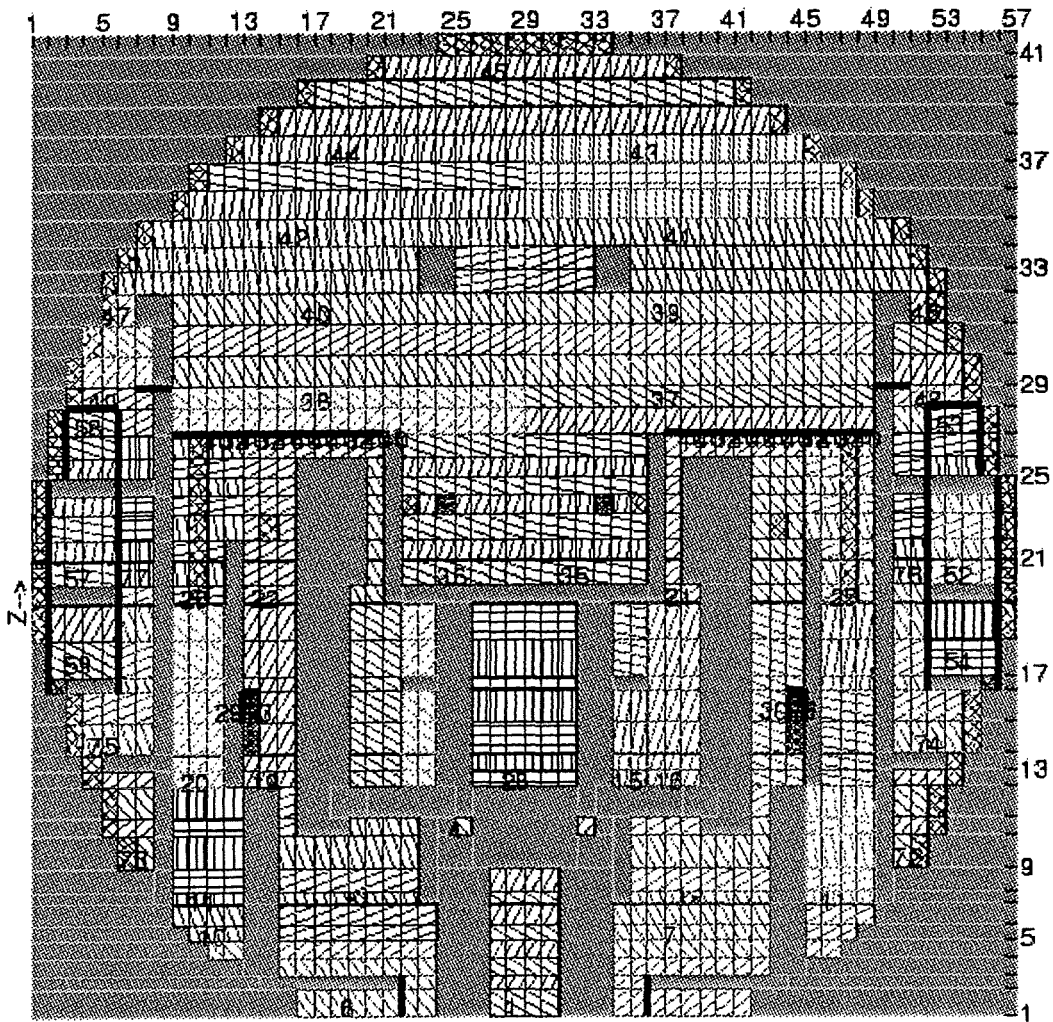
X-INDEX 22 TO 23 AT X = -6.3748 M Y-->



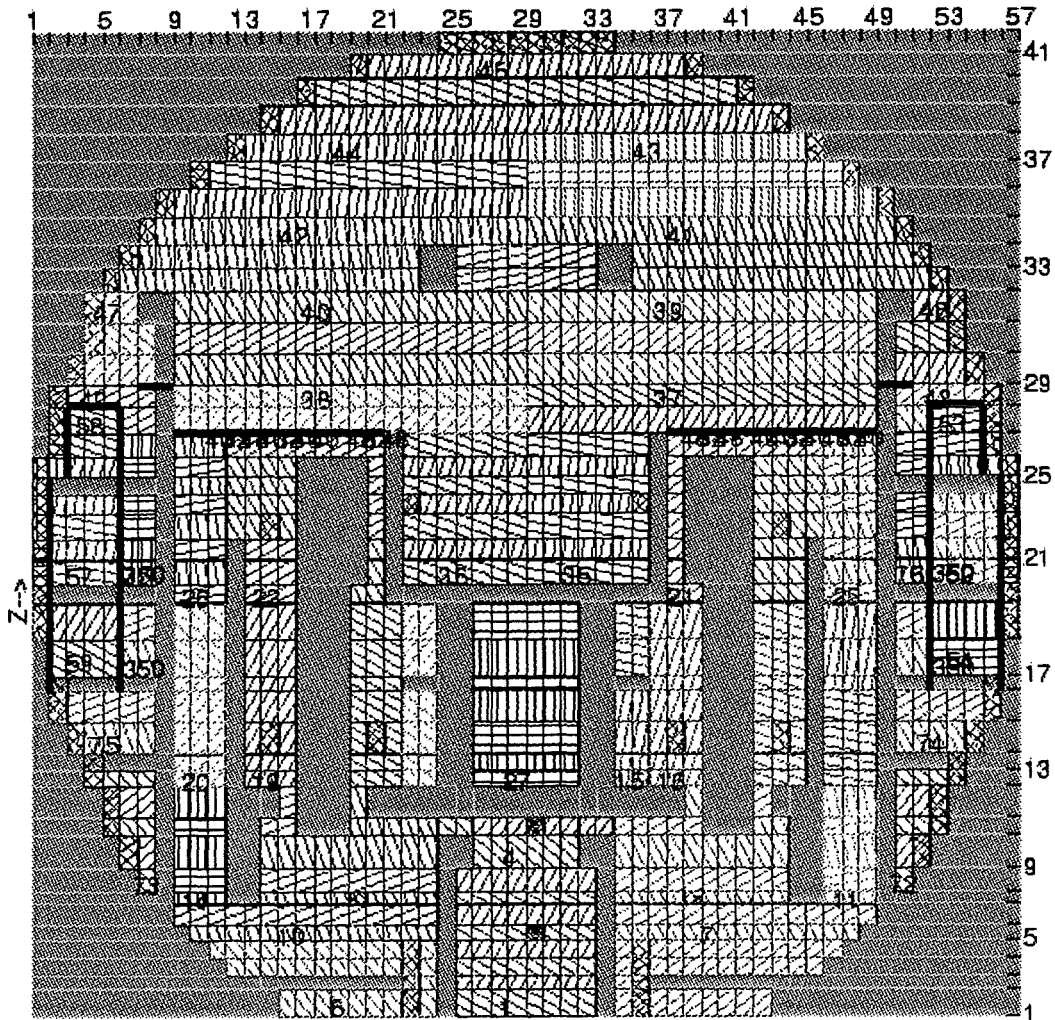
X-INDEX 23 TO 24 AT X = -5.3941 M Y-->



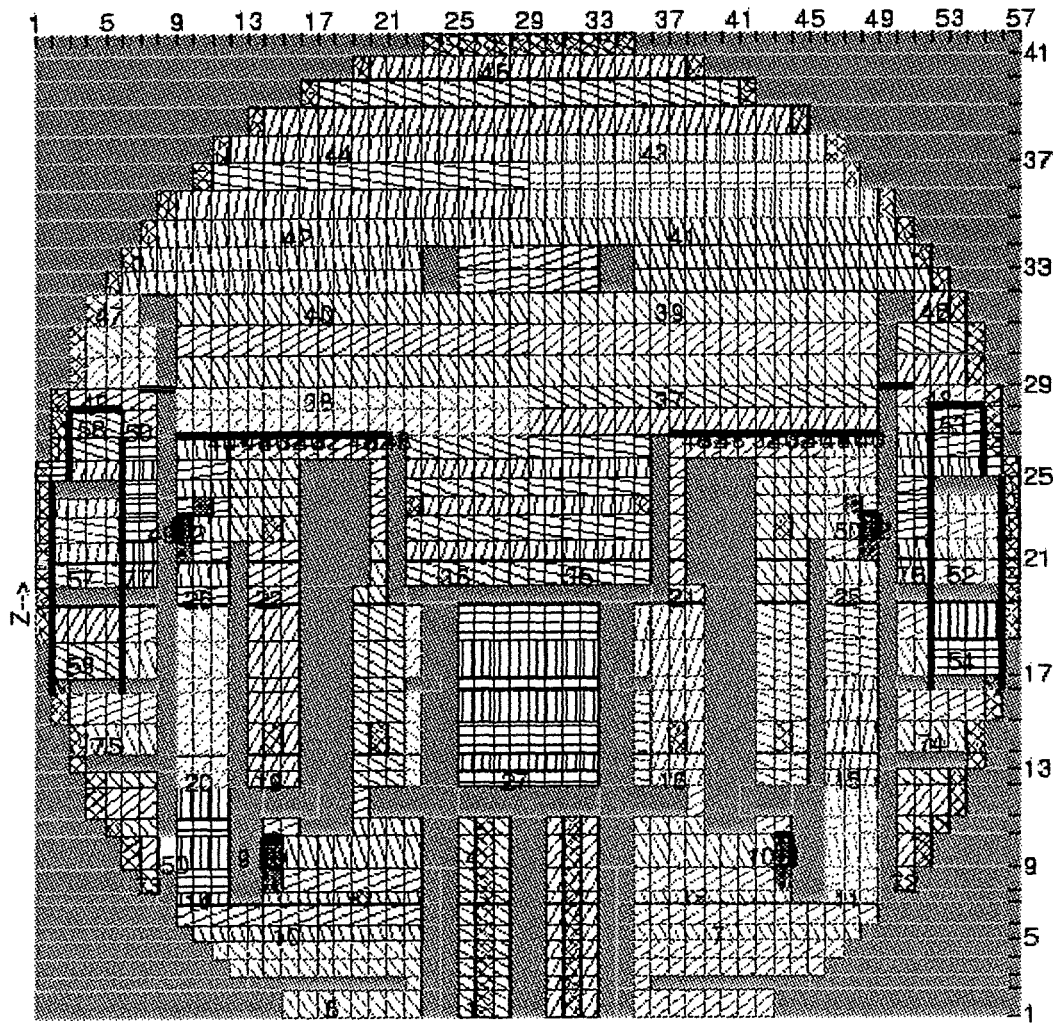
X-INDEX 24 TO 25 AT X = 4.4133 M Y-->



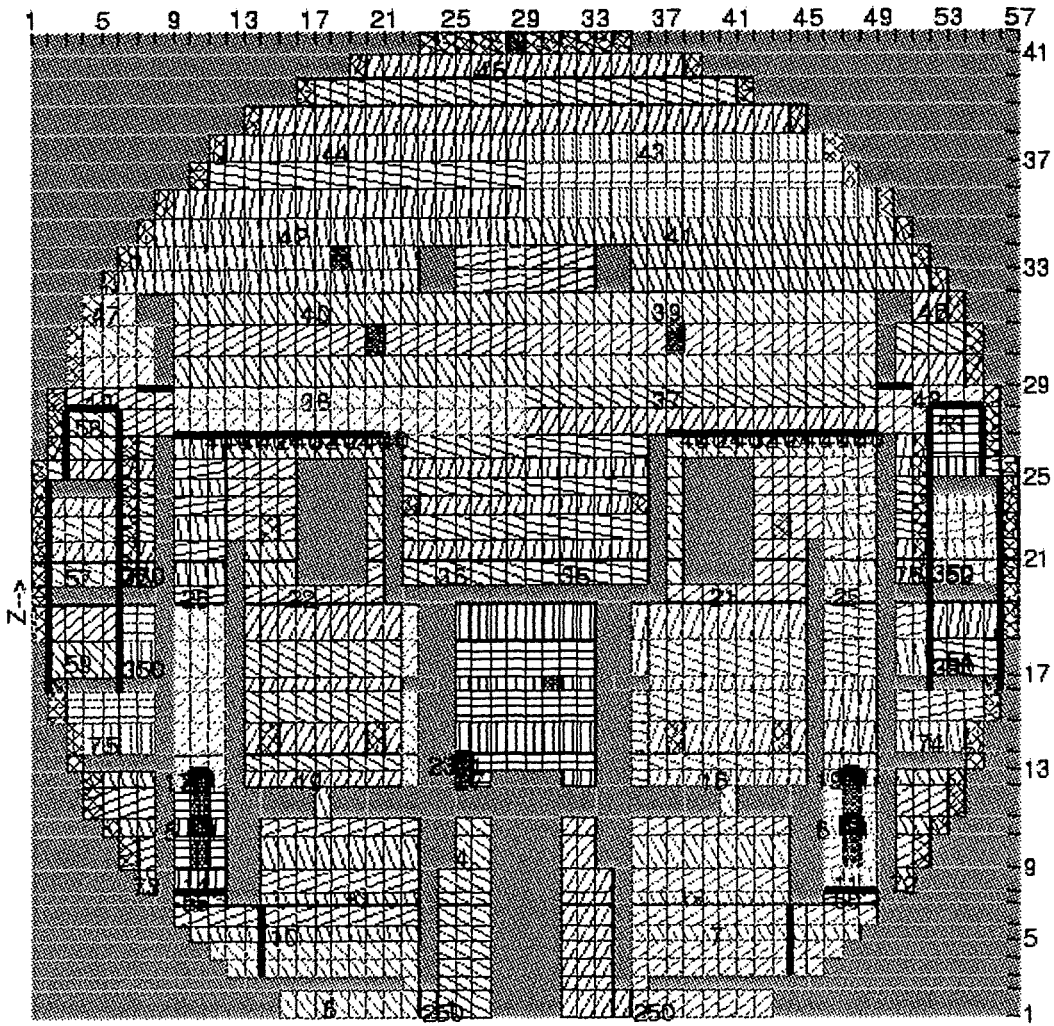
X-INDEX 25 TO 26 AT X = -3.4326 M Y-->



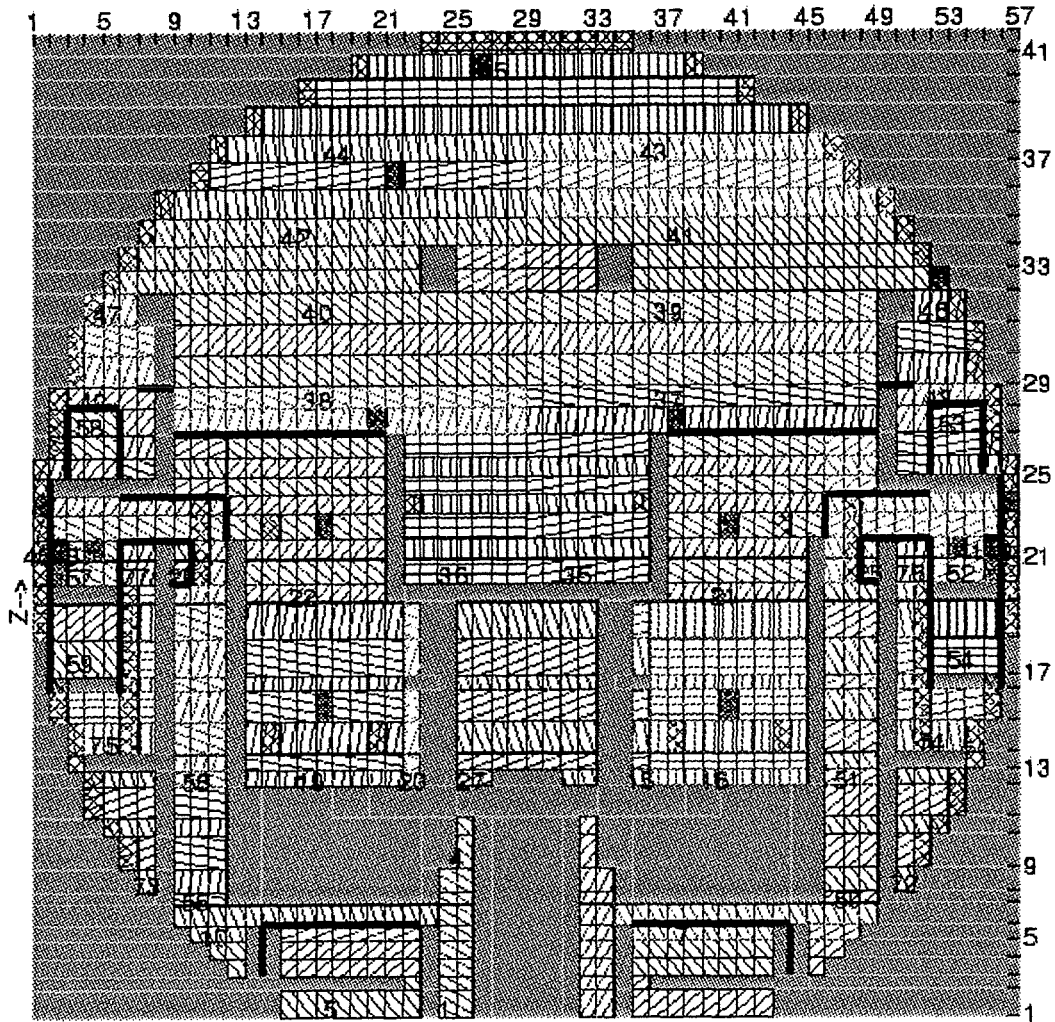
X-INDEX 26 TO 27 AT X = -2.4519 M Y-->



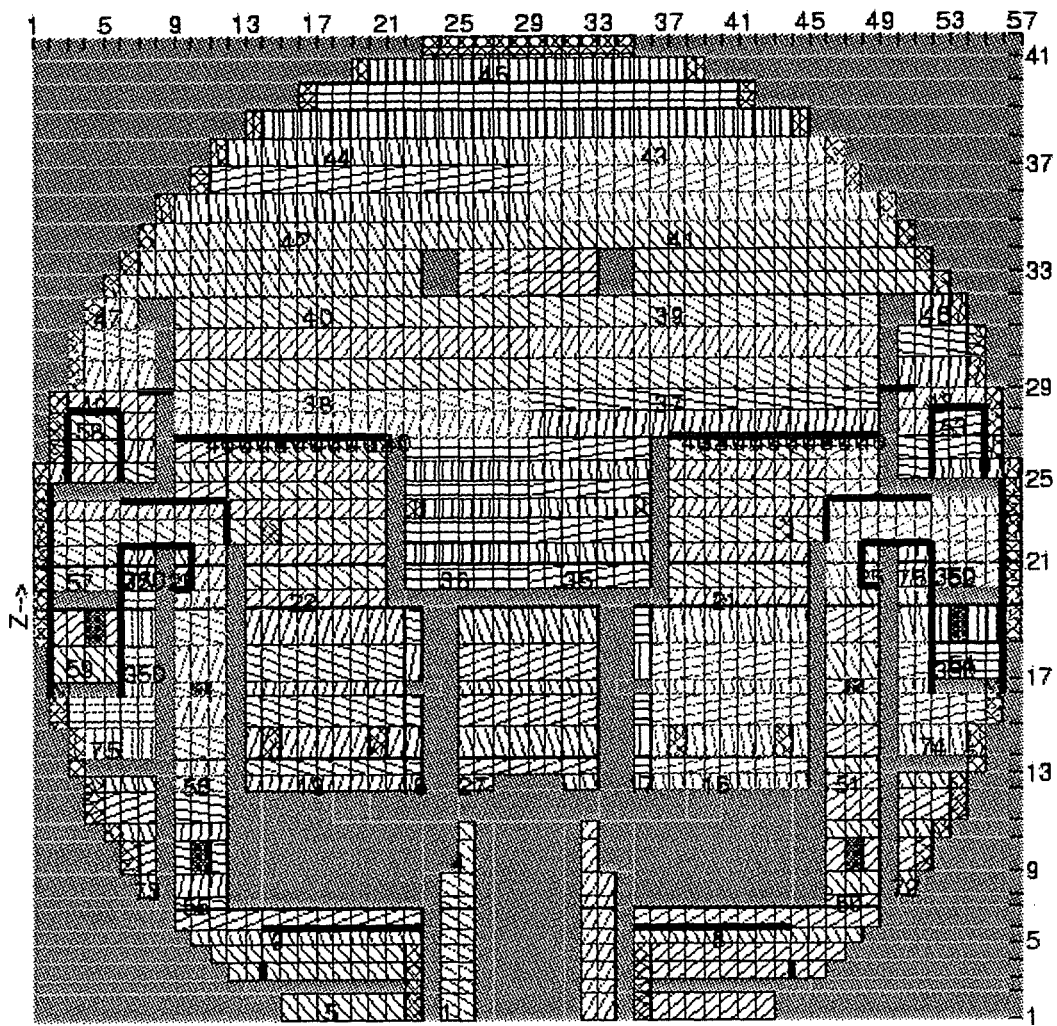
X-INDEX 27 TO 28 AT X = -1.4711 M Y-->



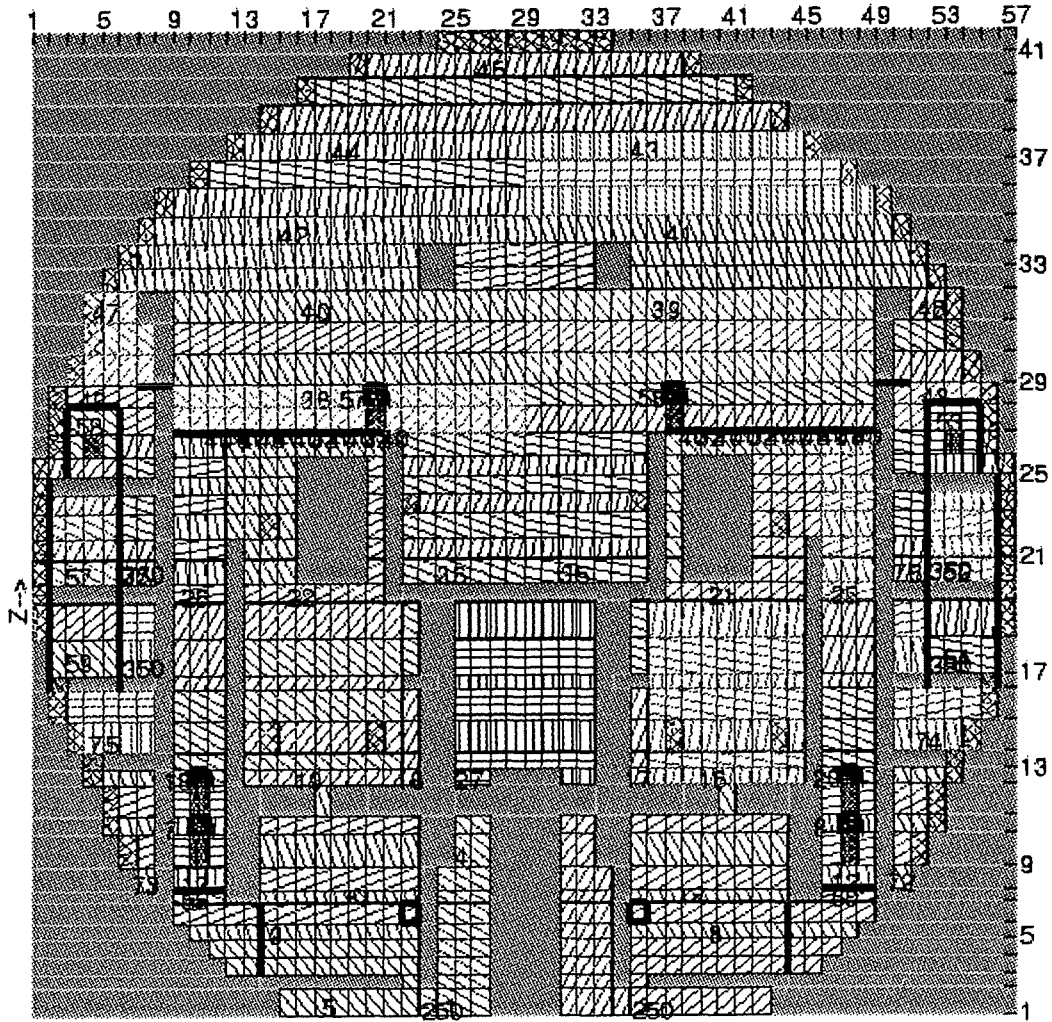
X-INDEX 28 TO 29 AT X = -.49037 M Y-->



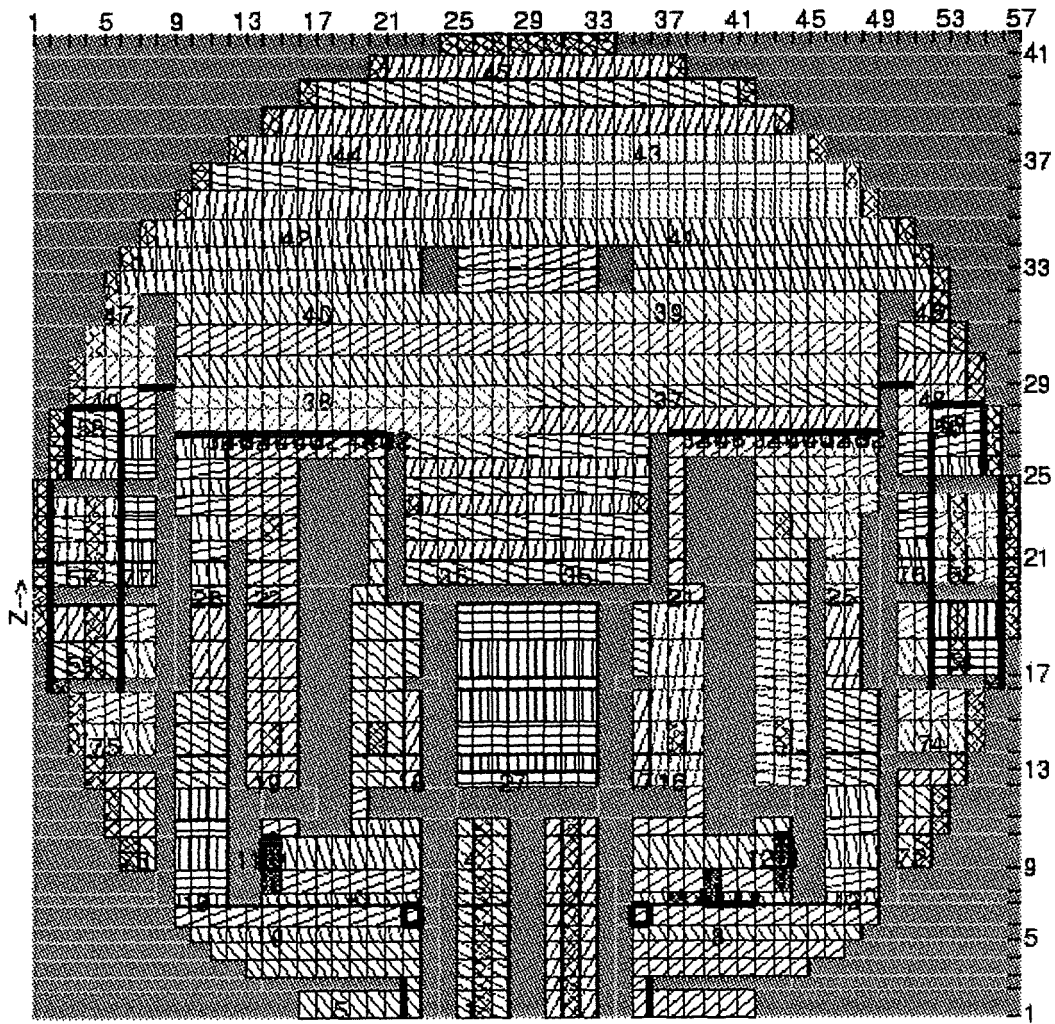
X-INDEX 29 TO 30 AT X = .49037 M Y-->



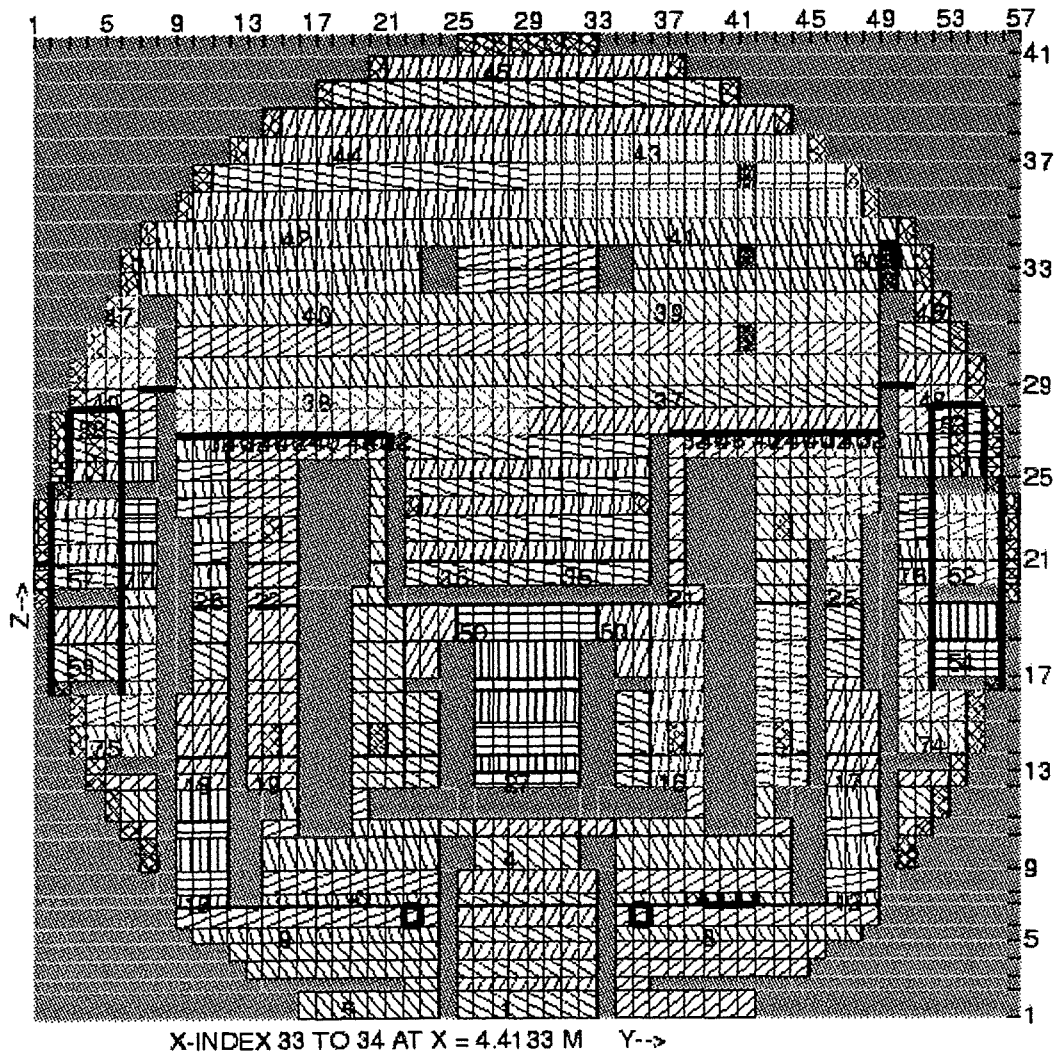
X-INDEX 30 TO 31 AT X = 1.4711 M Y-->

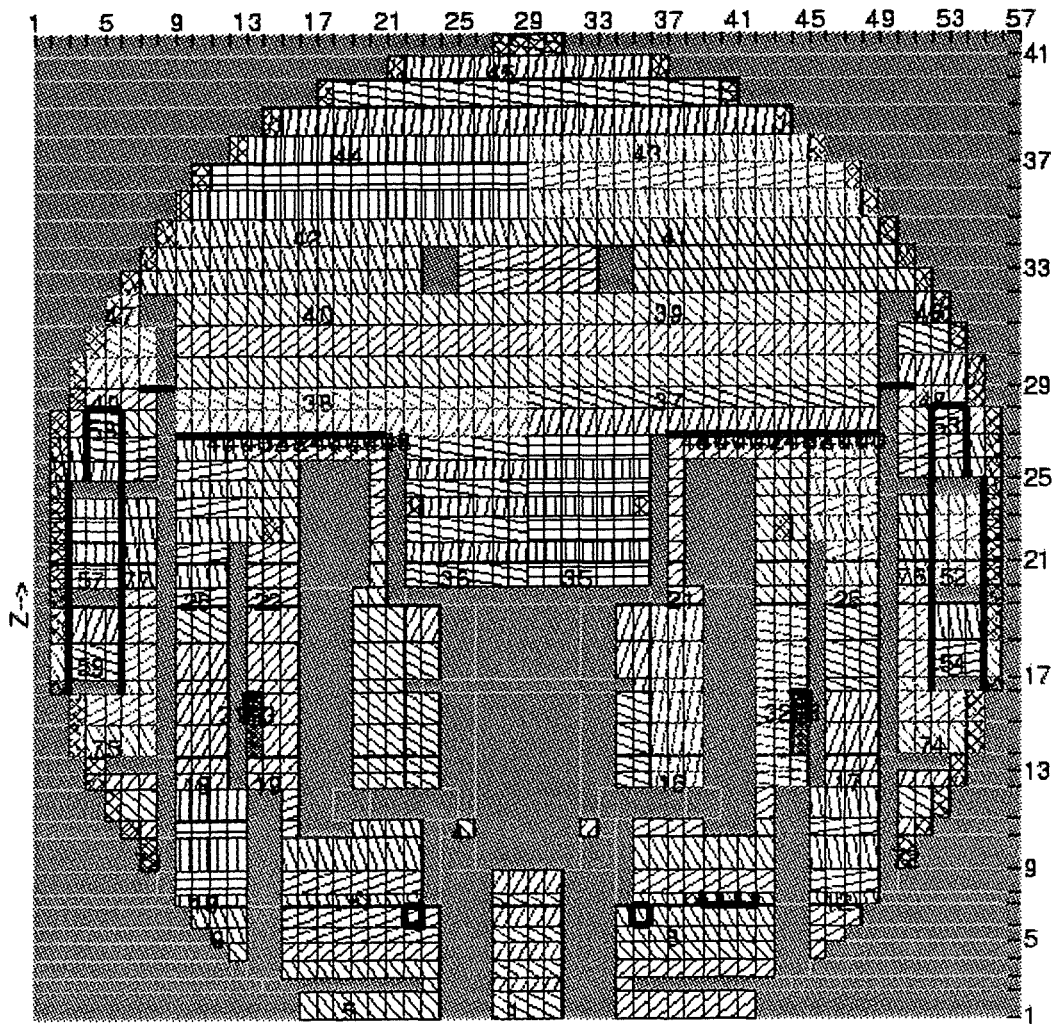


X-INDEX 31 TO 32 AT X = 2.4519 M Y-->

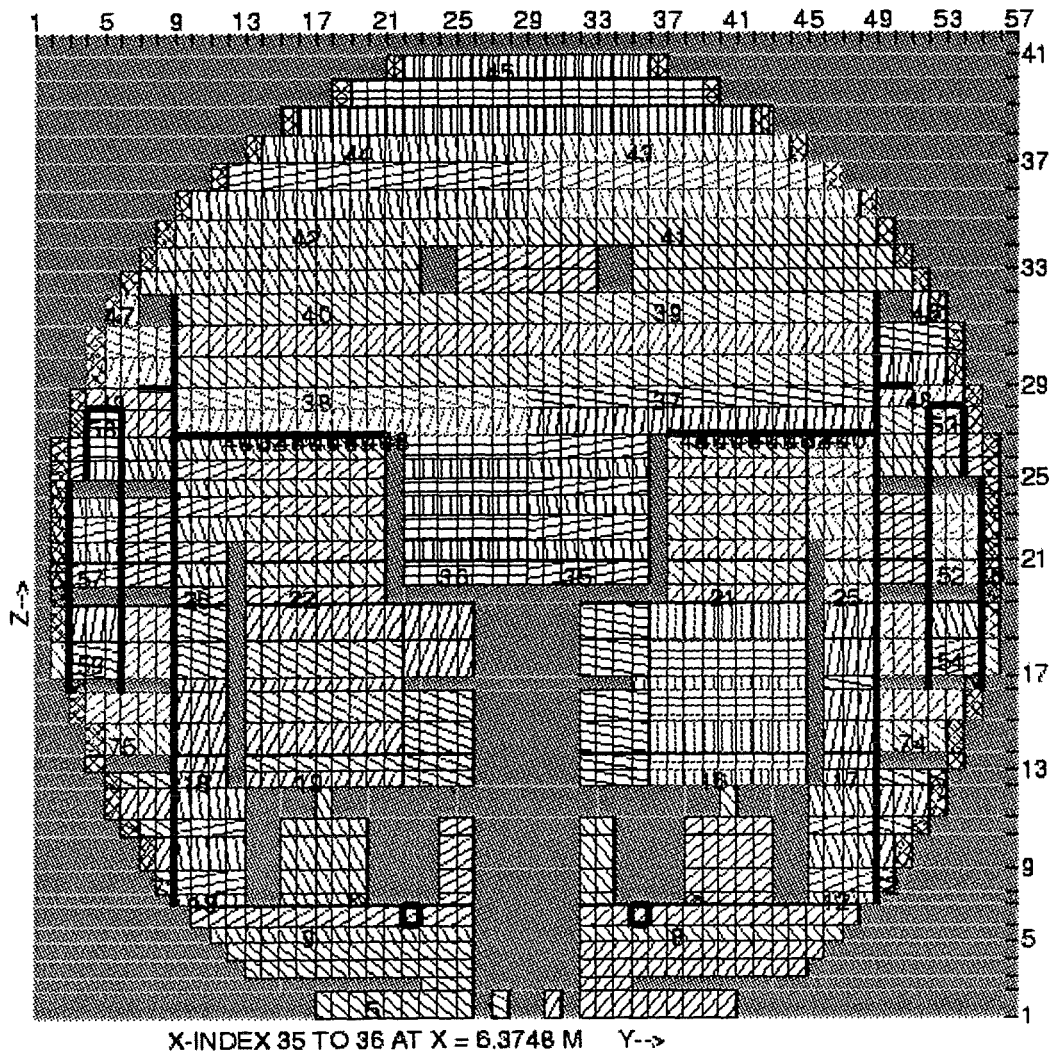


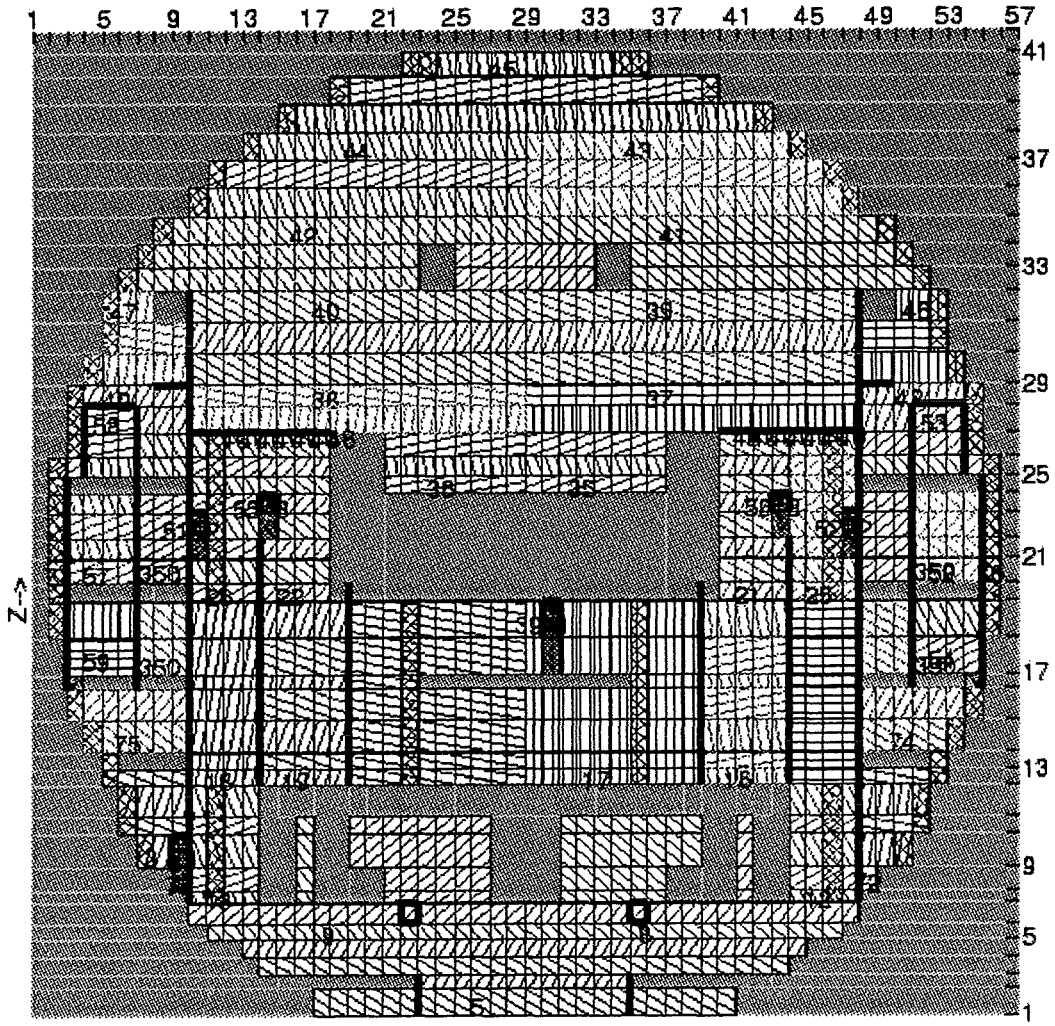
X-INDEX 32 TO 33 AT X = 3.4326 M Y-->



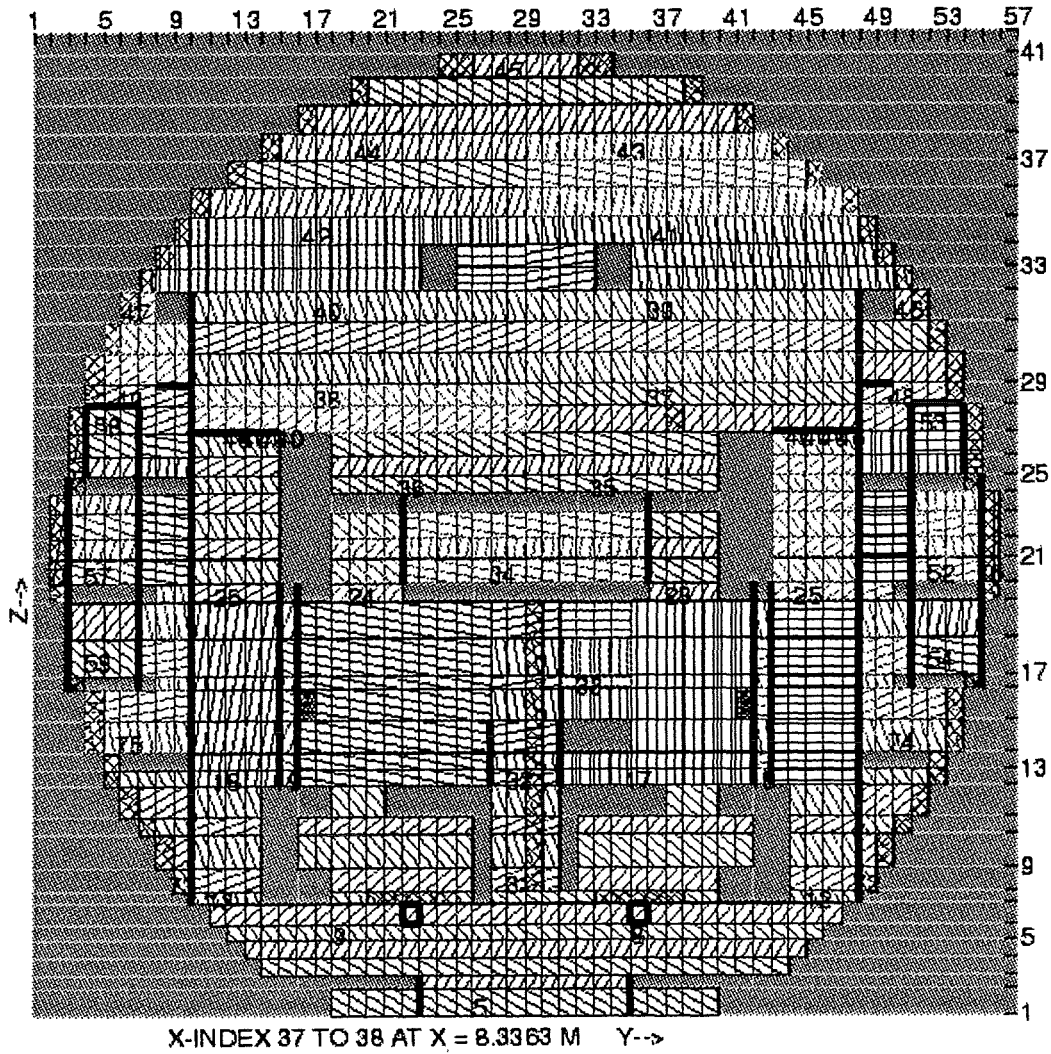


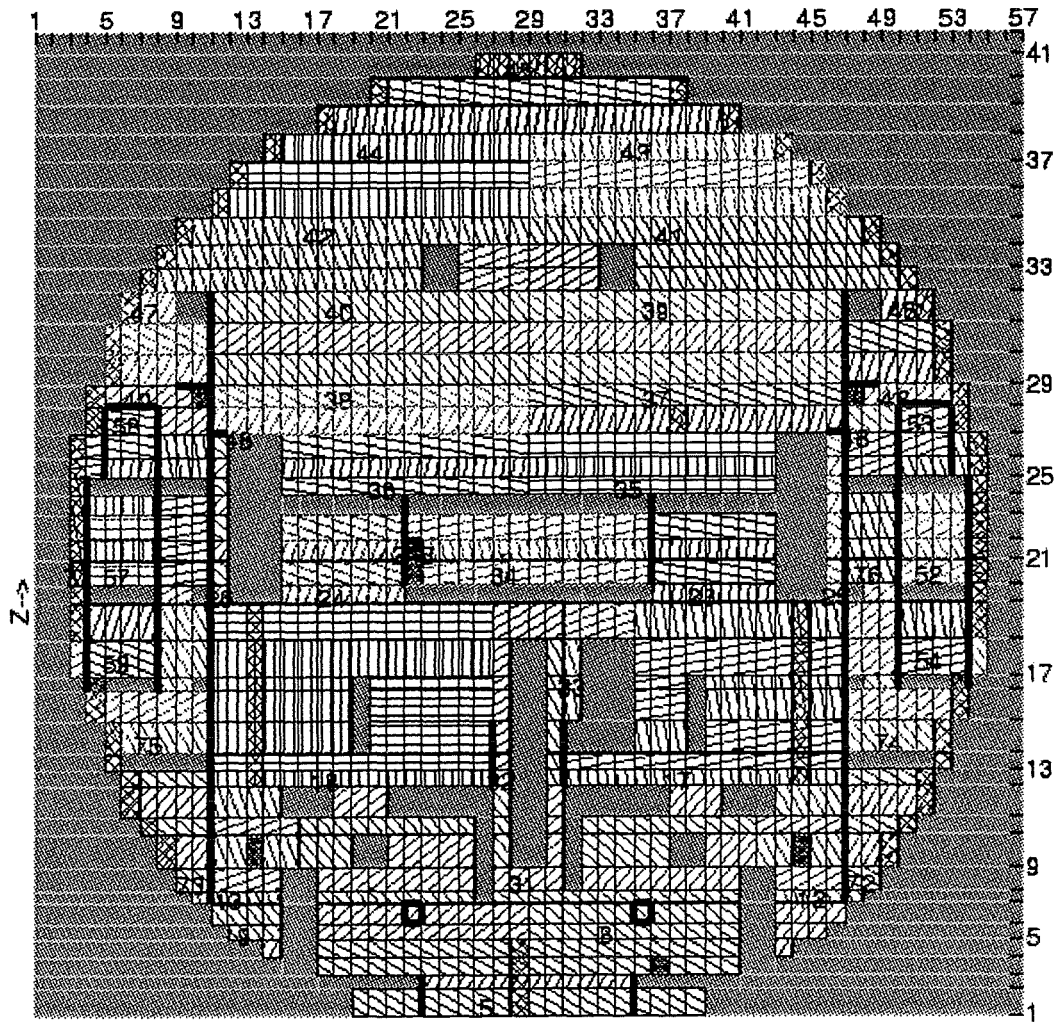
X-INDEX 34 TO 35 AT X = 5.3941 M Y-->



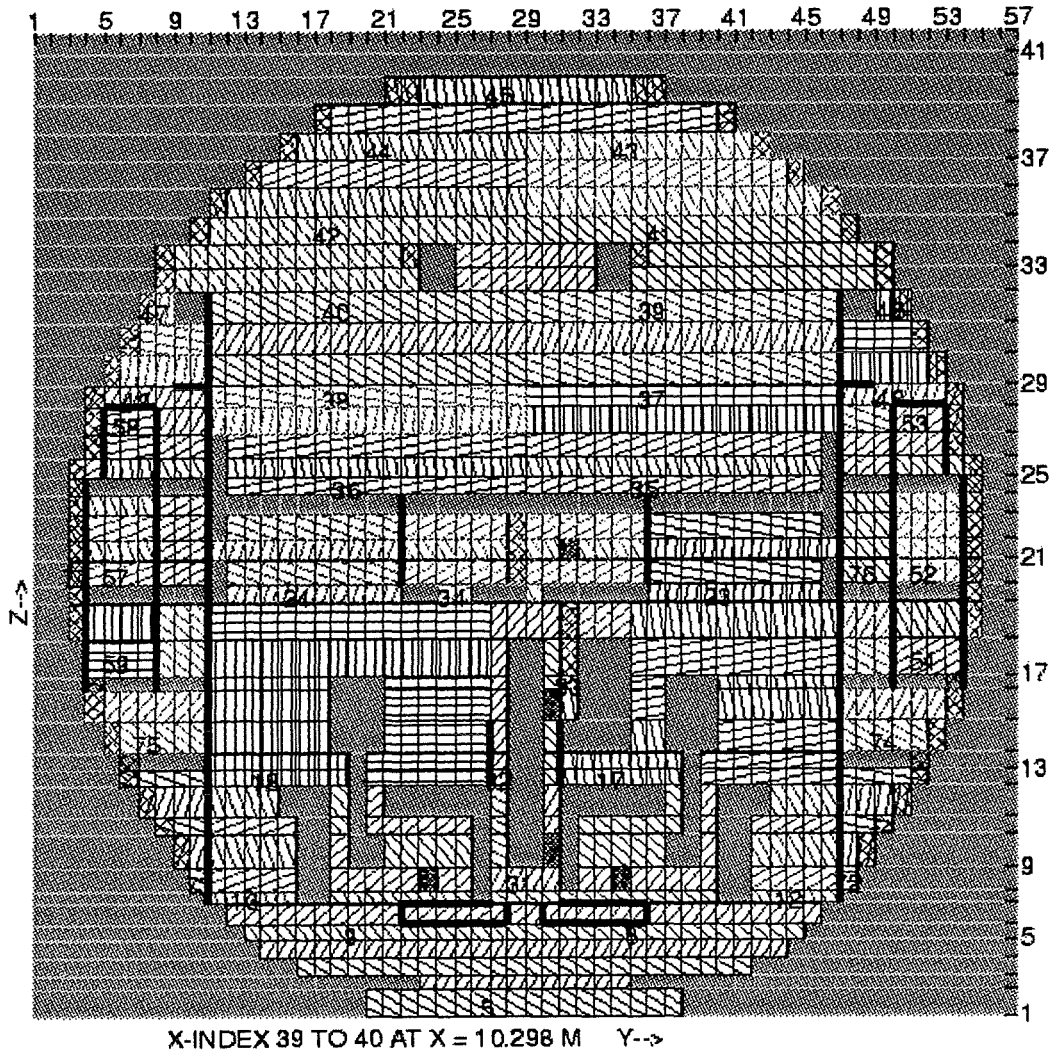


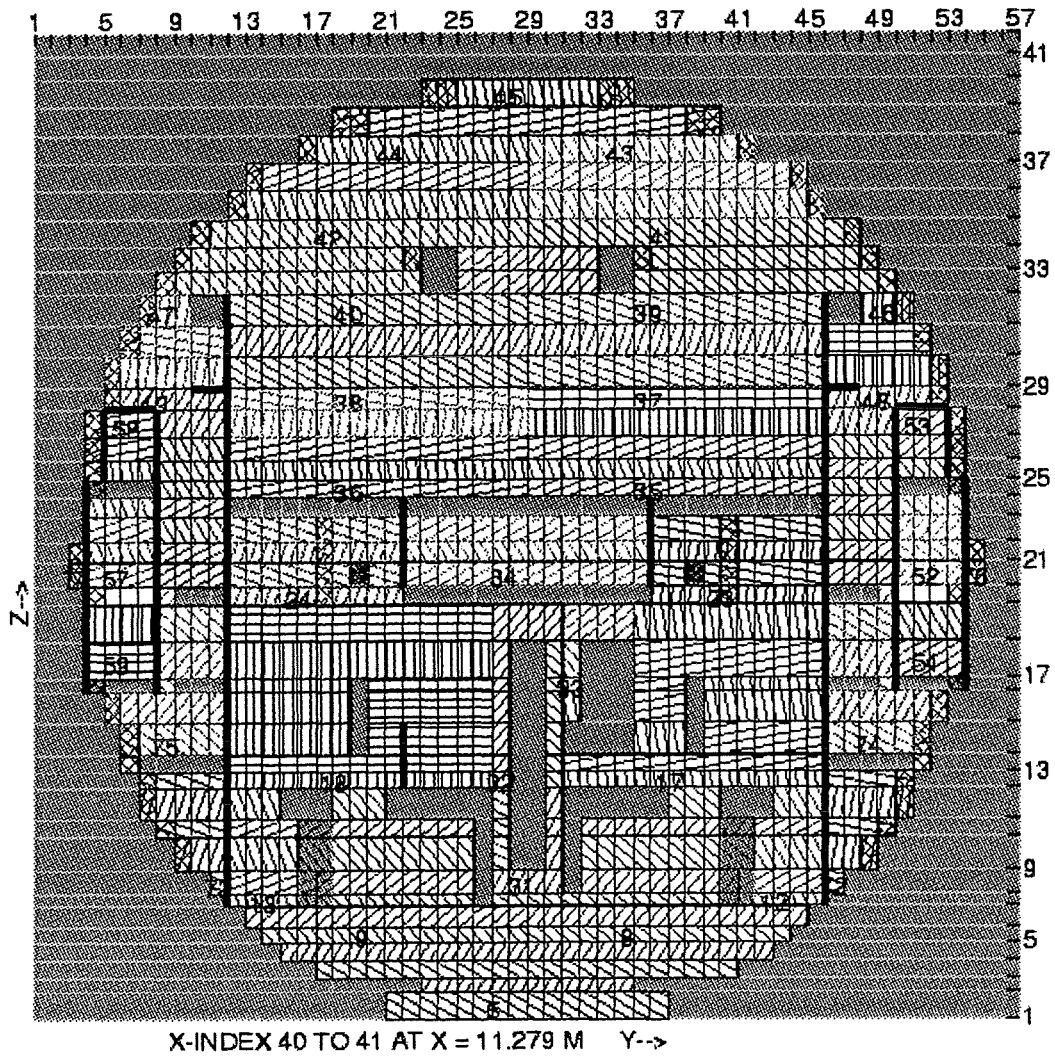
X-INDEX 36 TO 37 AT X = 7.3556 M Y-->

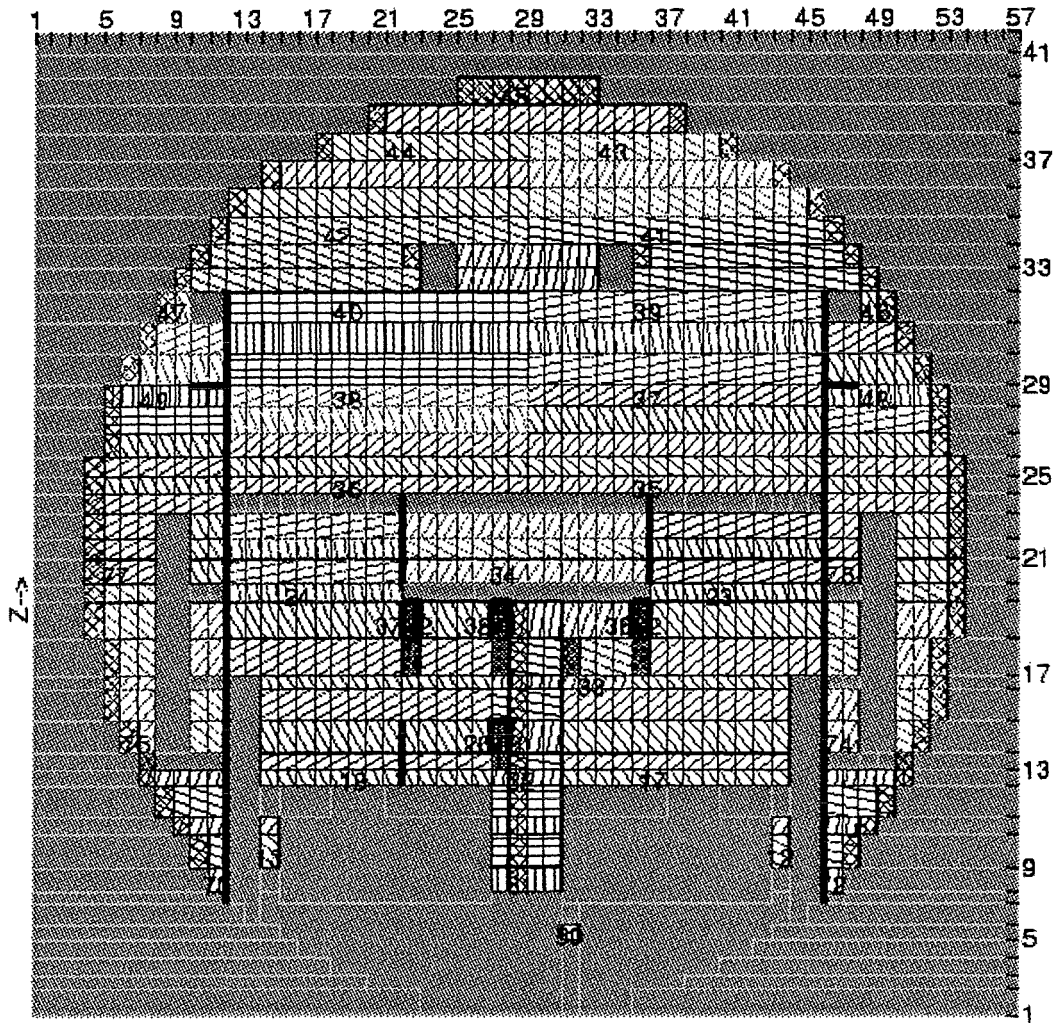




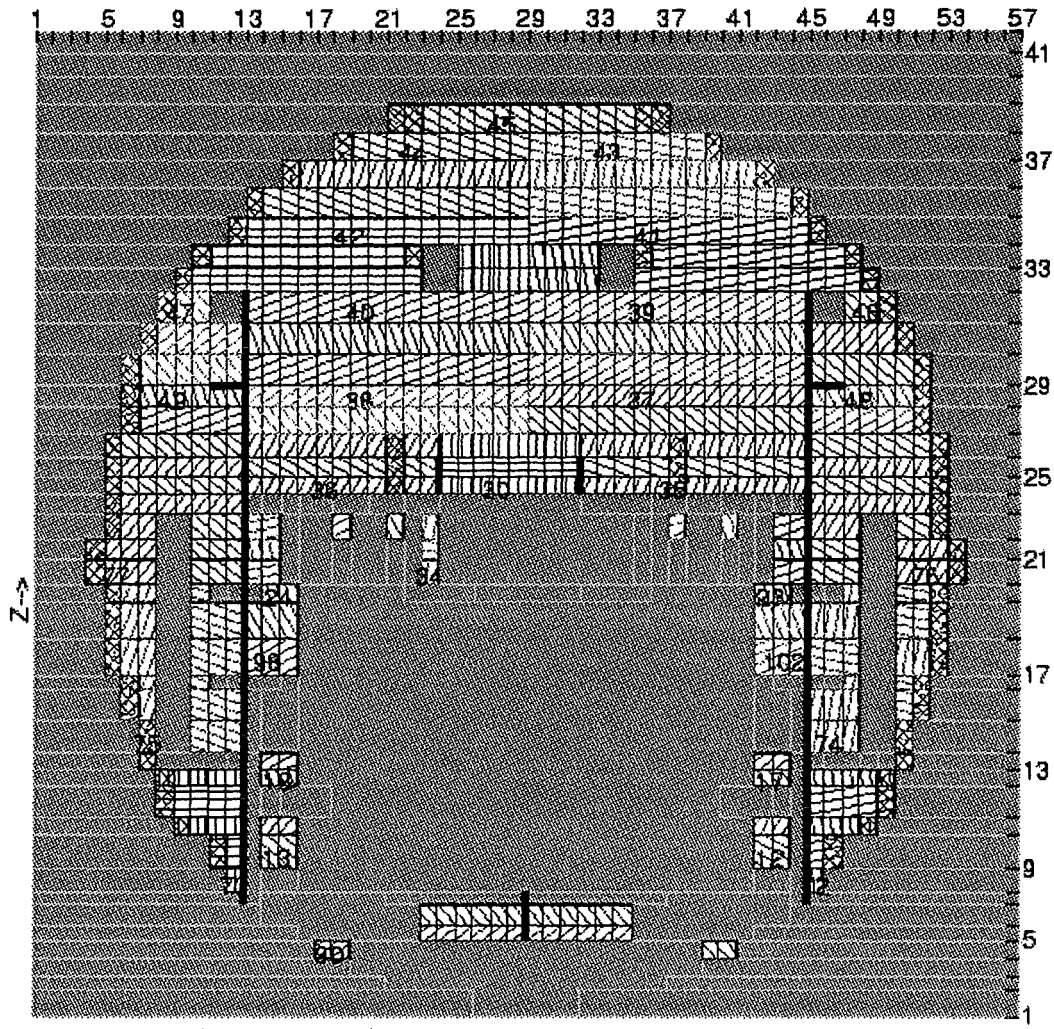
X-INDEX 38 TO 39 AT X = 9.3171 M Y-->

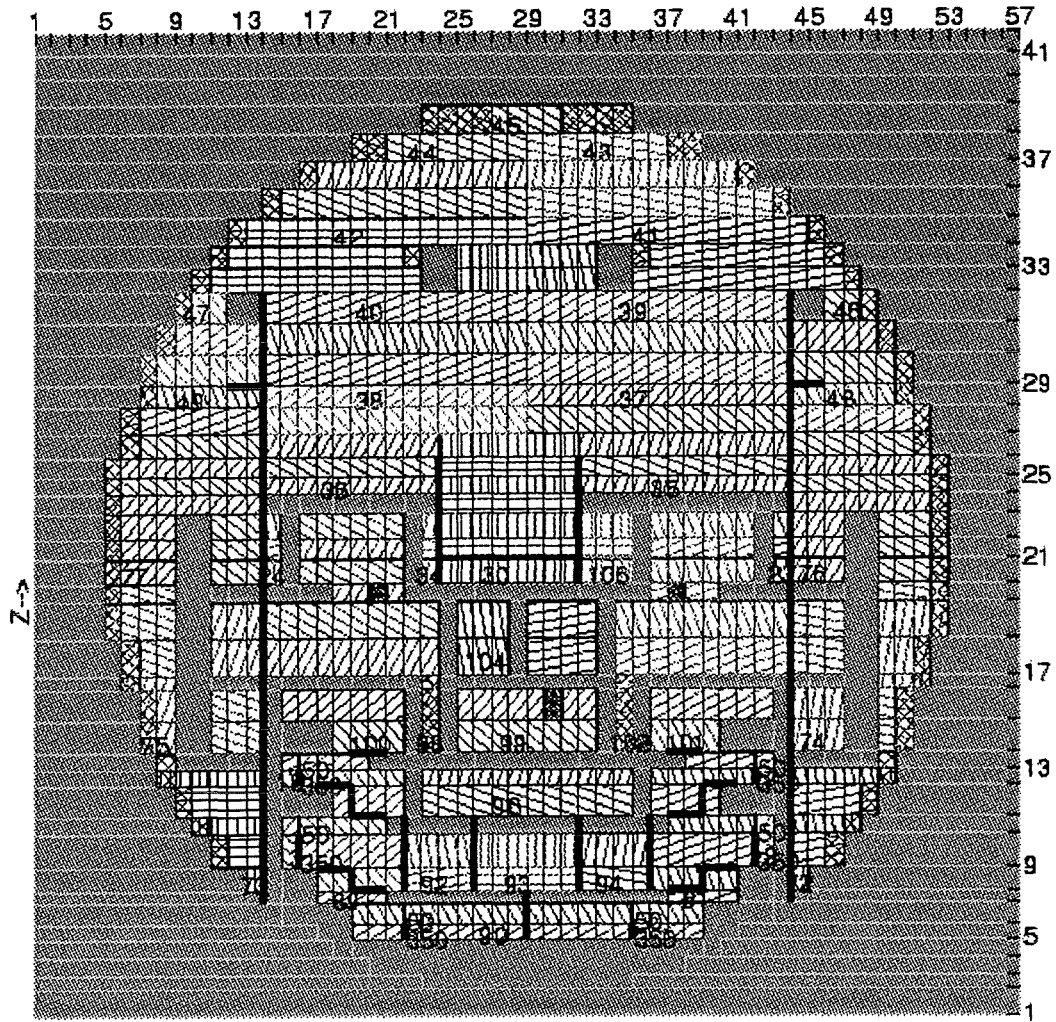




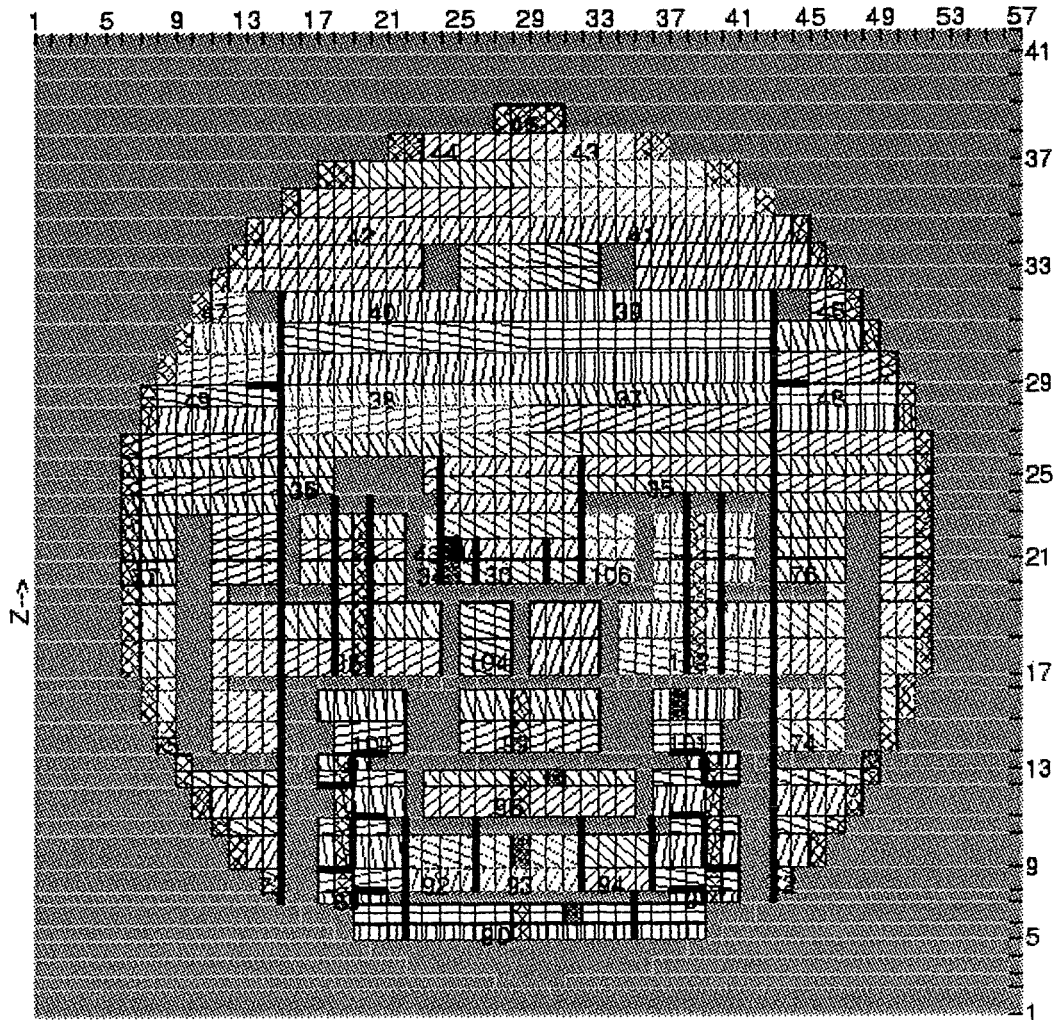


X-INDEX 41 TO 42 AT X = 12.259 M Y-->

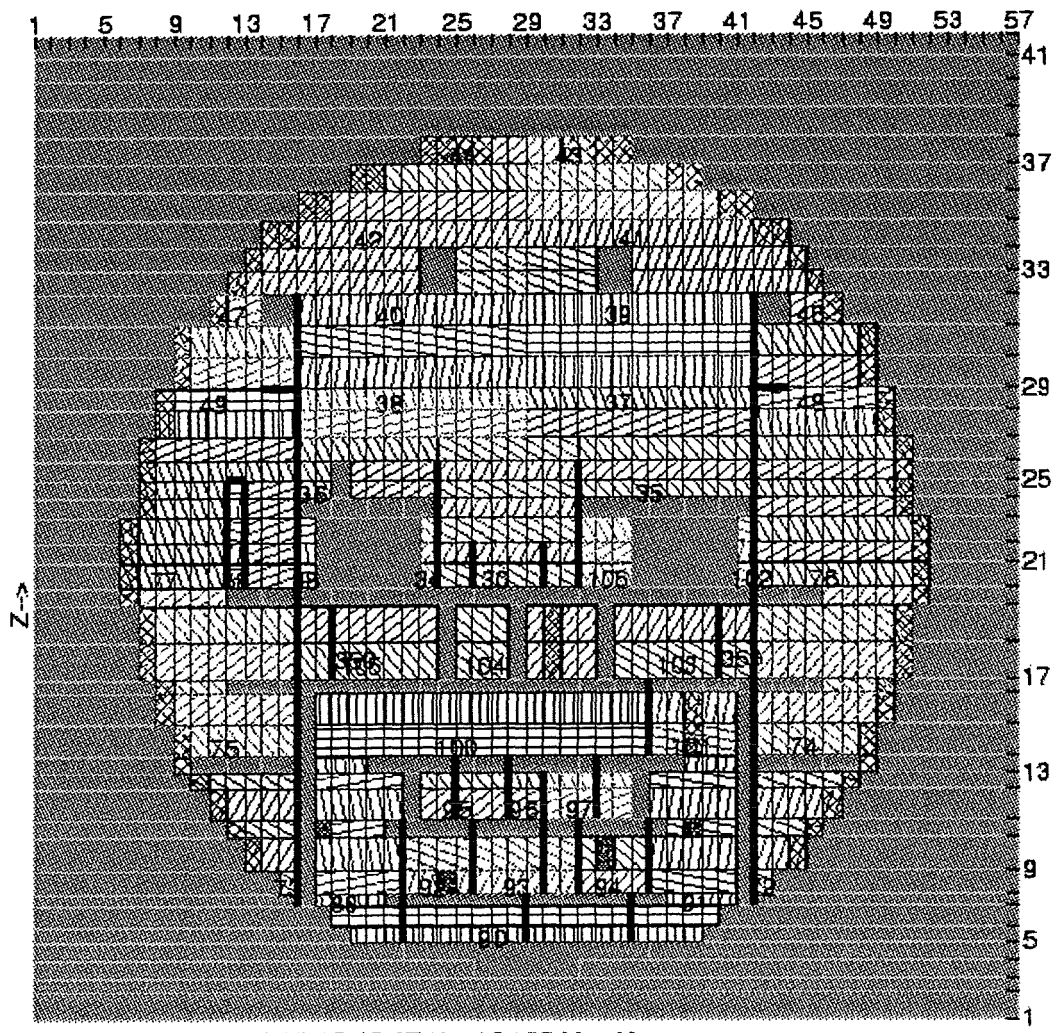




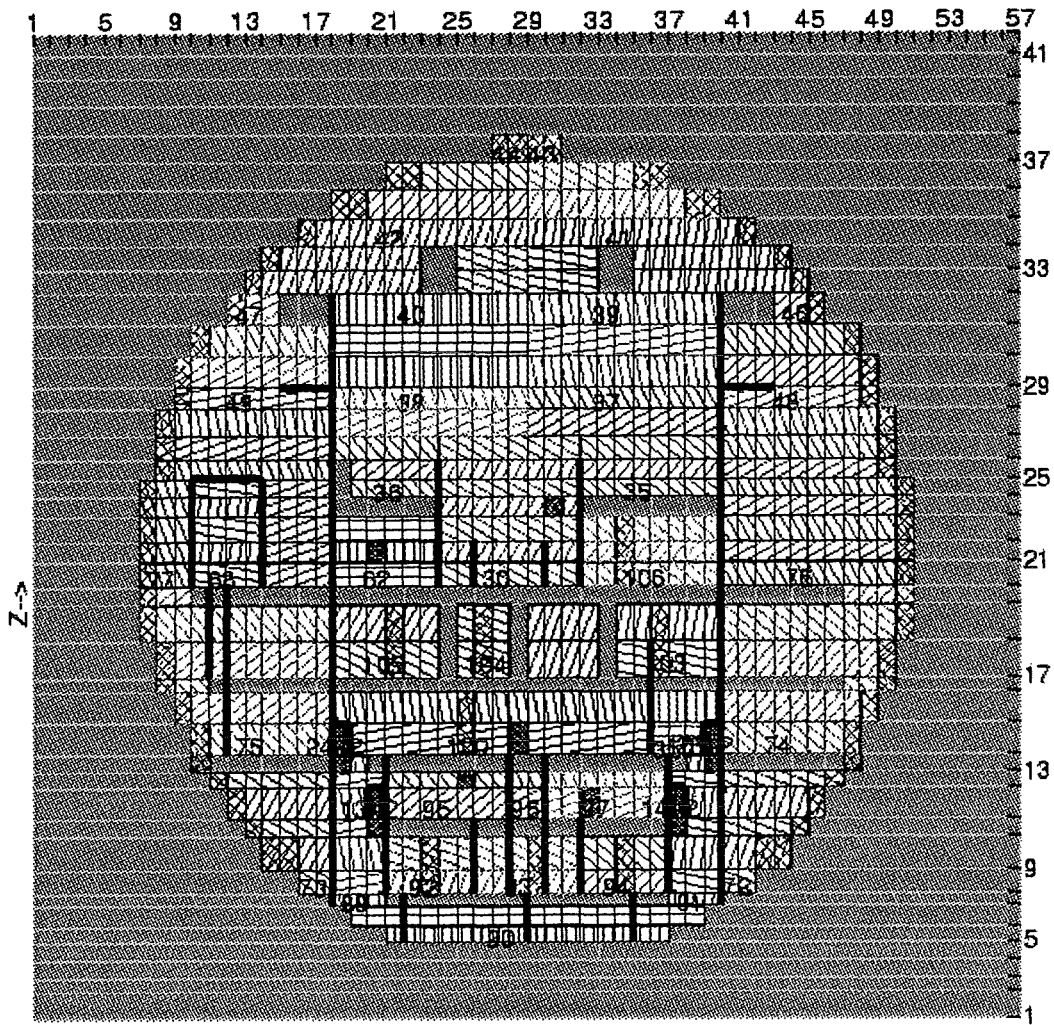
X-INDEX 43 TO 44 AT X = 14.221 M Y-->



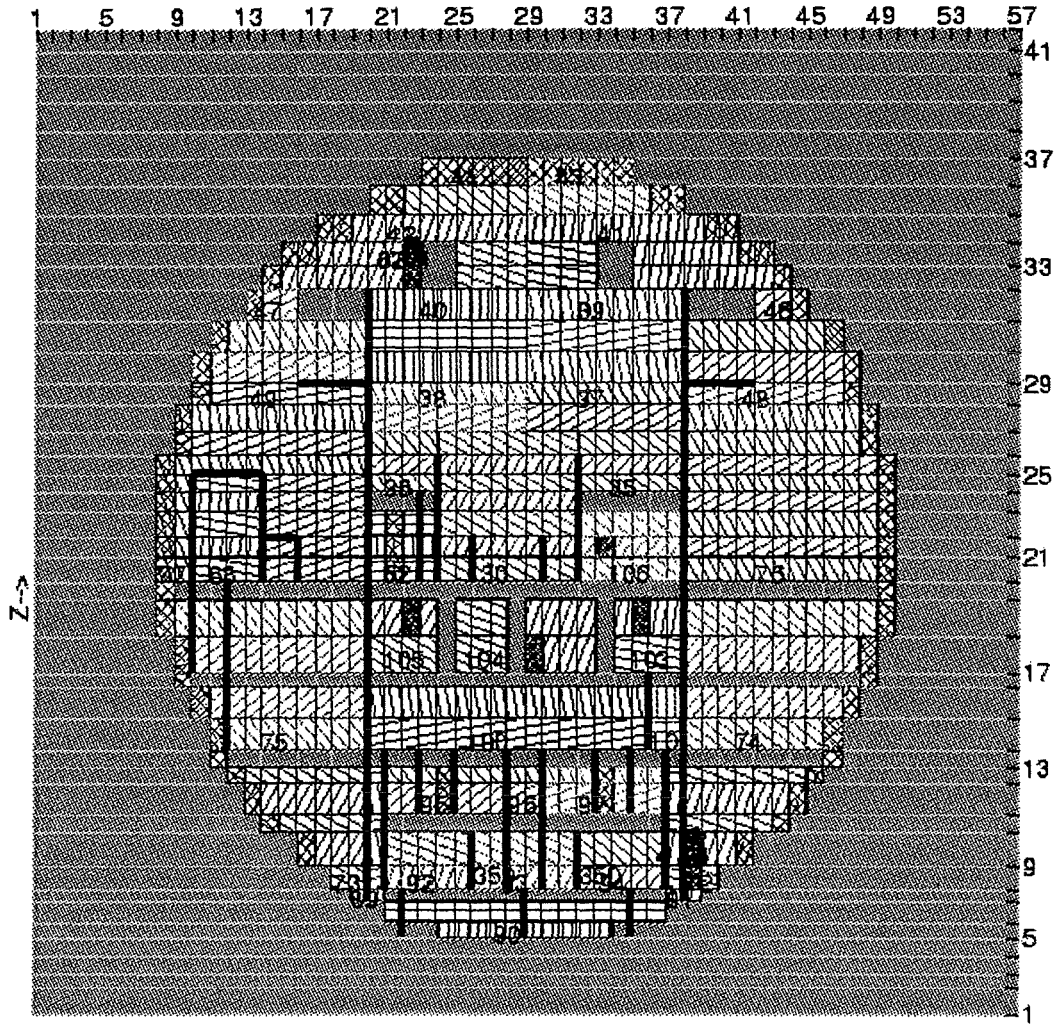
X-INDEX 44 TO 45 AT X = 15.202 M Y-->



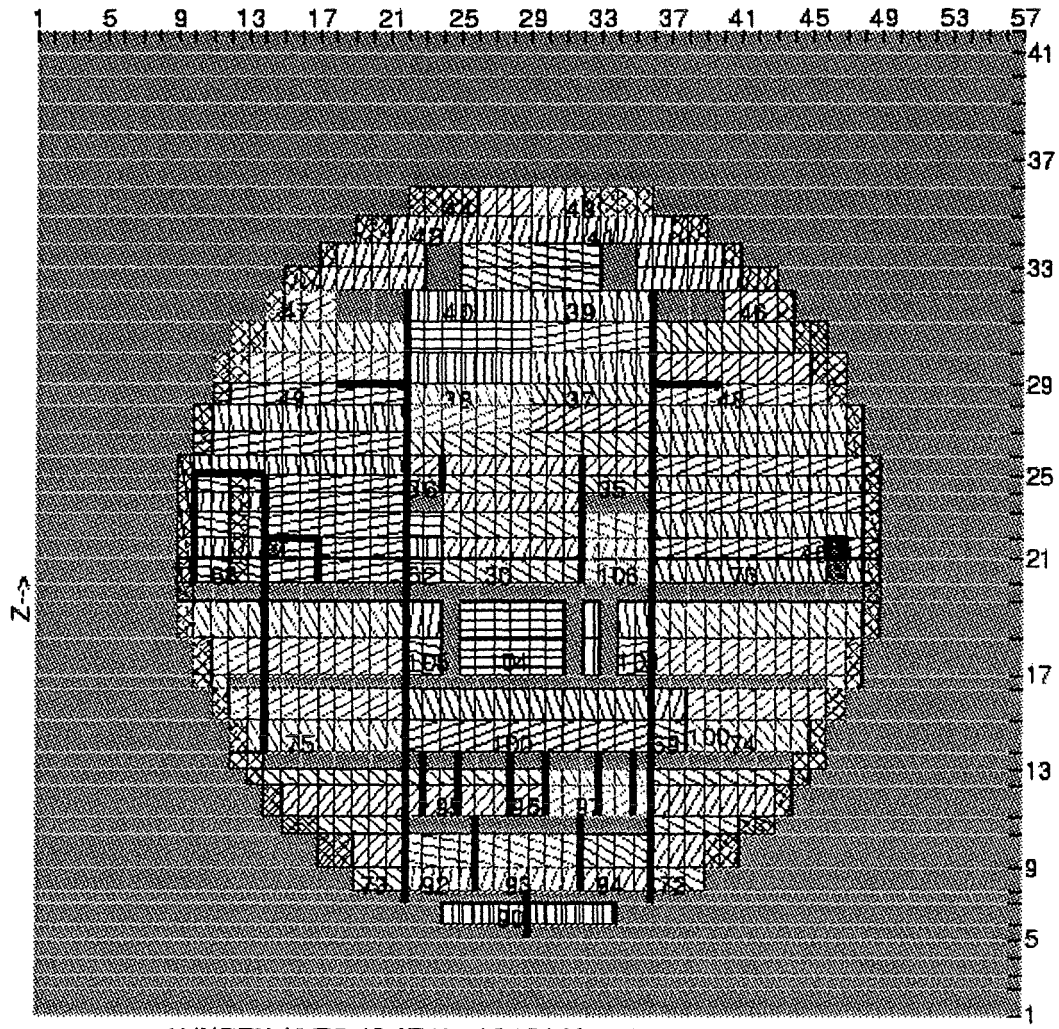
X-INDEX 45 TO 46 AT X = 16.182 M Y-->



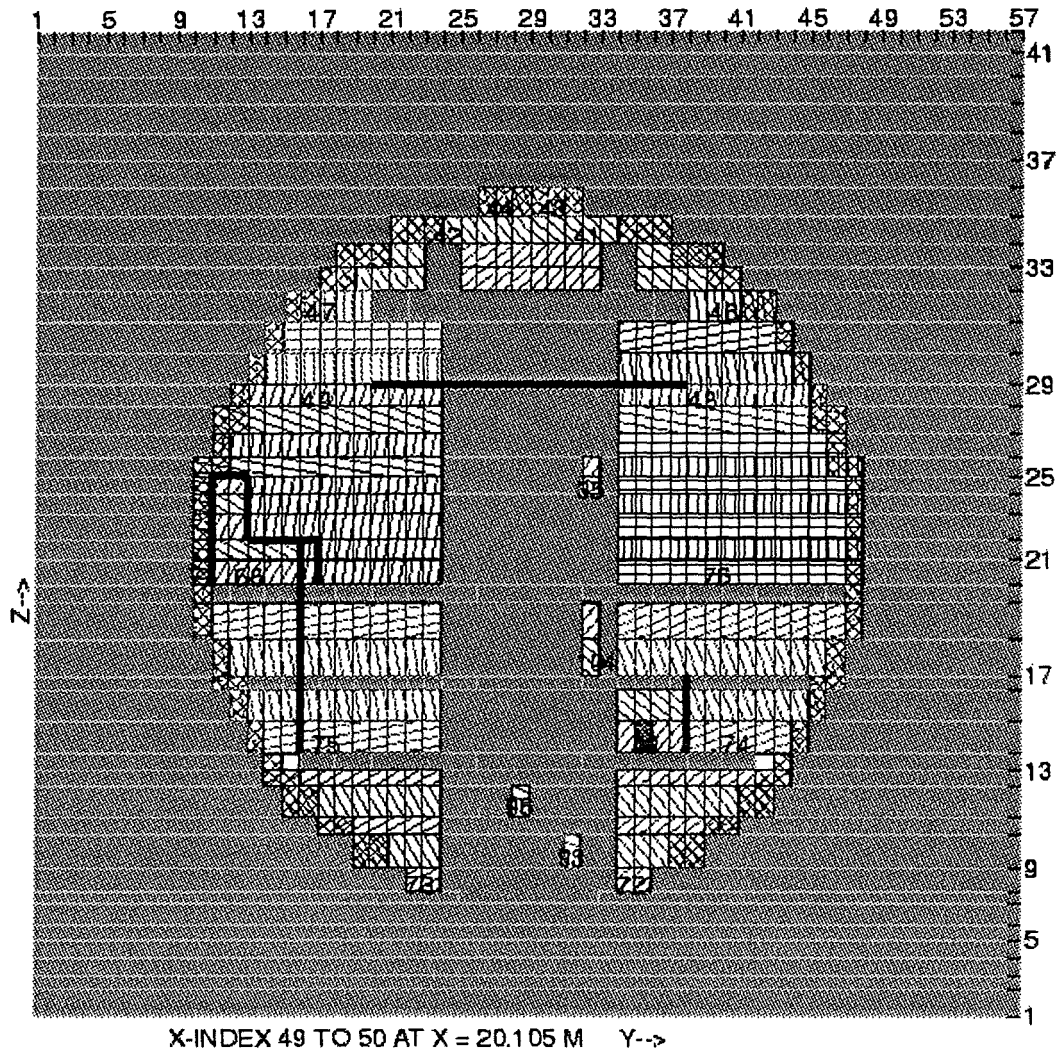
X-INDEX 46 TO 47 AT X = 17.163 M Y-->

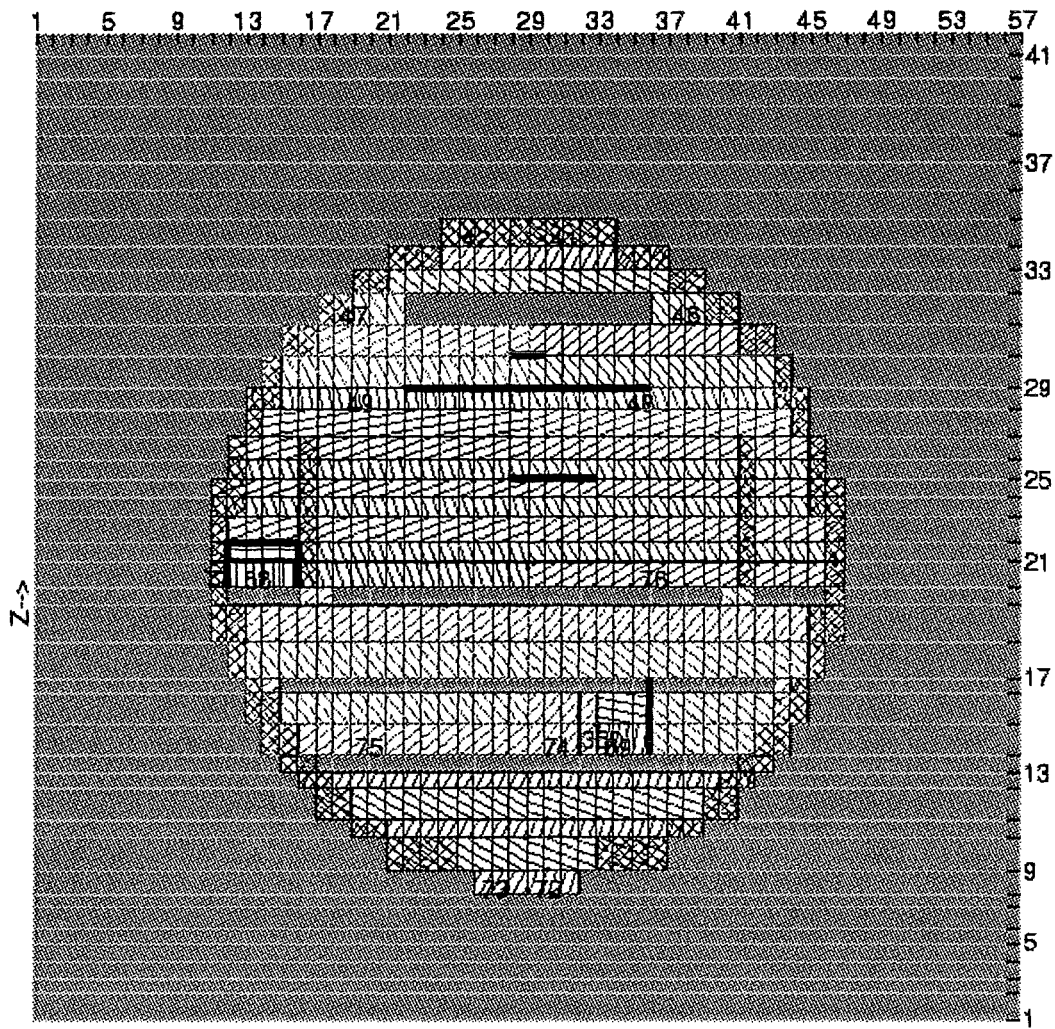


X-INDEX 47 TO 48 AT X = 18.144 M Y-->

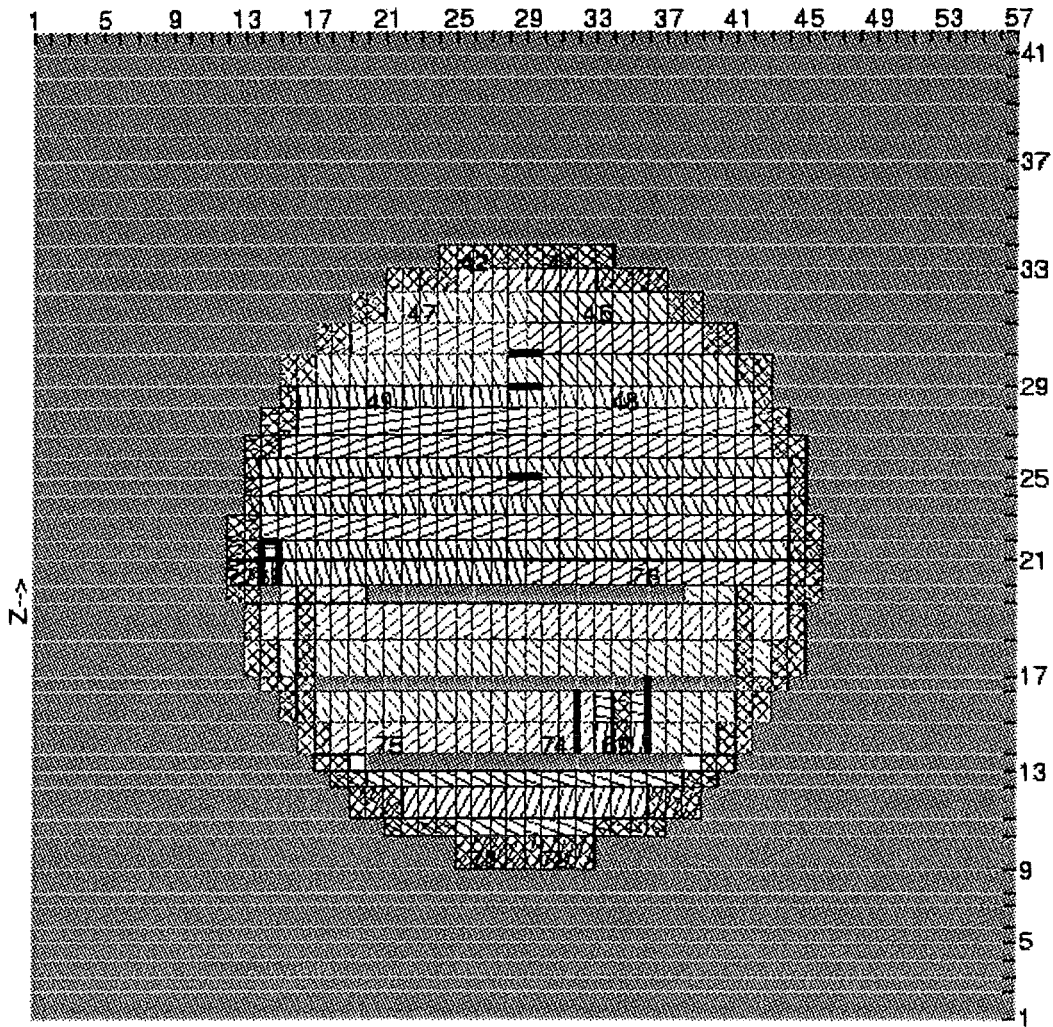


X-INDEX 48 TO 49 AT X = 19.124 M Y-->

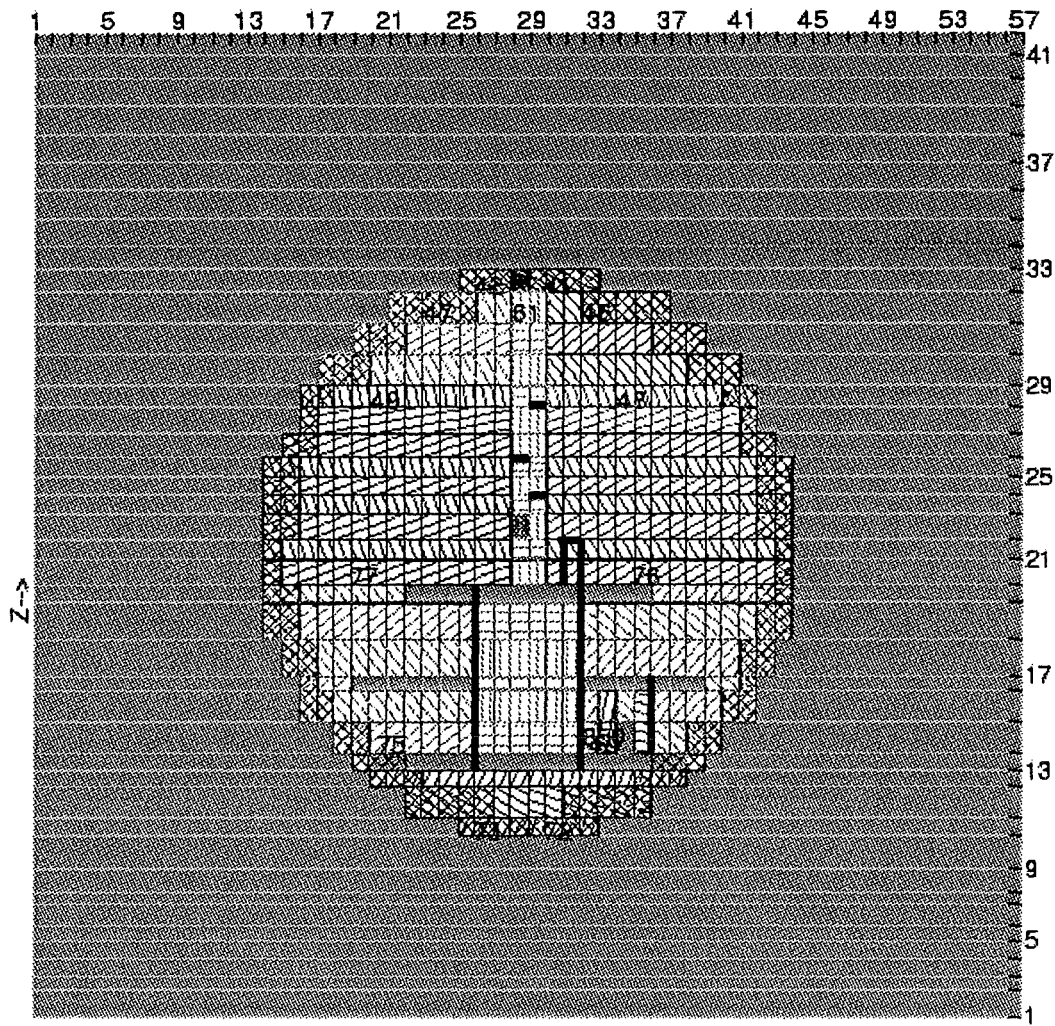




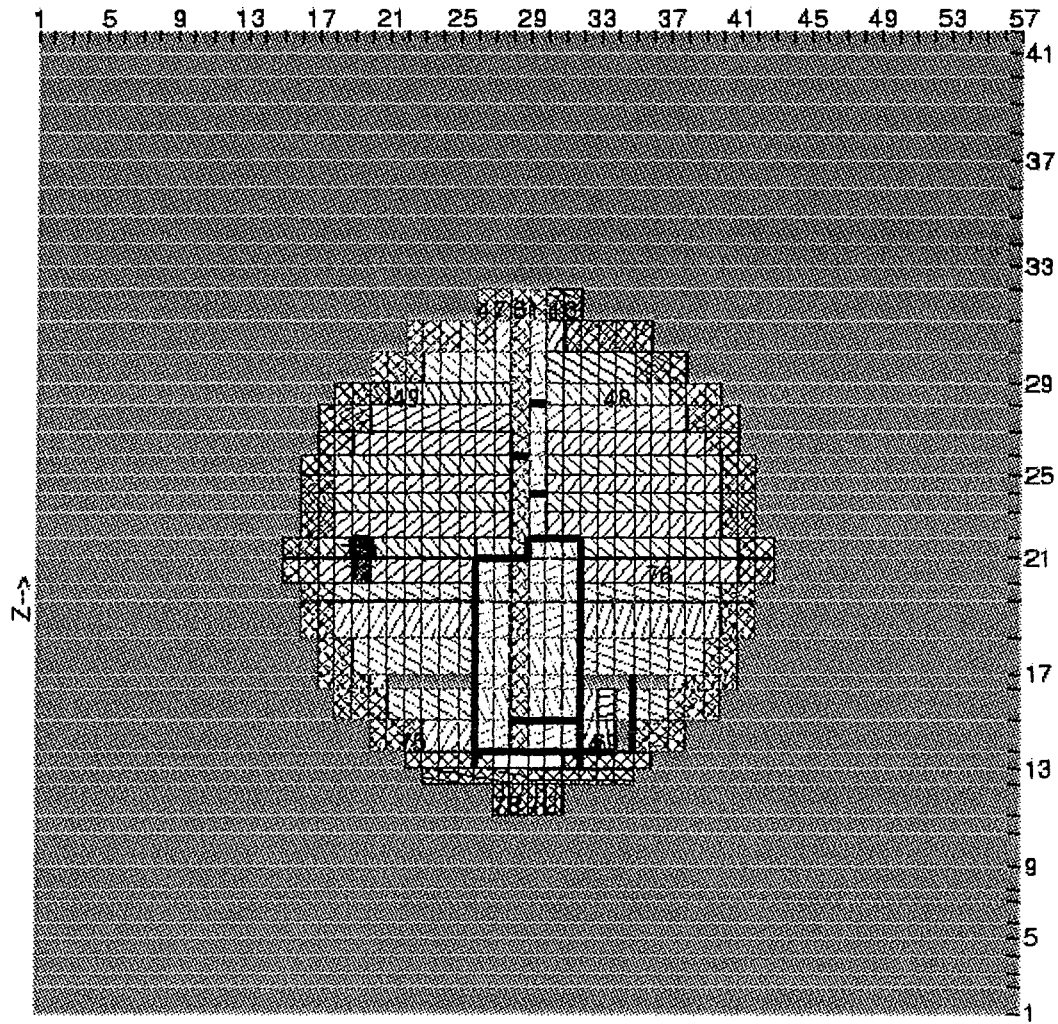
X-INDEX 50 TO 51 AT X = 21.086 M Y-->



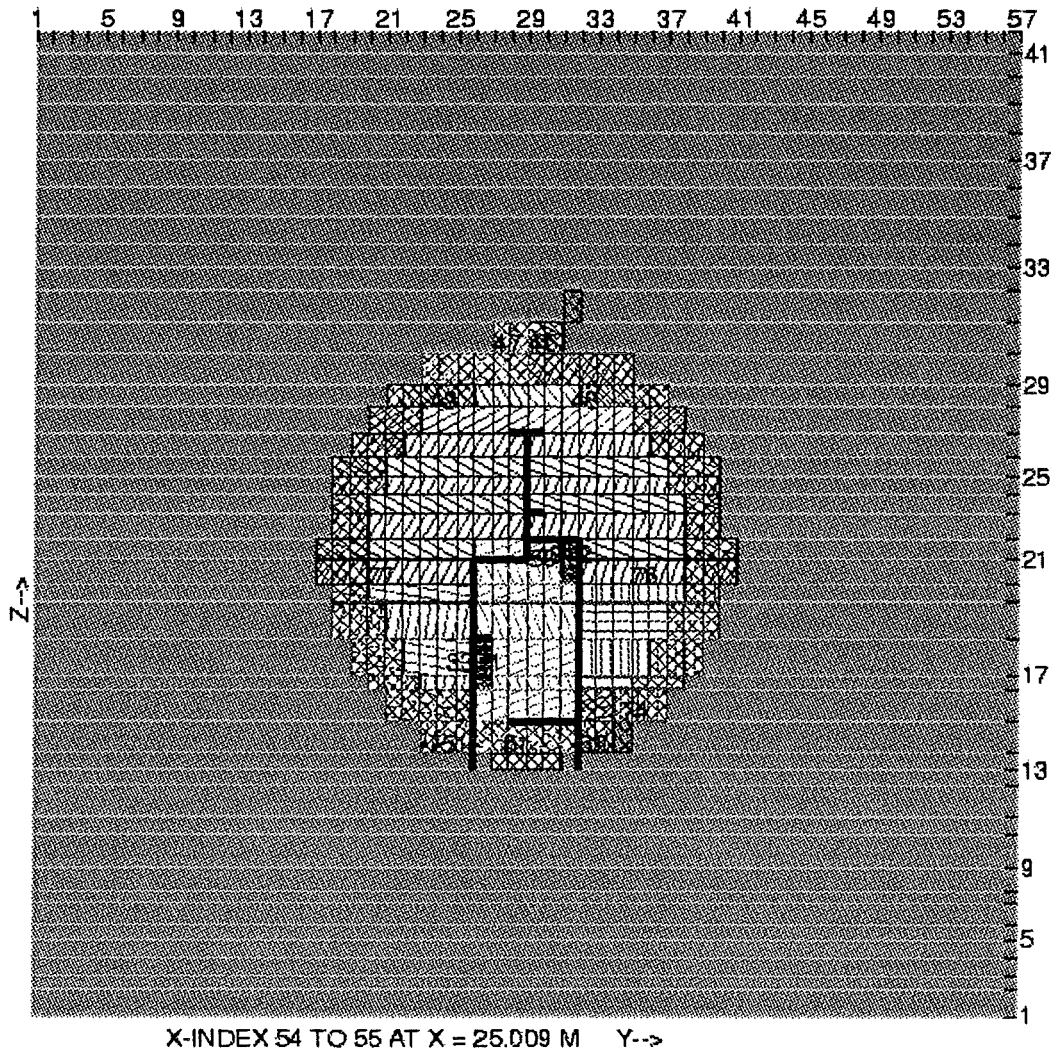
X-INDEX 51 TO 52 AT X = 22.067 M Y-->

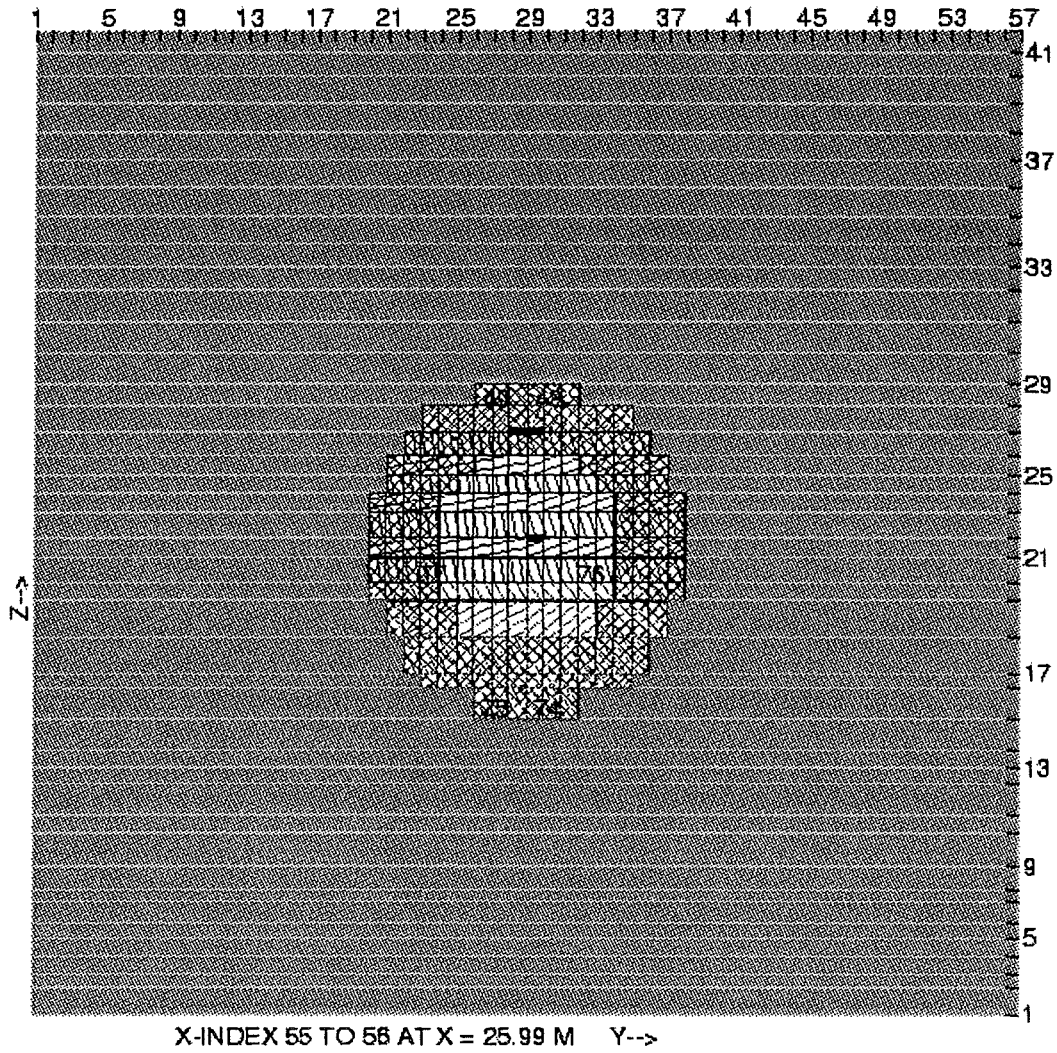


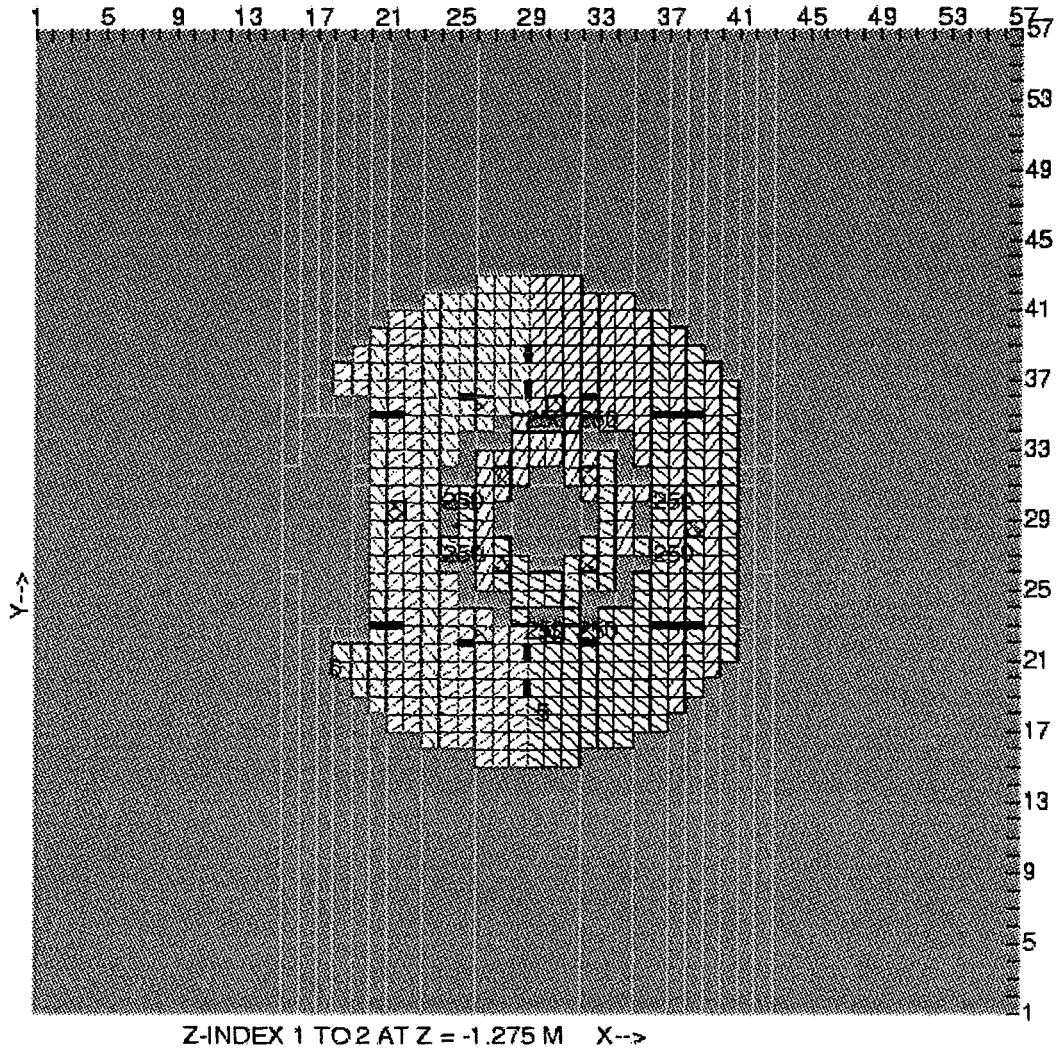
X-INDEX 52 TO 53 AT X = 23.047 M Y-->

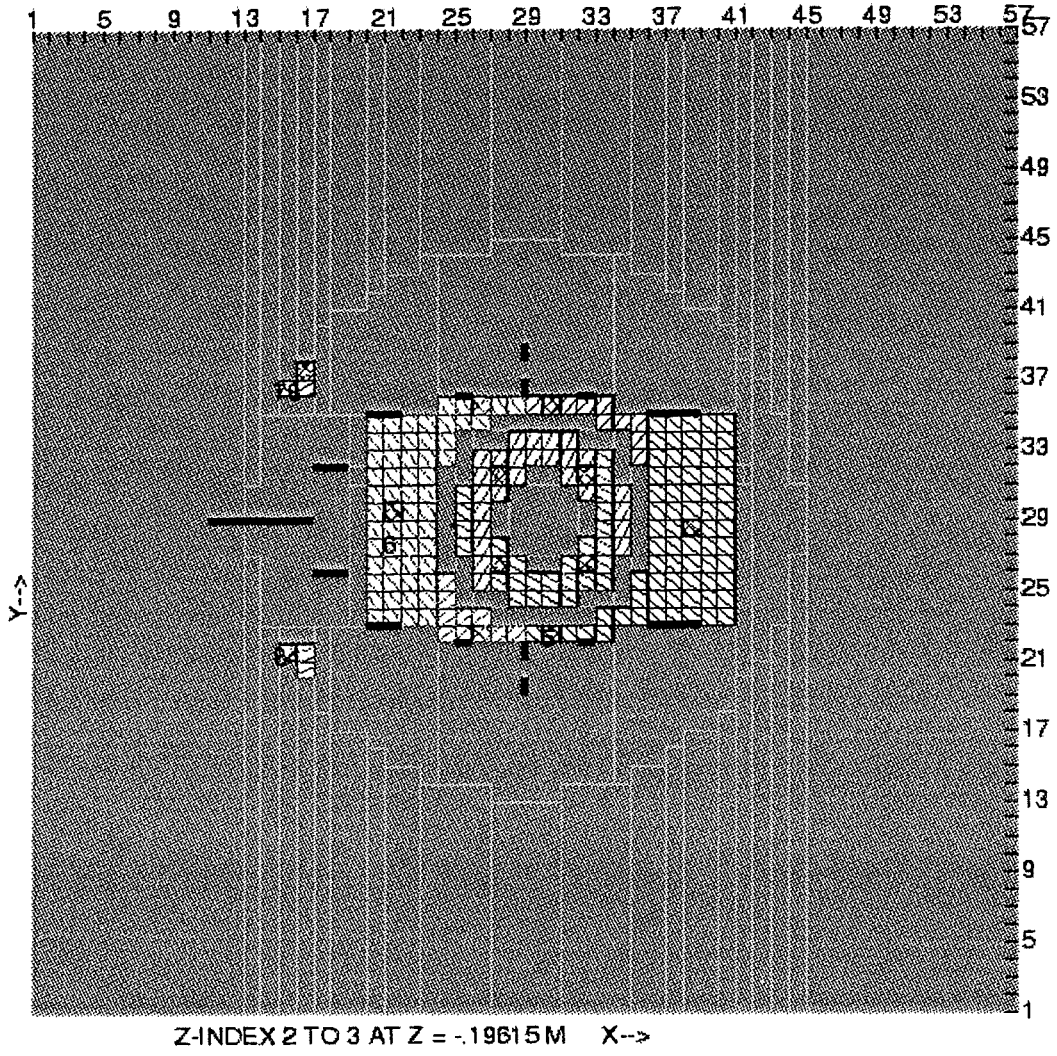


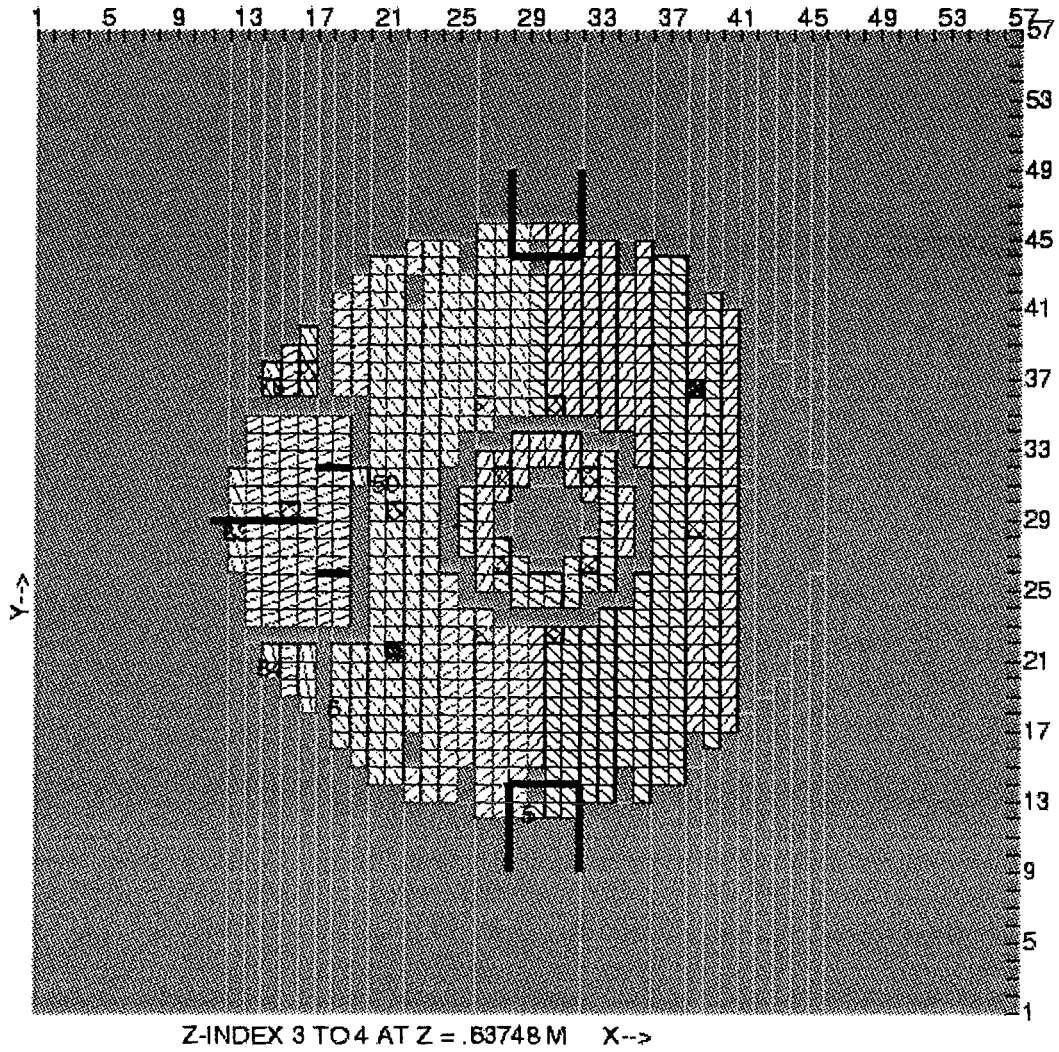
X-INDEX 53 TO 54 AT X = 24.028 M Y-->

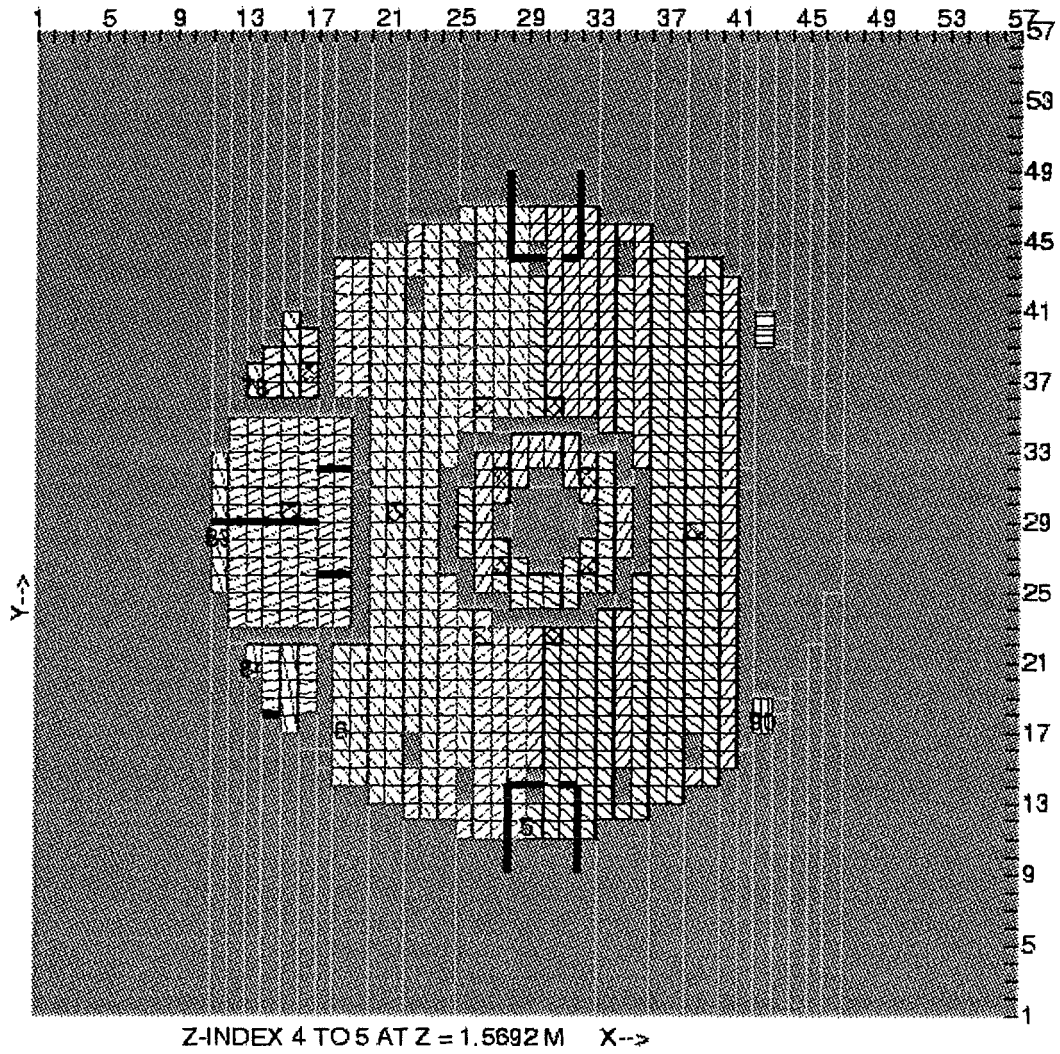


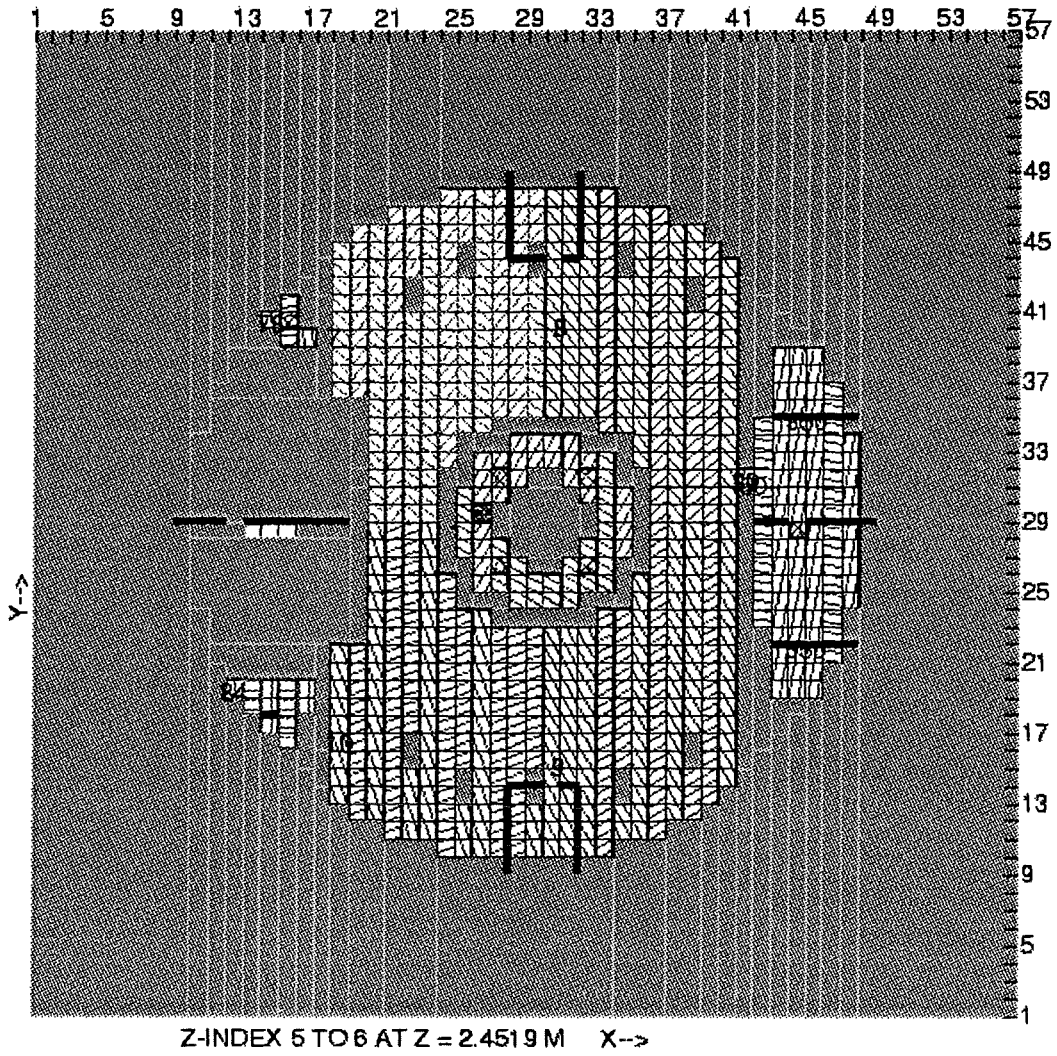


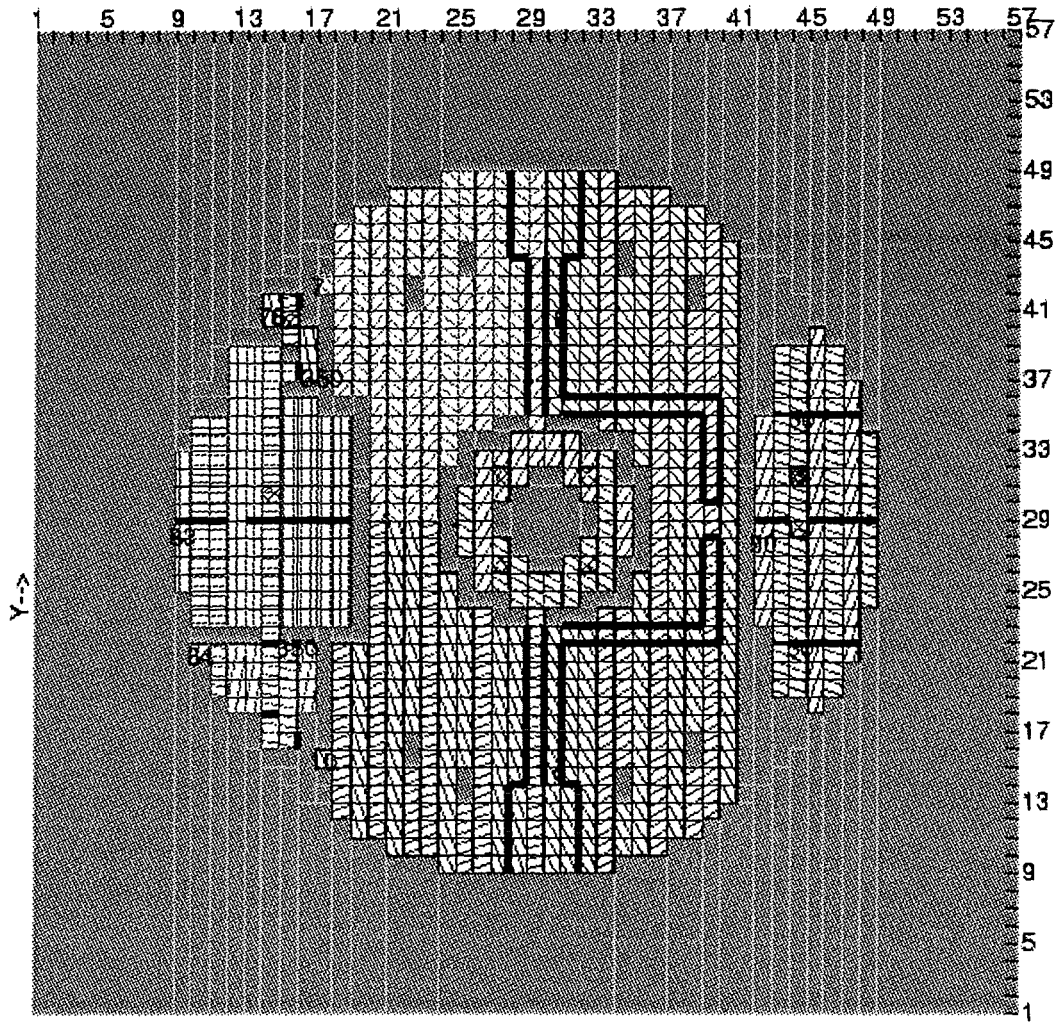




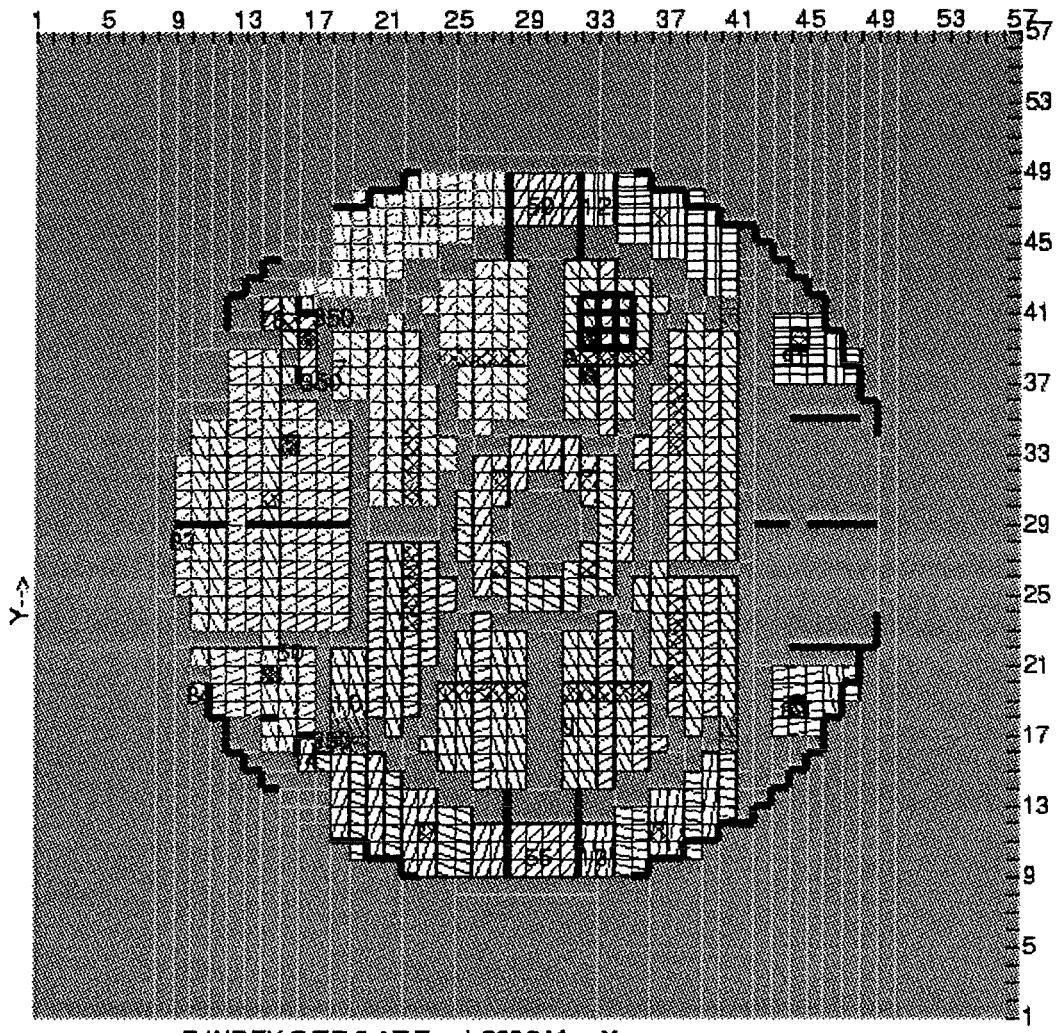




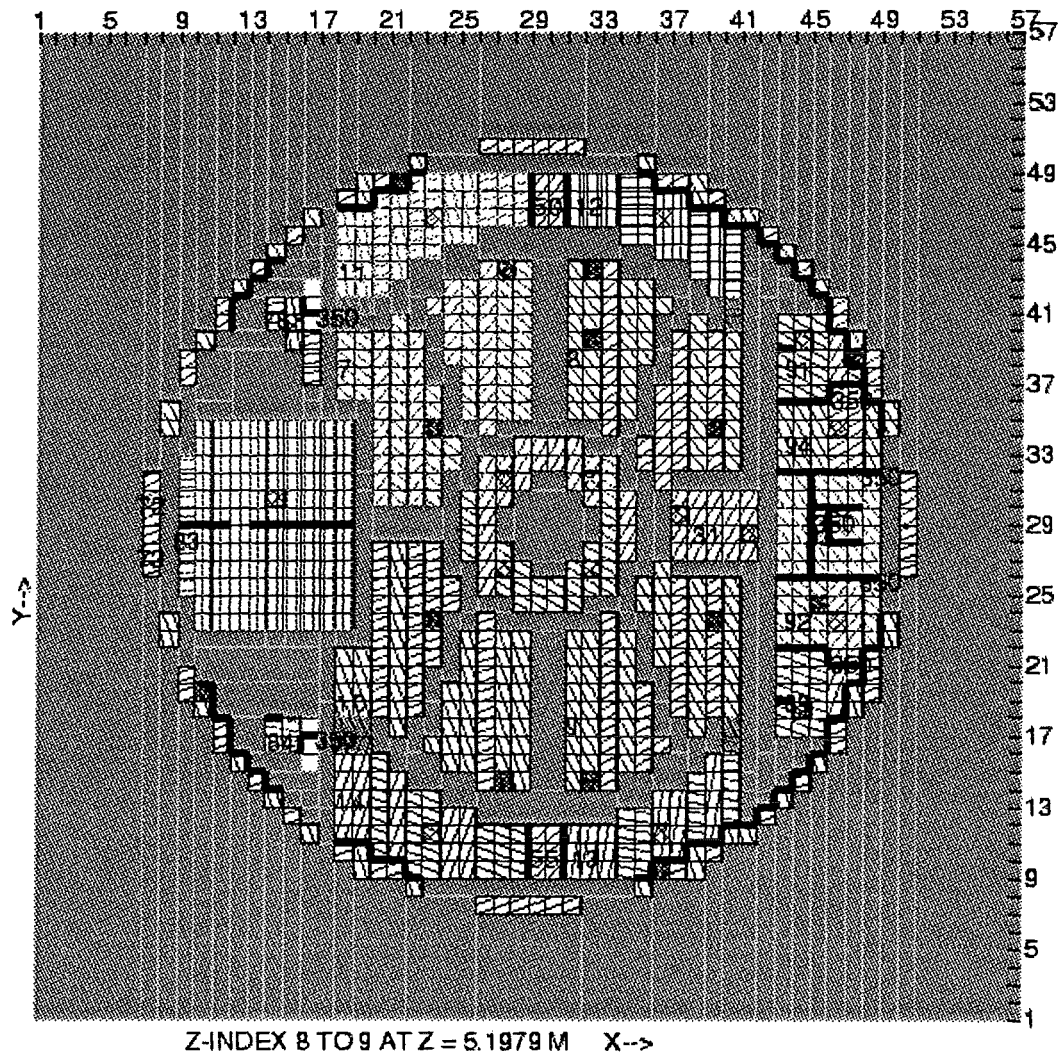


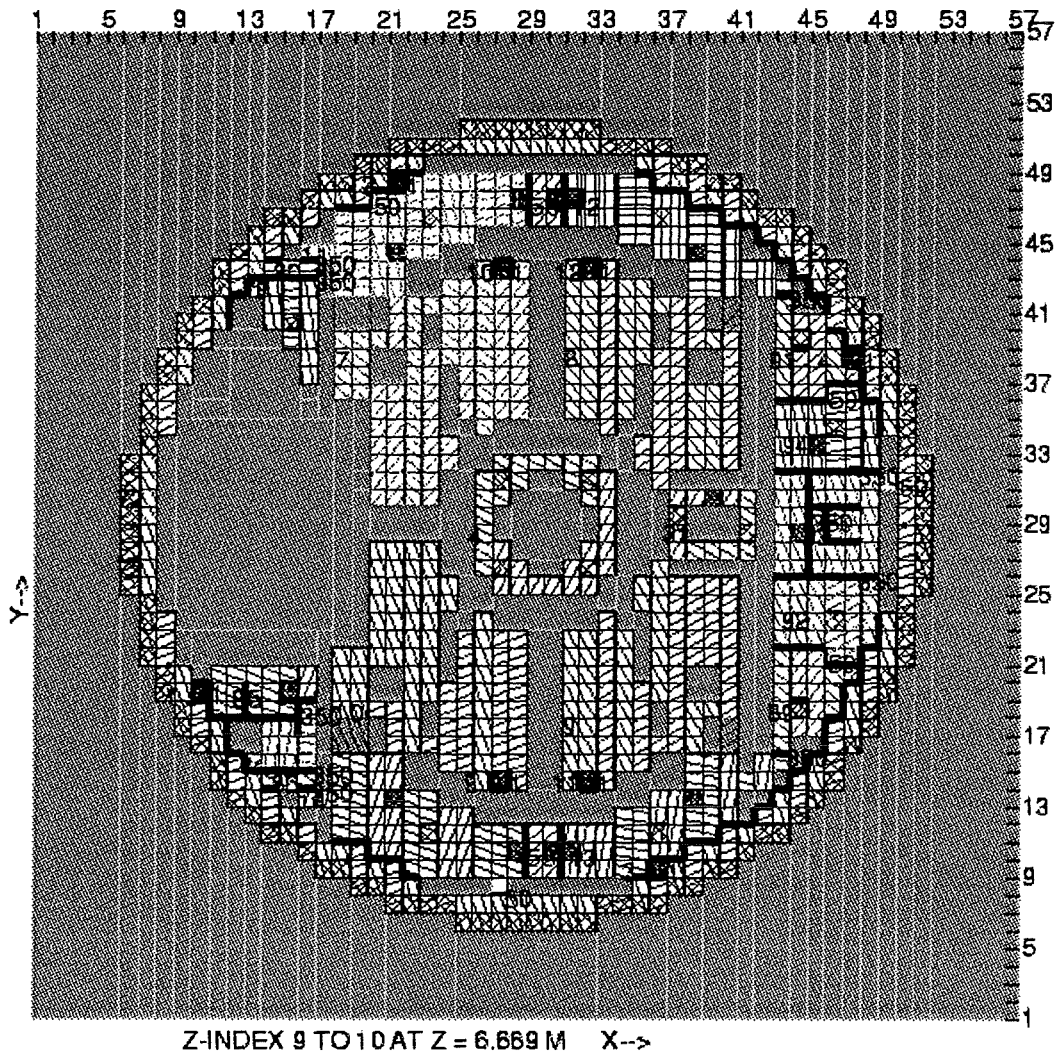


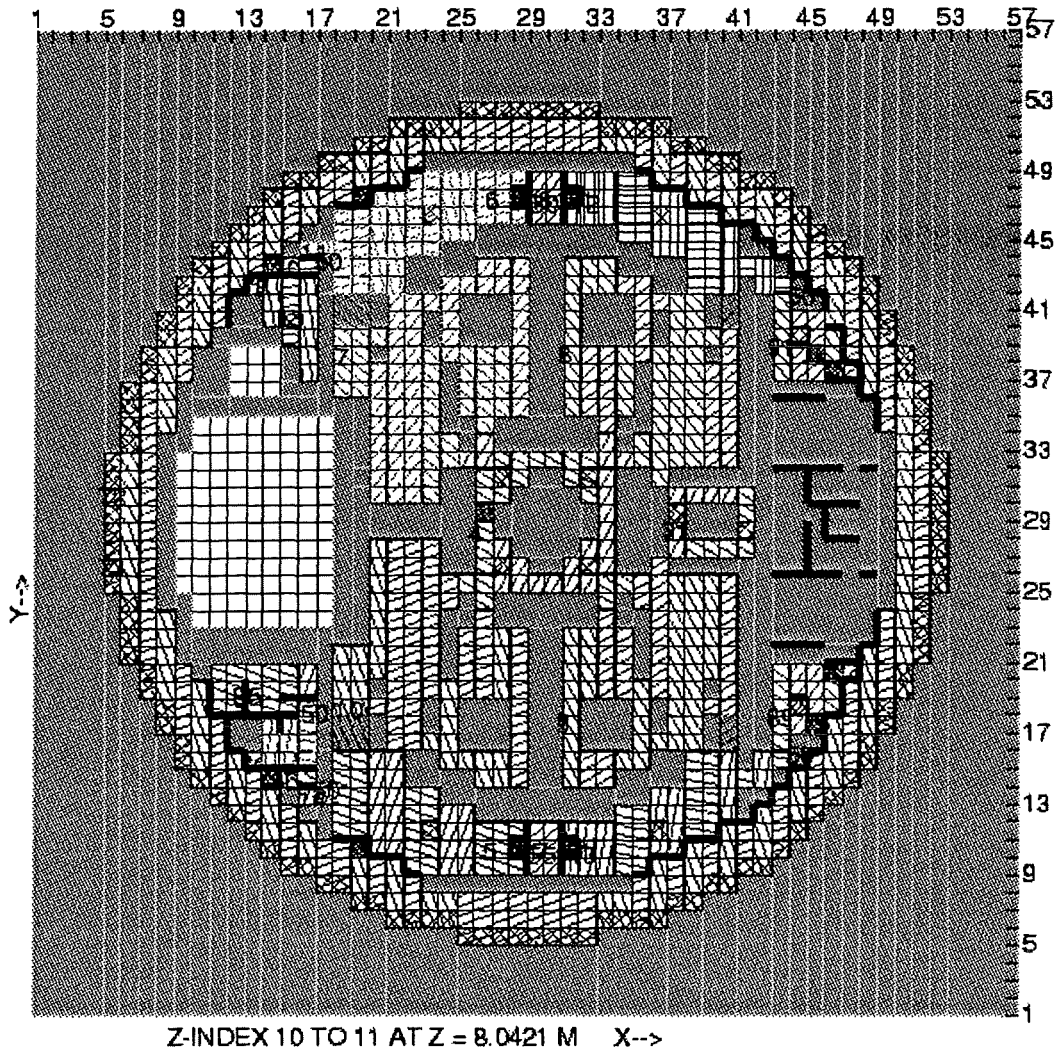
Z-INDEX 6 TO 7 AT Z = 3.3836 M X-->

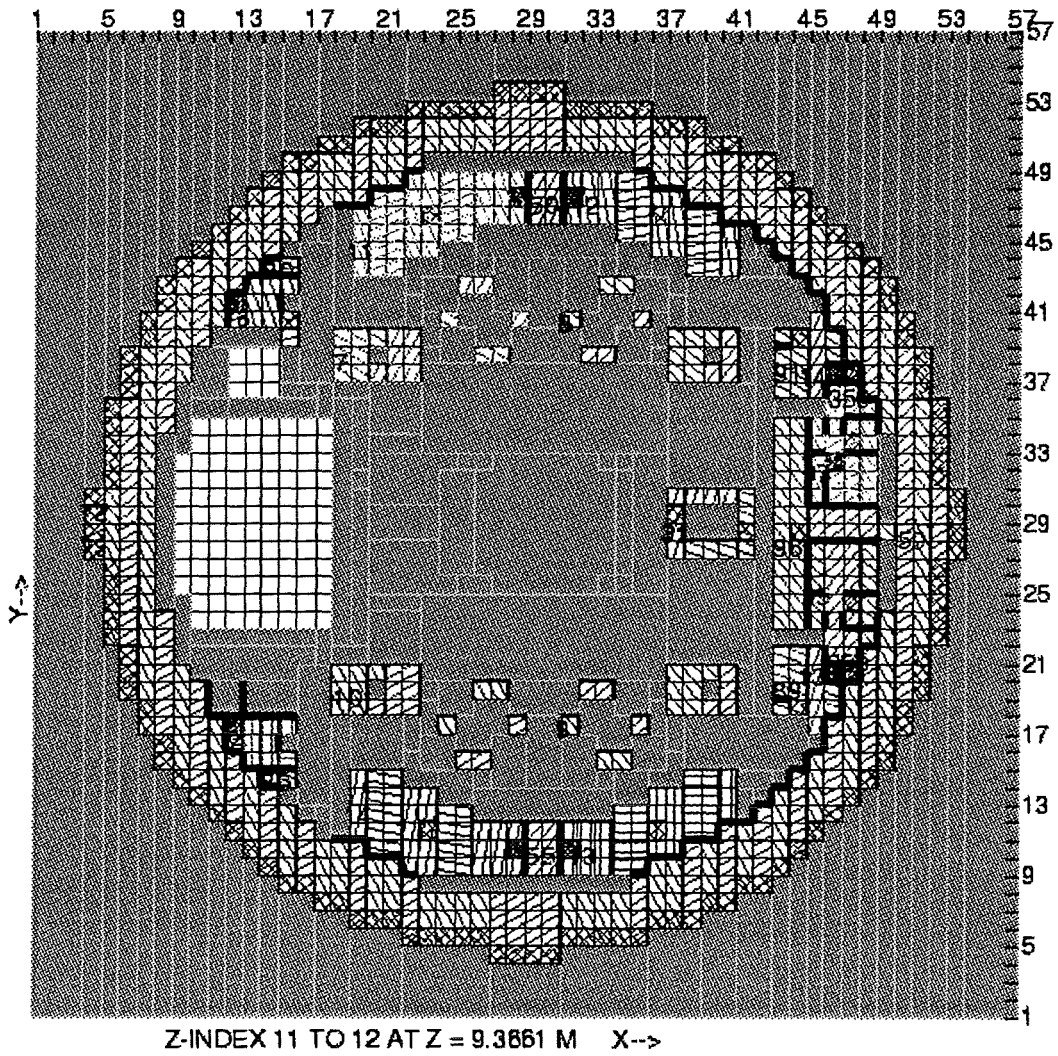


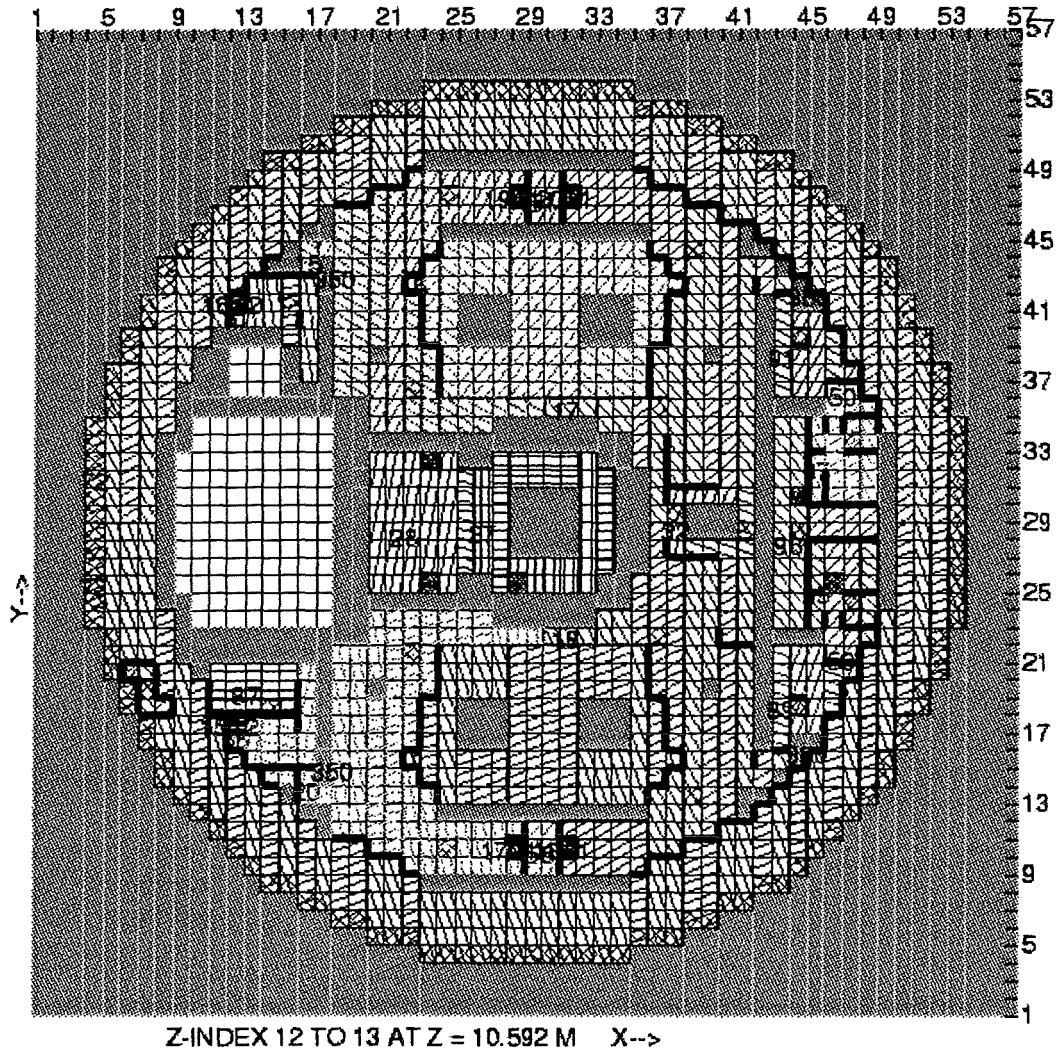
Z-INDEX 7 TO 8 AT Z = 4.2652 M X-->

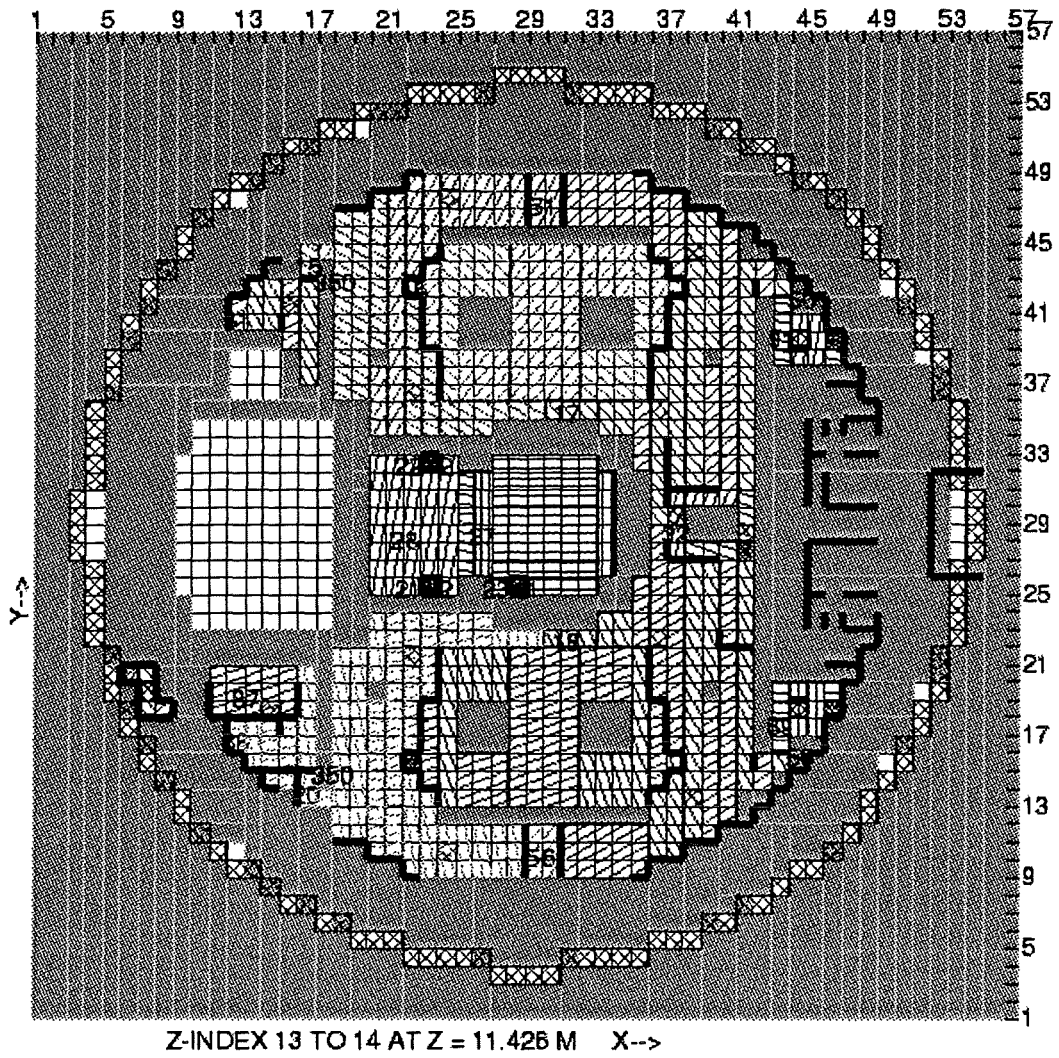


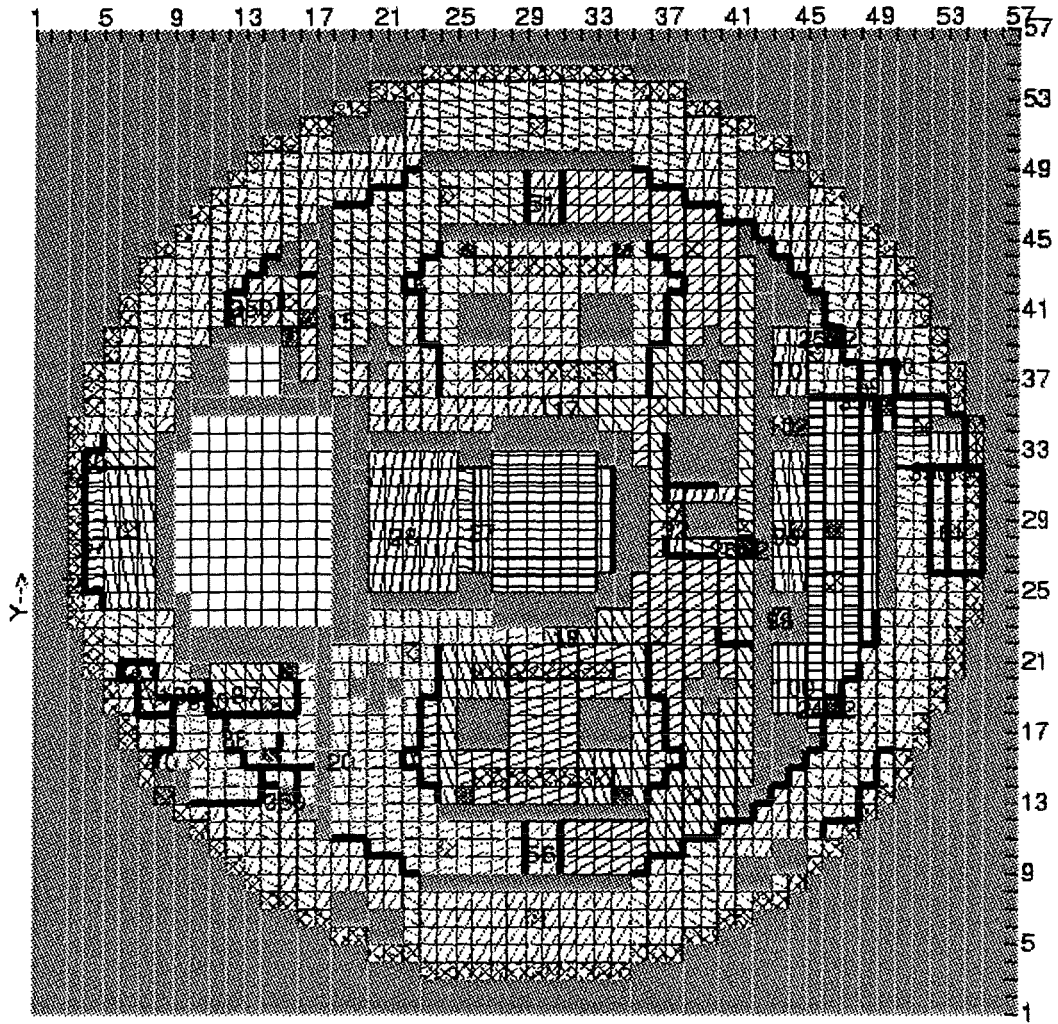




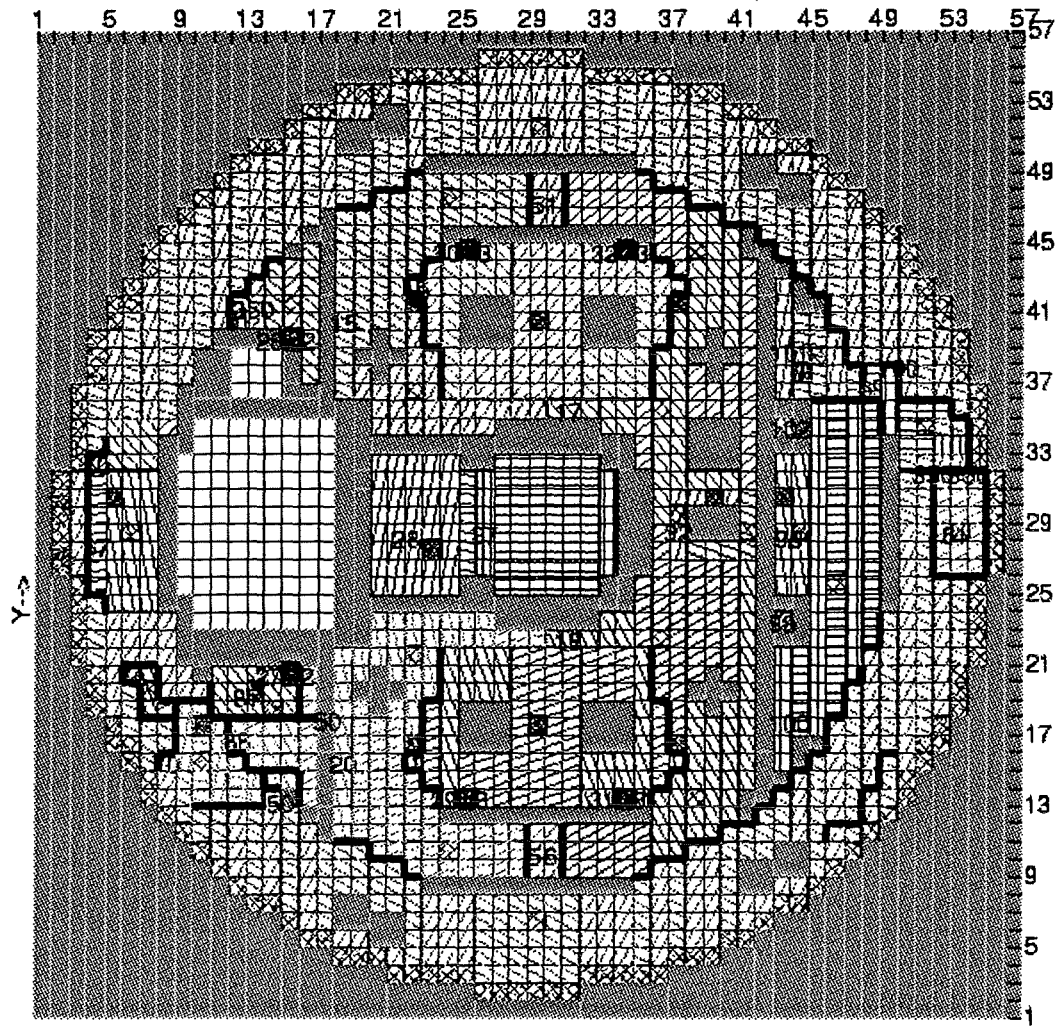




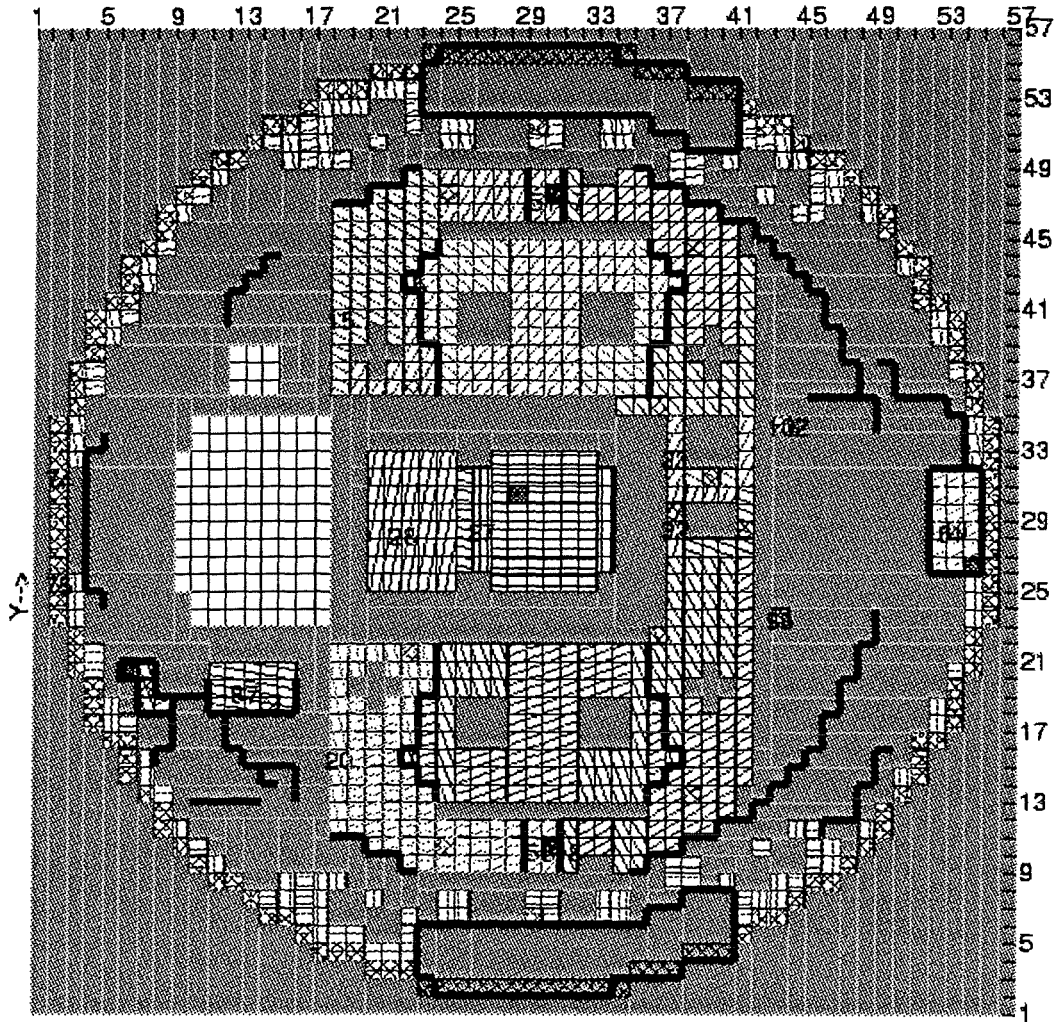




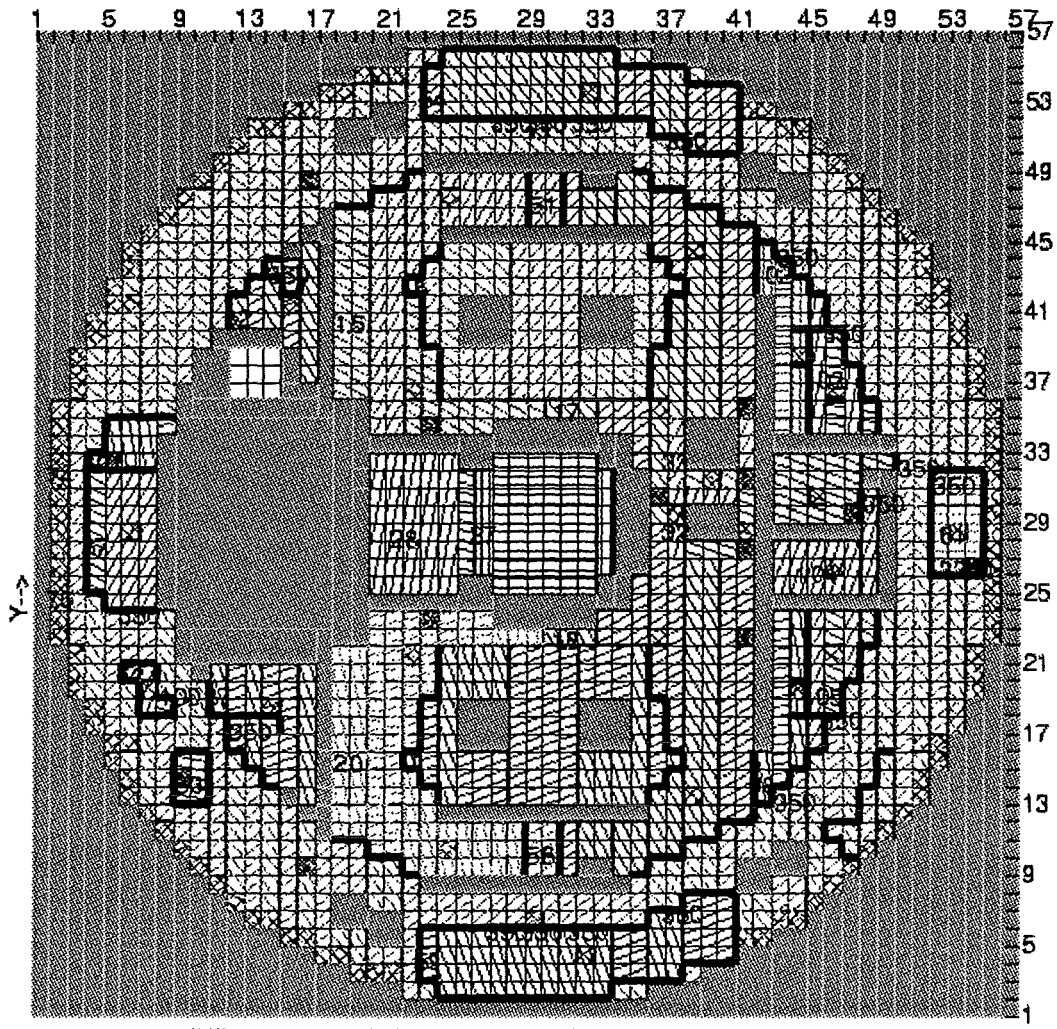
Z-INDEX 14 TO 15 AT Z = 12.701 M X-->



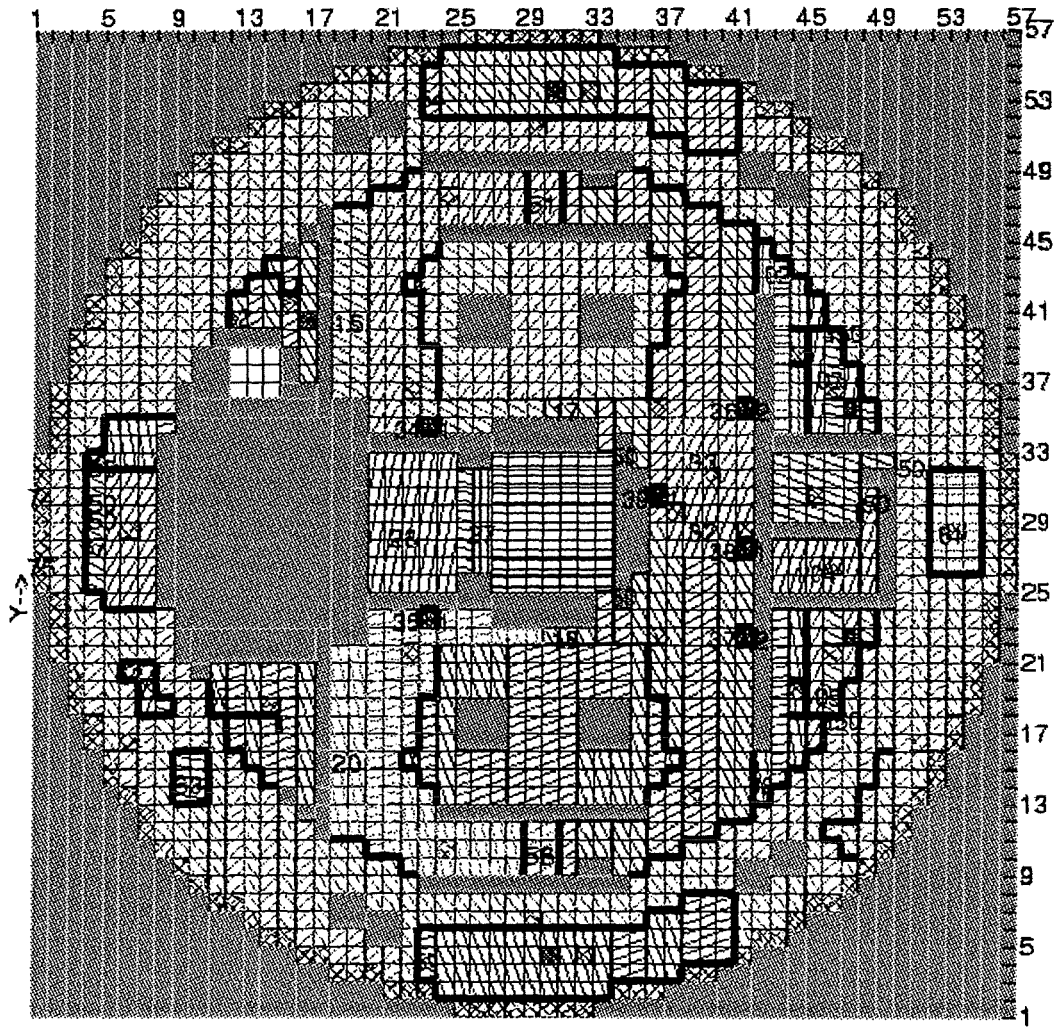
Z-INDEX 15 TO 16 AT Z = 14.368 M X-->



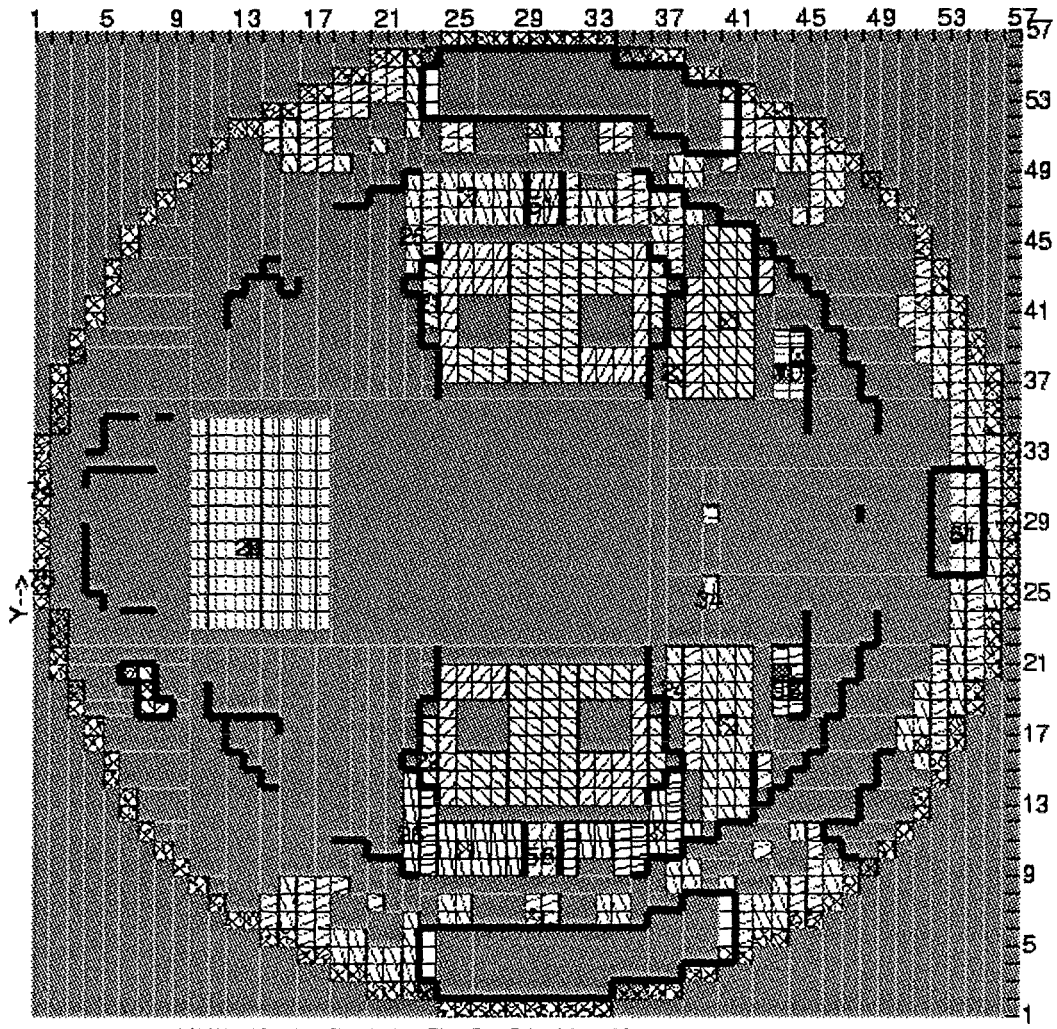
Z-INDEX 16 TO 17 AT Z = 15.594 M X-->



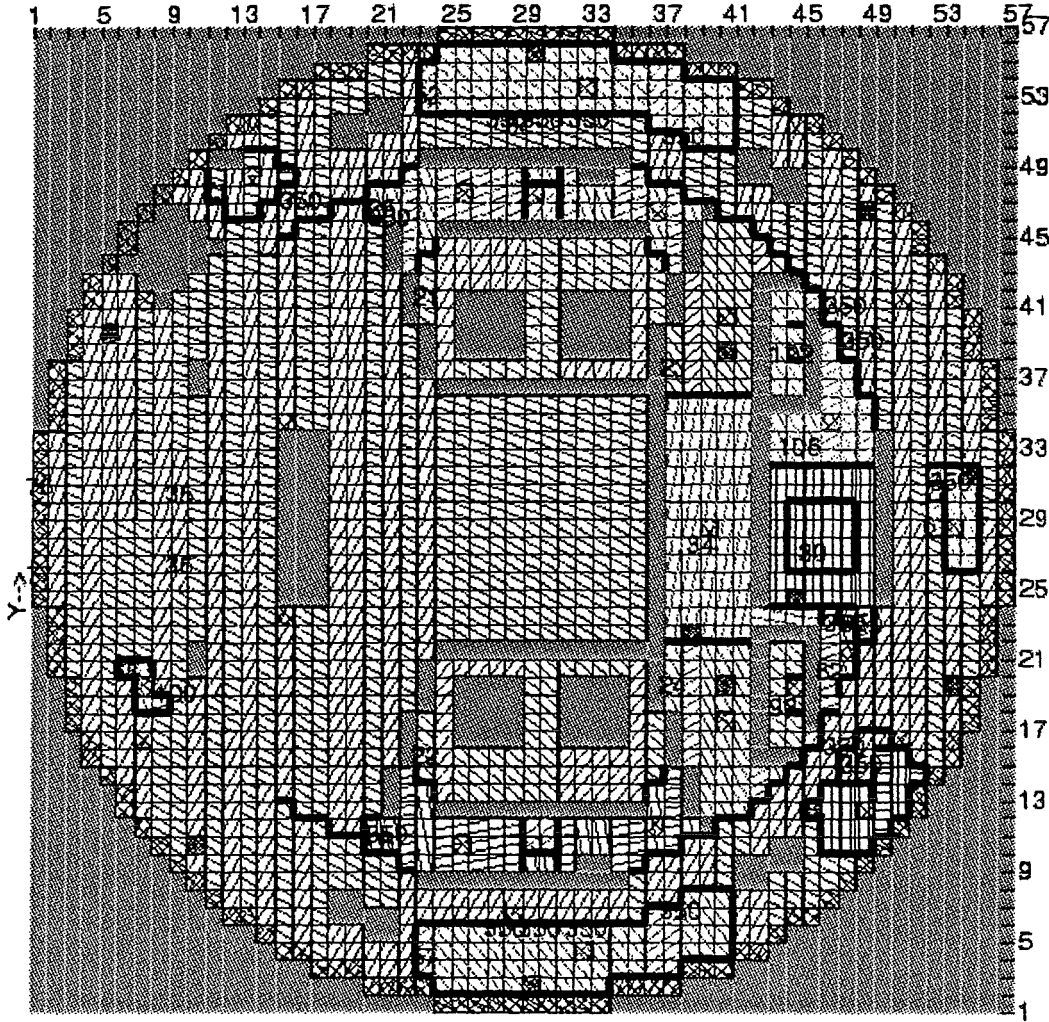
Z-INDEX 17 TO 18 AT Z = 16.967 M X-->



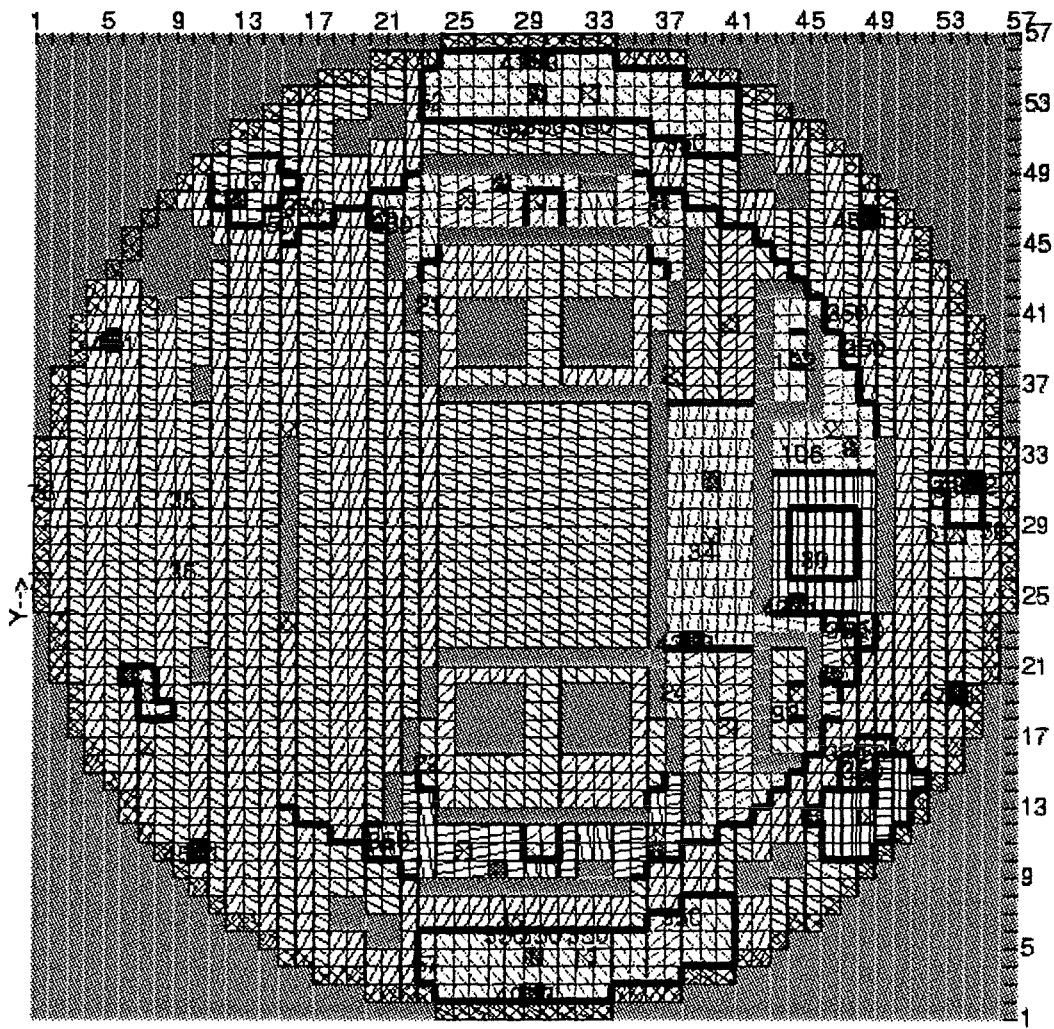
Z-INDEX 18 TO 19 AT Z = 18.879 M X-->



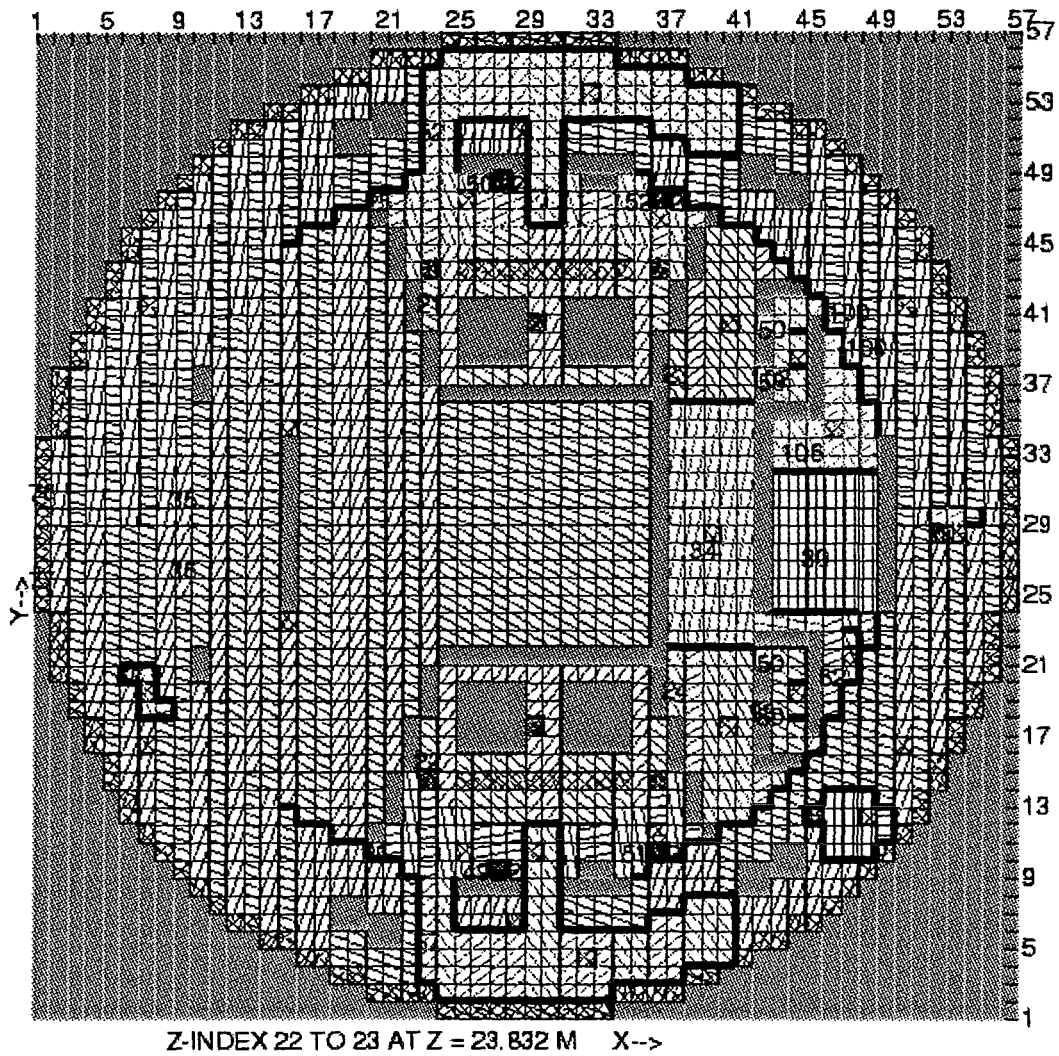
Z-INDEX 19 TO 20 AT Z = 20.301 M X-->

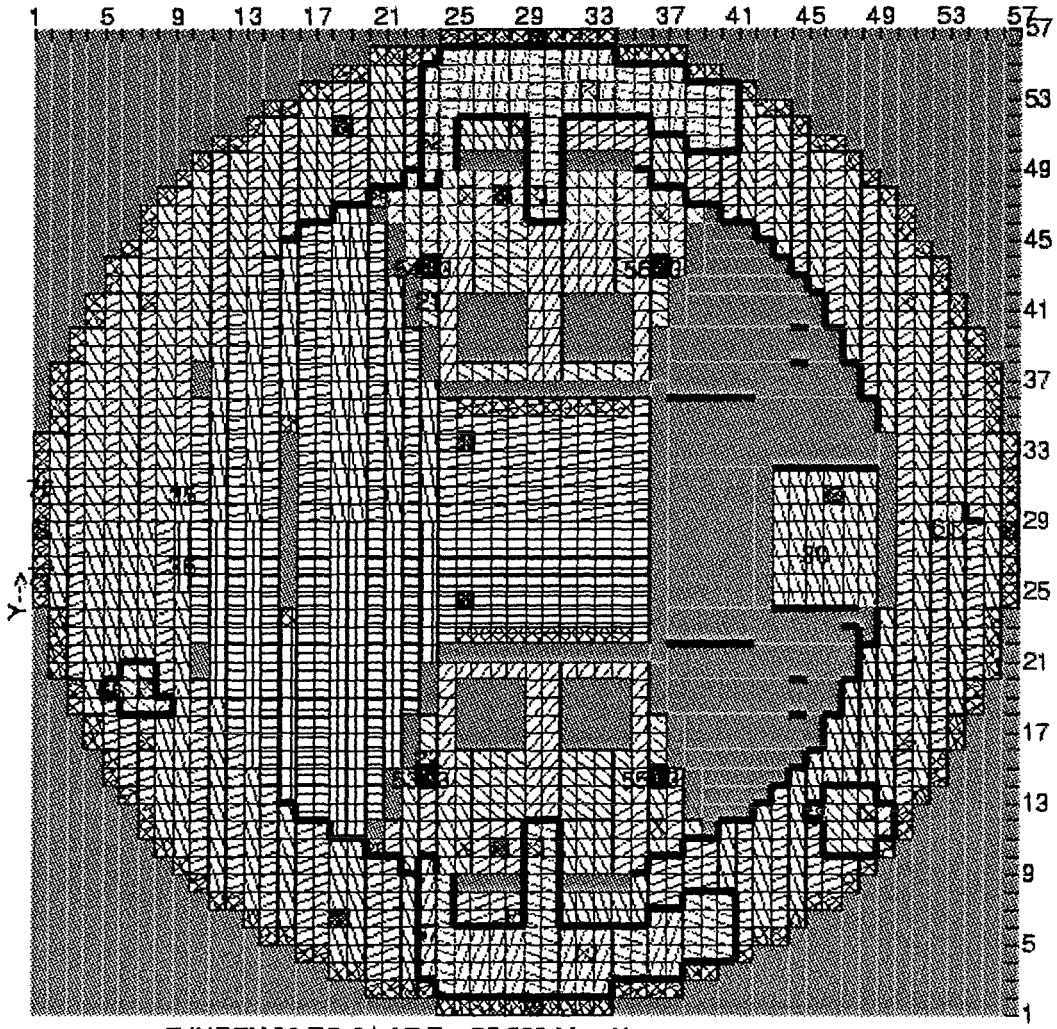


Z-INDEX 20 TO 21 AT Z = 21.429 M X-->

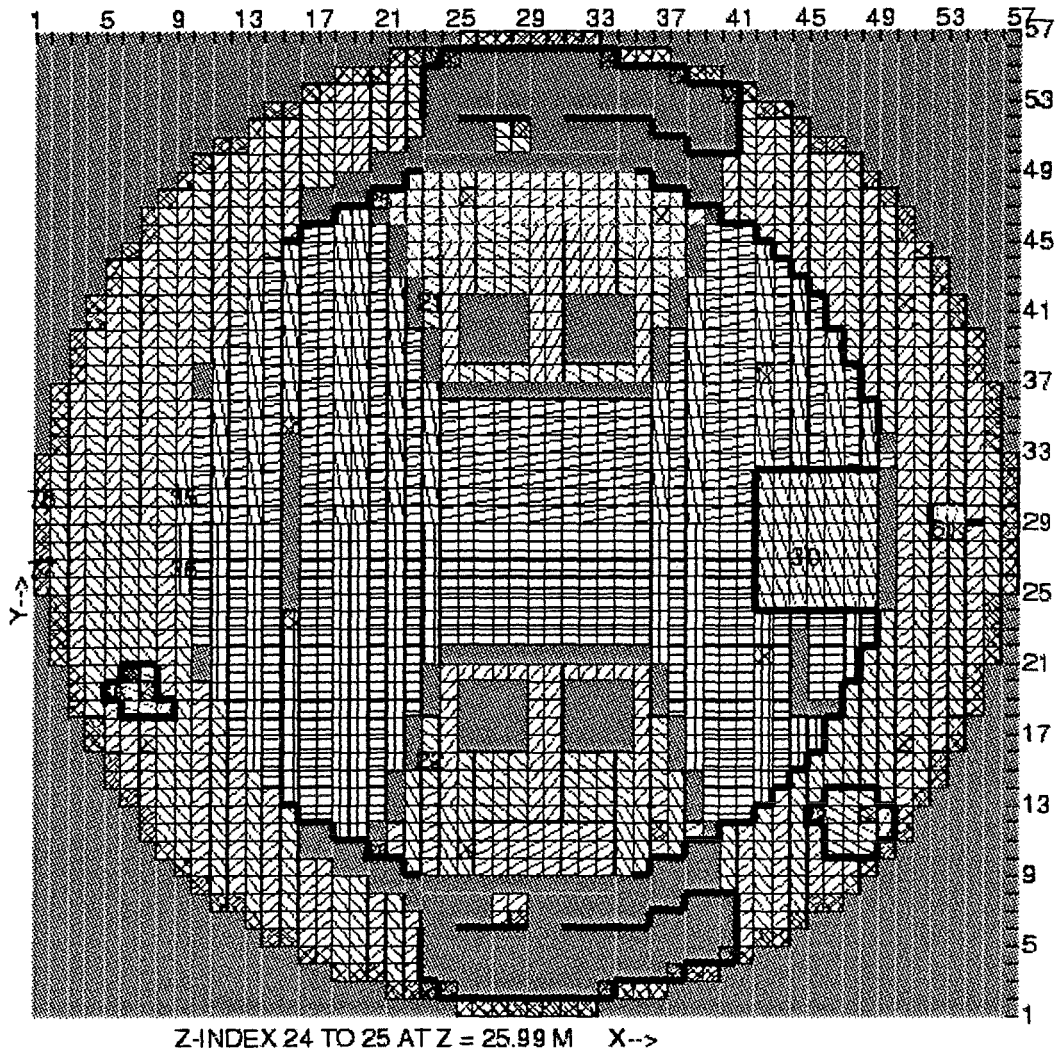


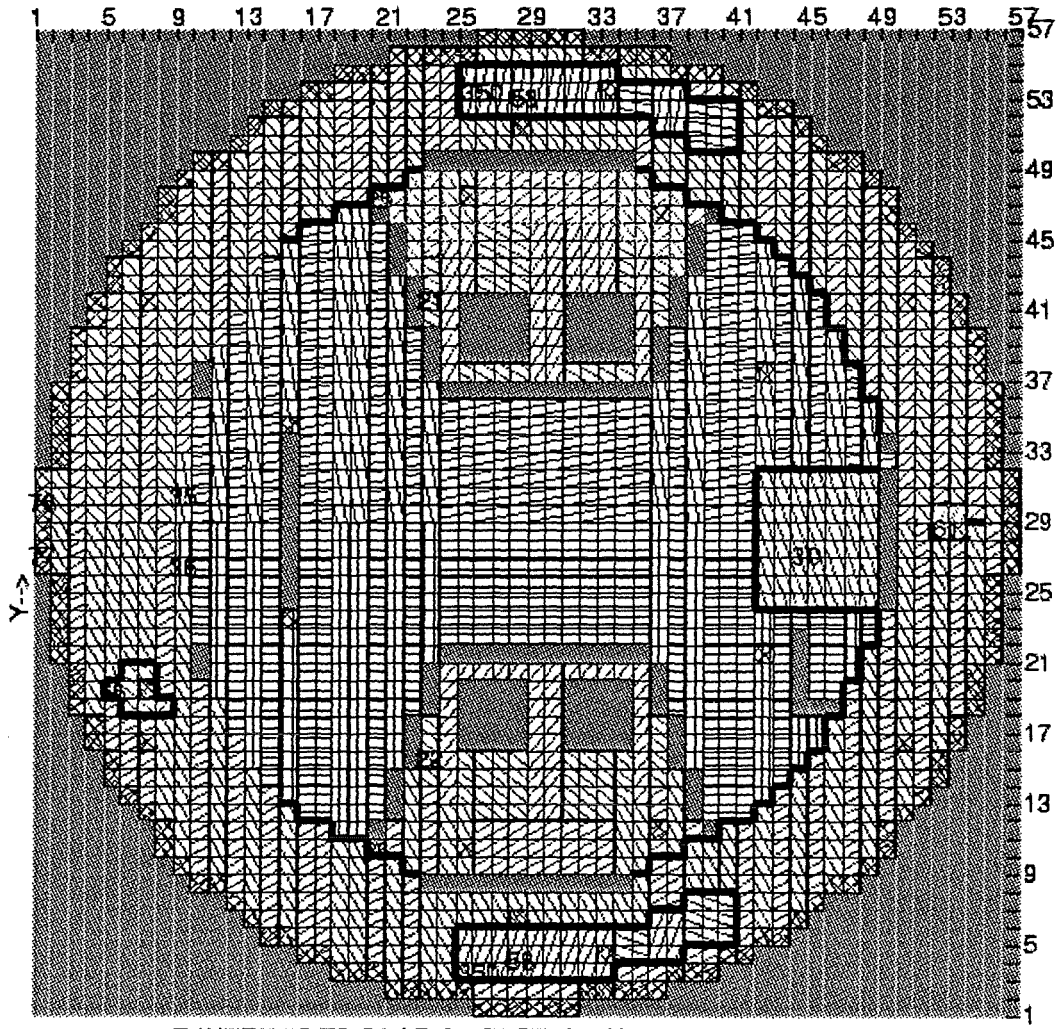
Z-INDEX 21 TO 22 AT Z = 22.808 M X-->



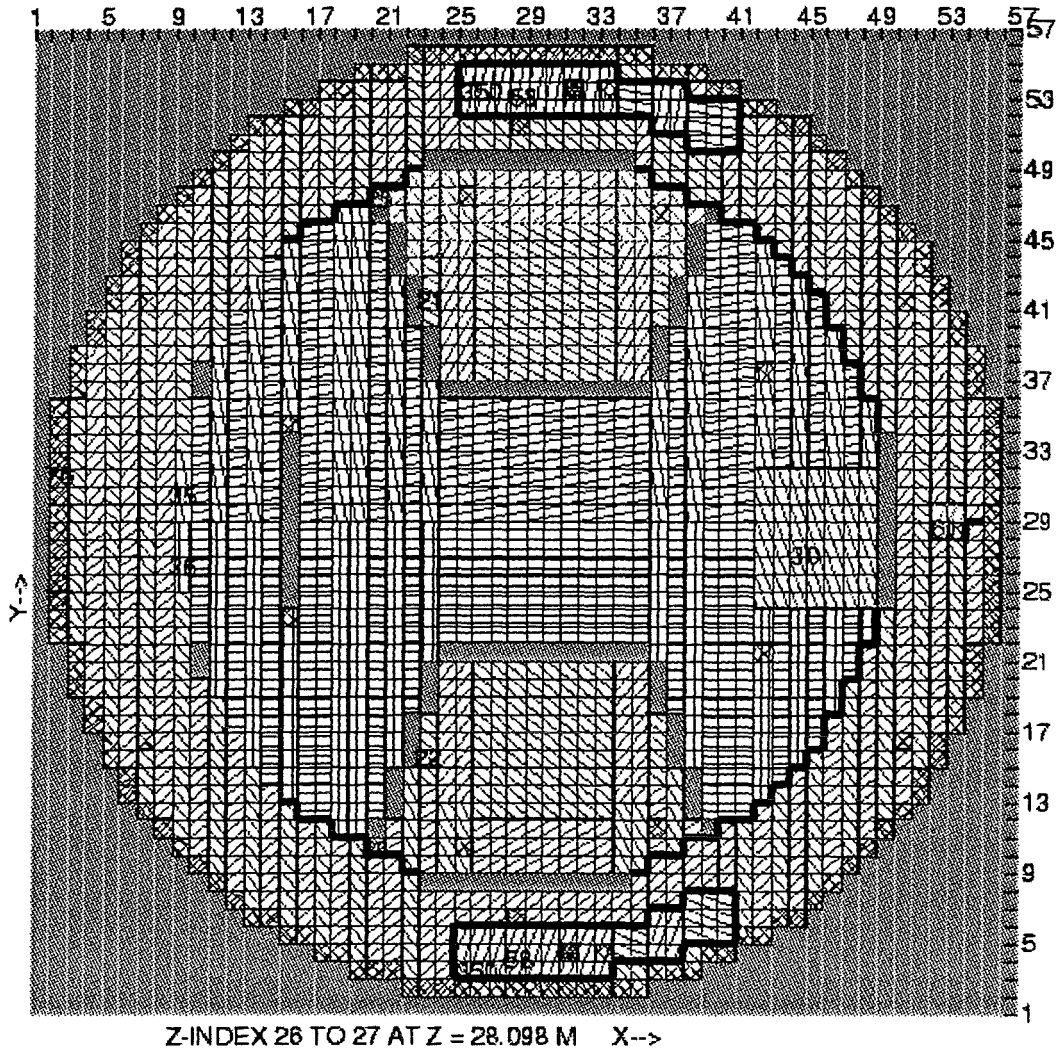


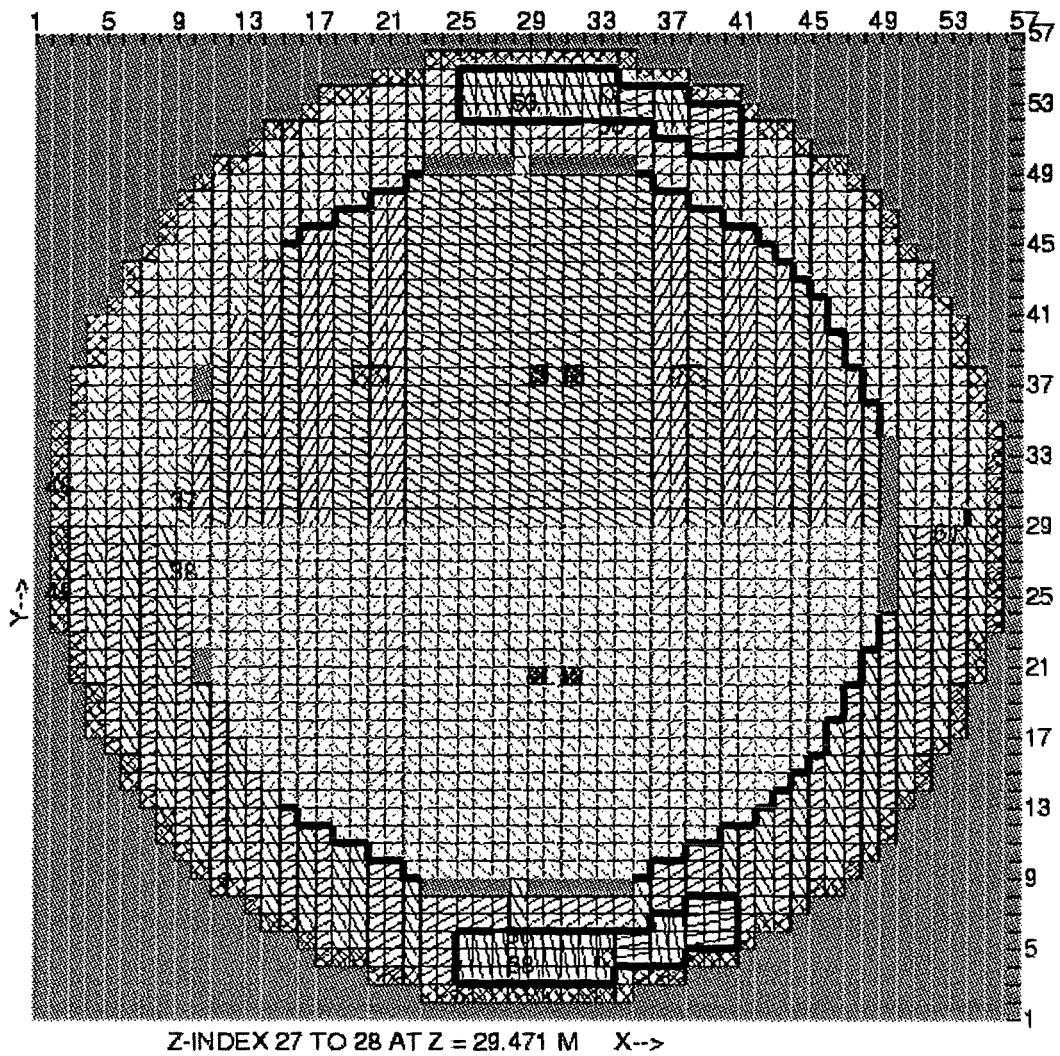
Z-INDEX 23 TO 24 AT Z = 25.009 M X-->

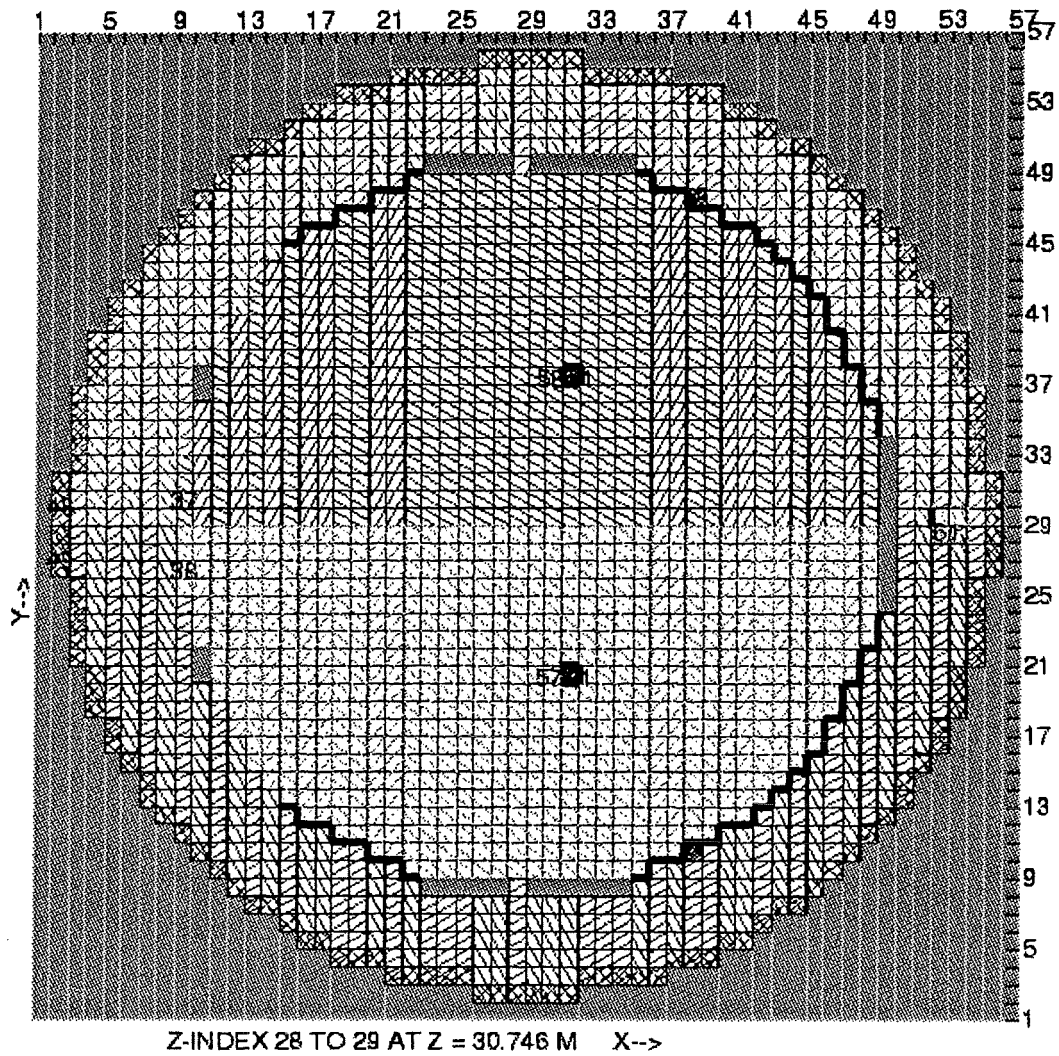


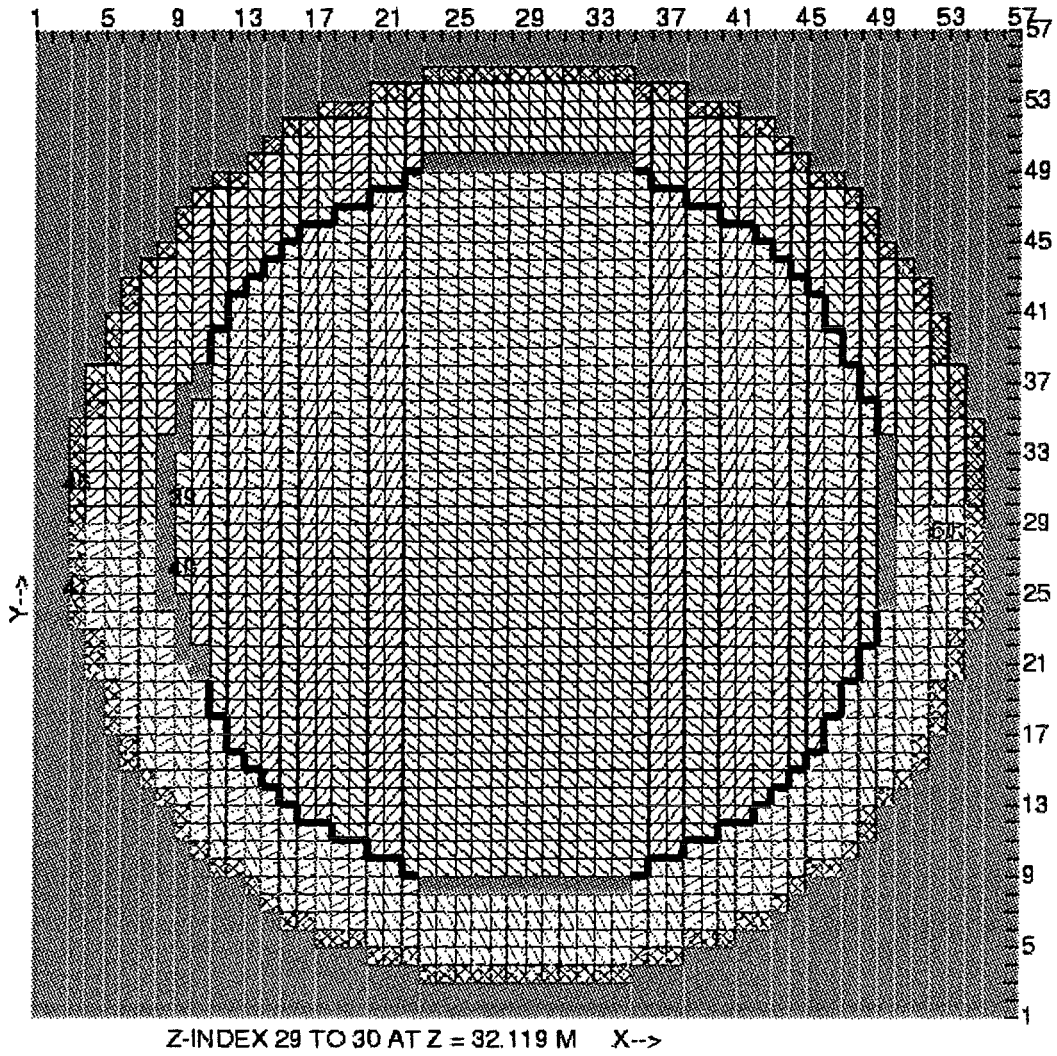


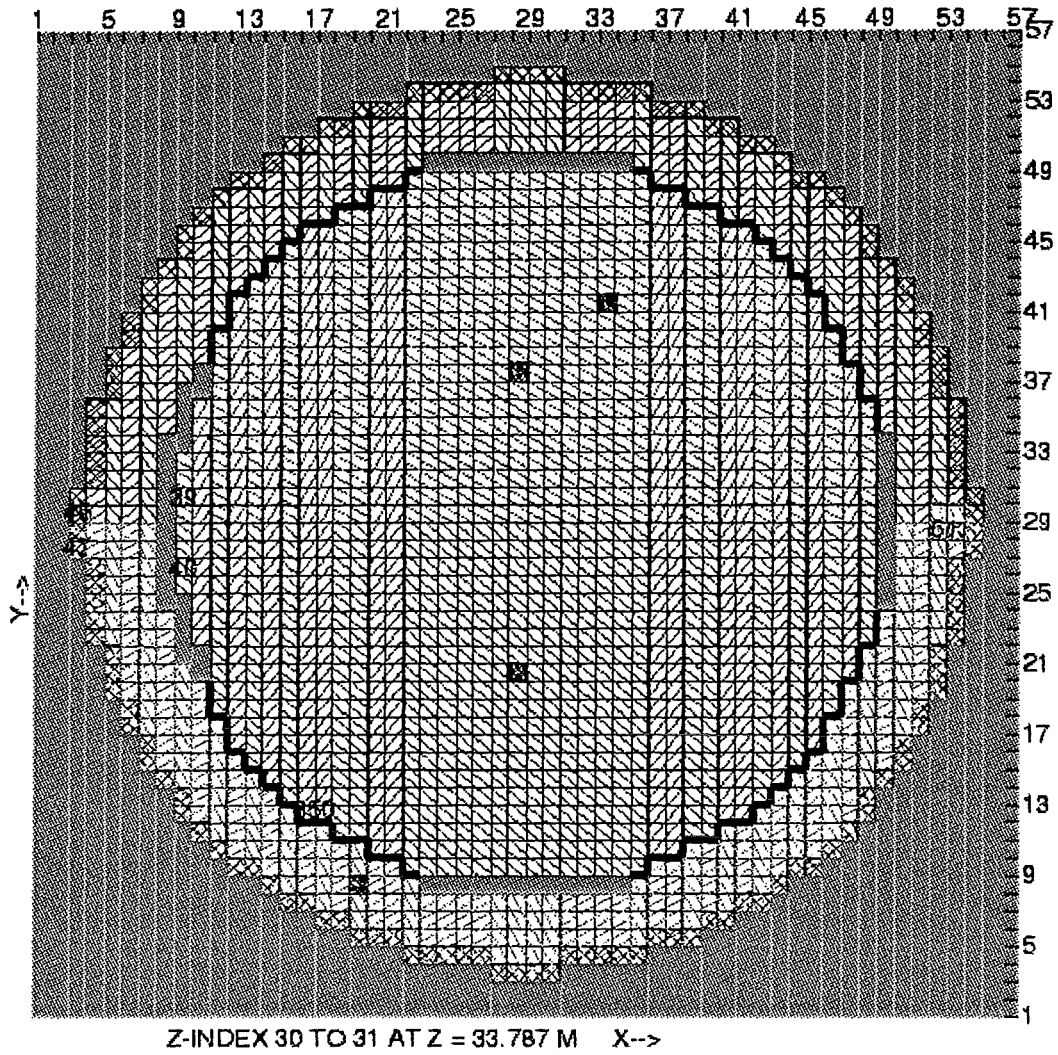
Z-INDEX 25 TO 26 AT Z = 26.97 M X-->

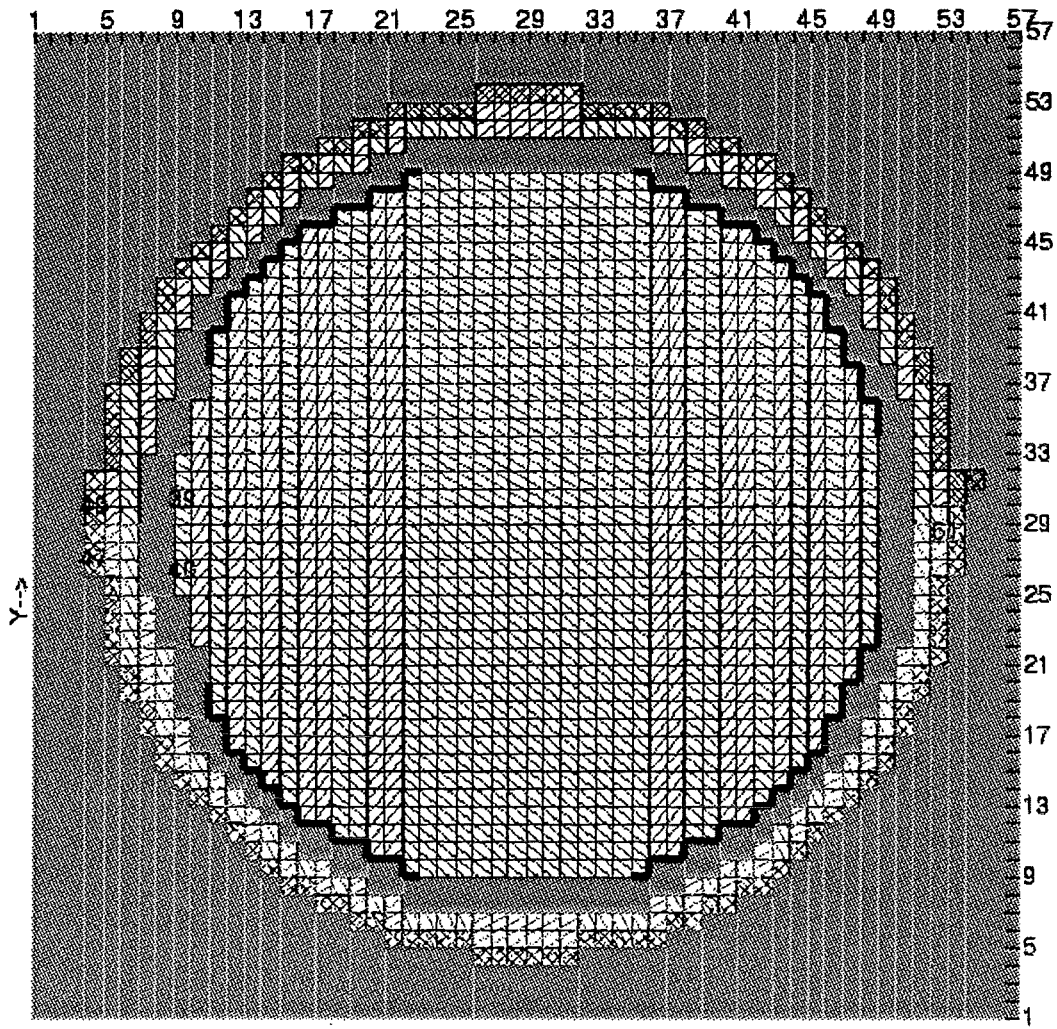




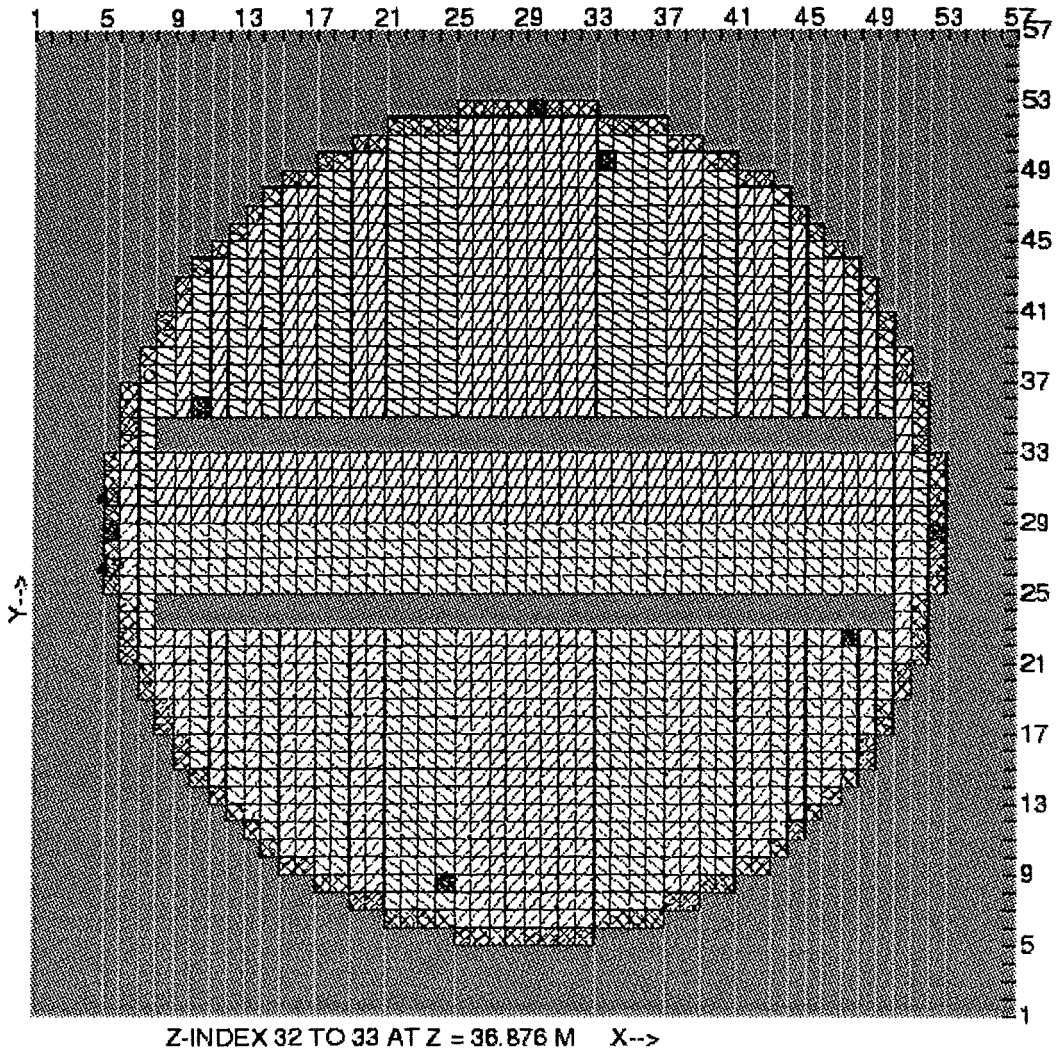


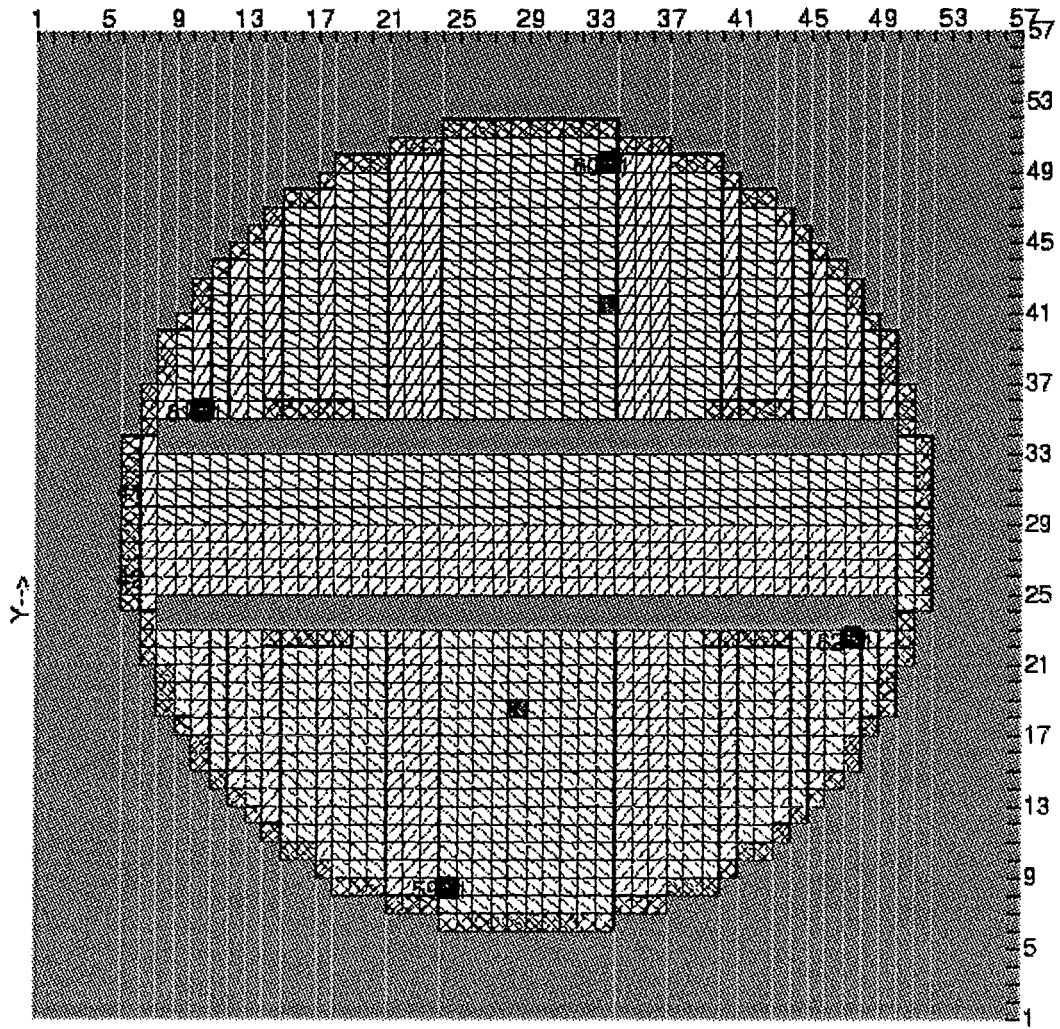




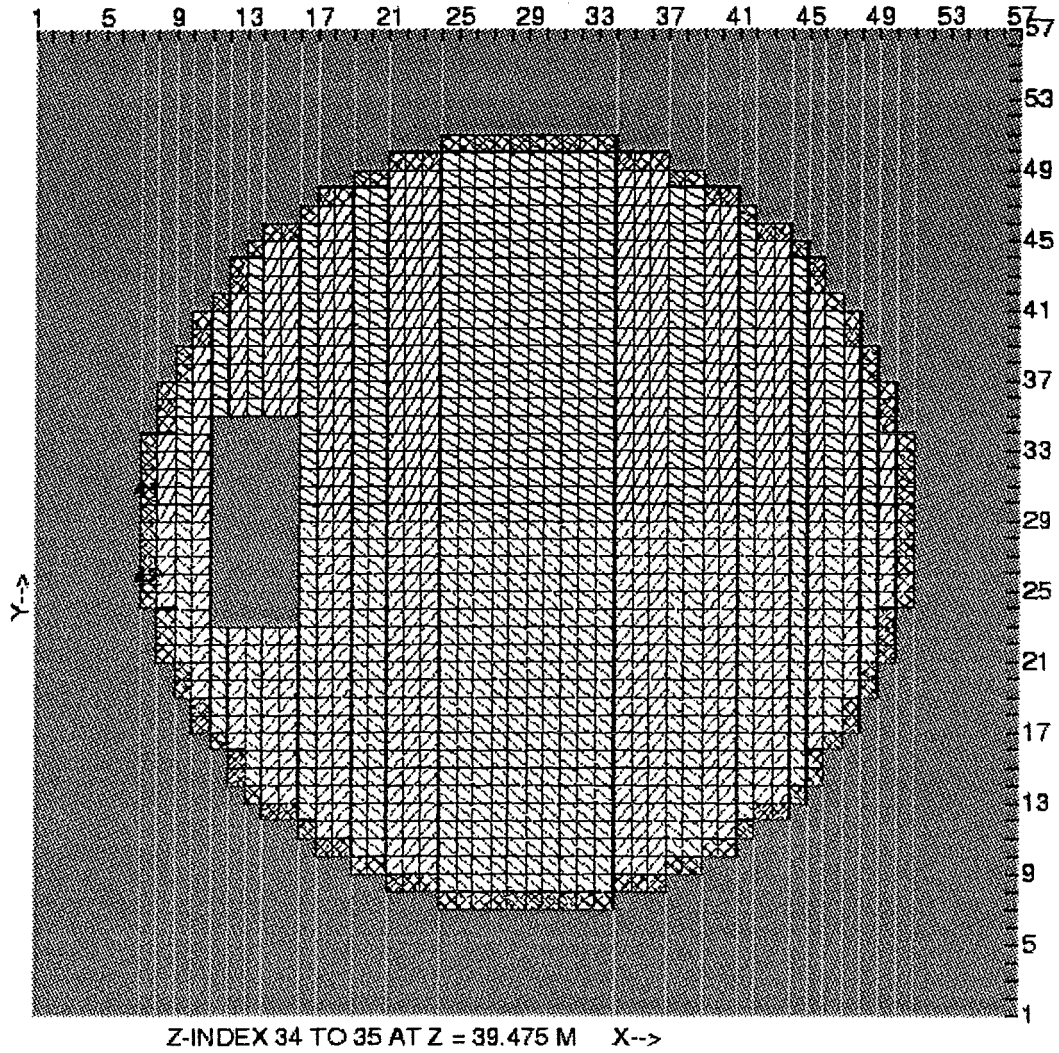


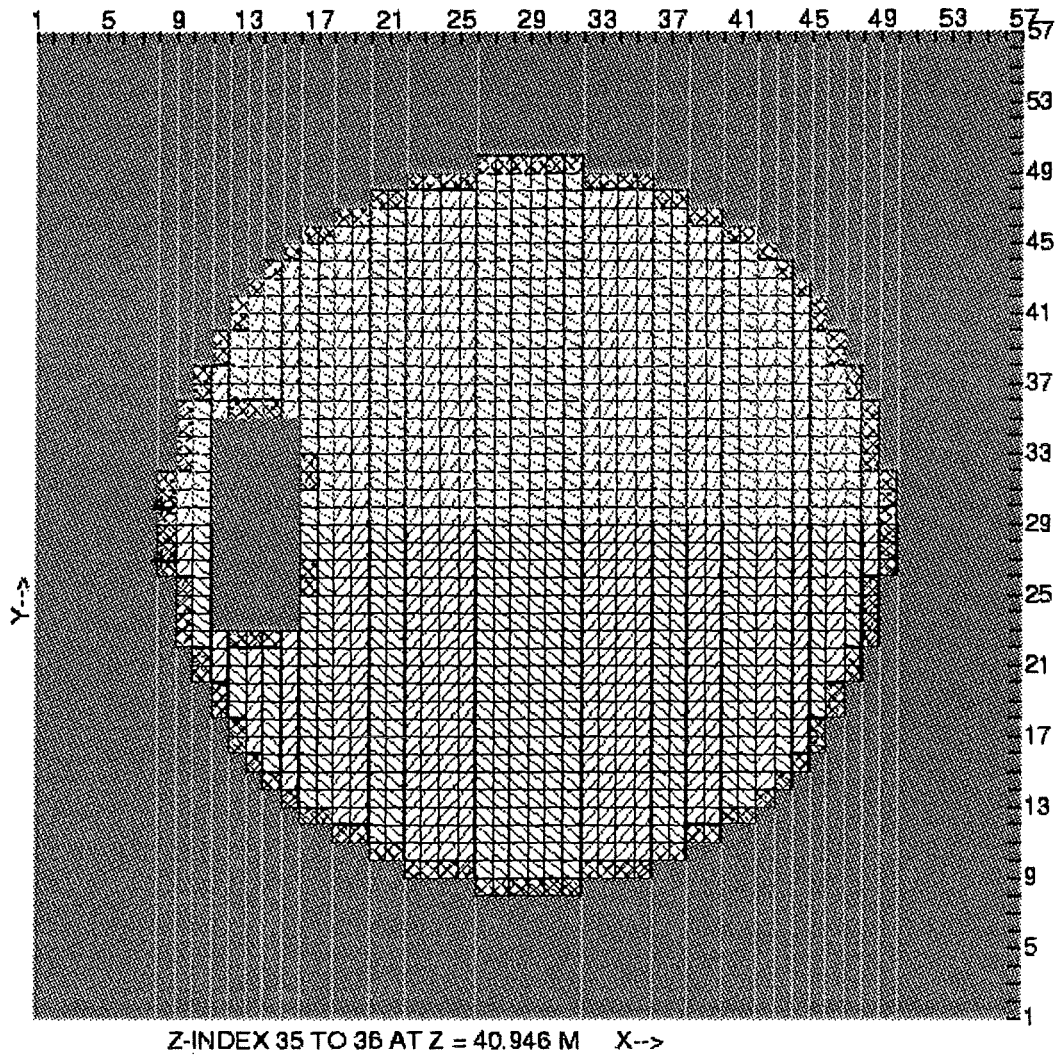
Z-INDEX 31 TO 32 AT Z = 35.454 M X-->

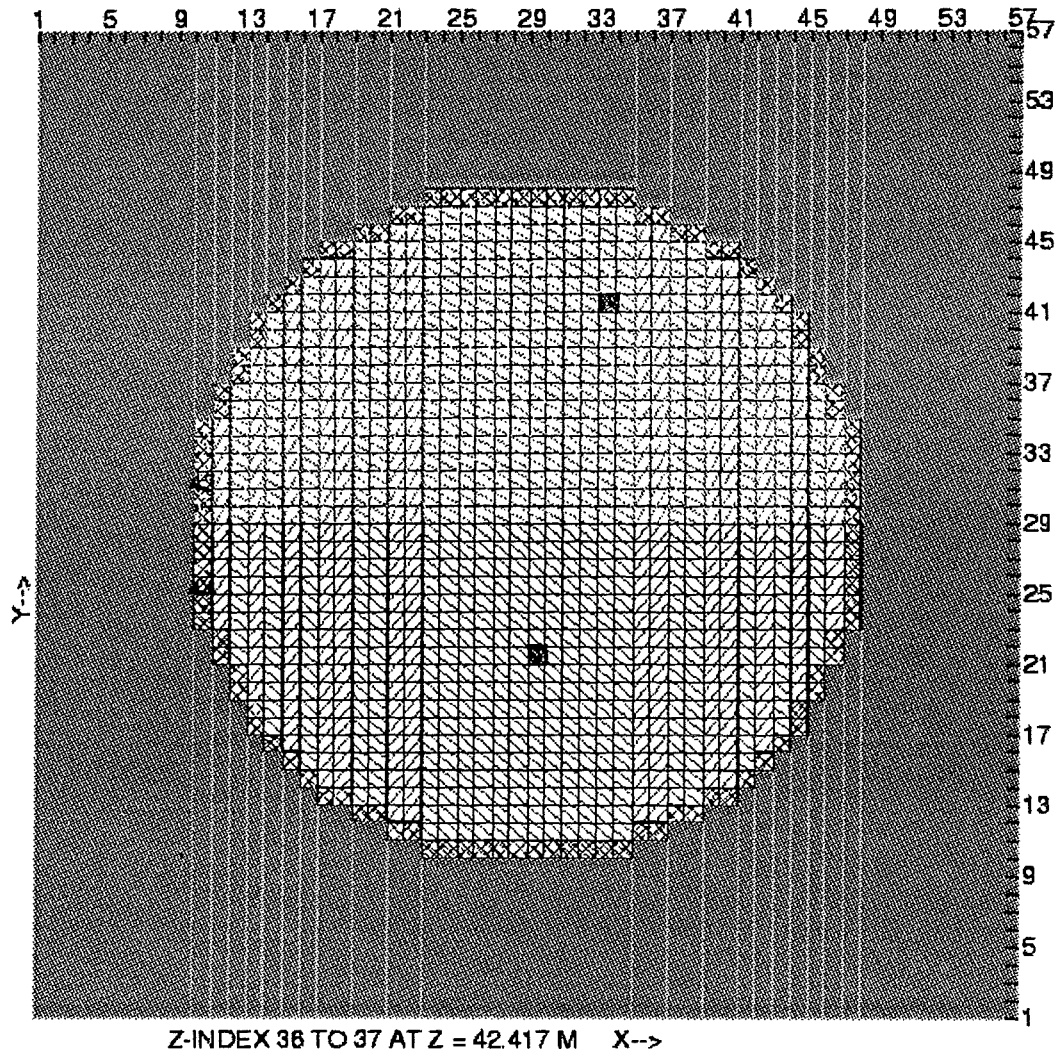


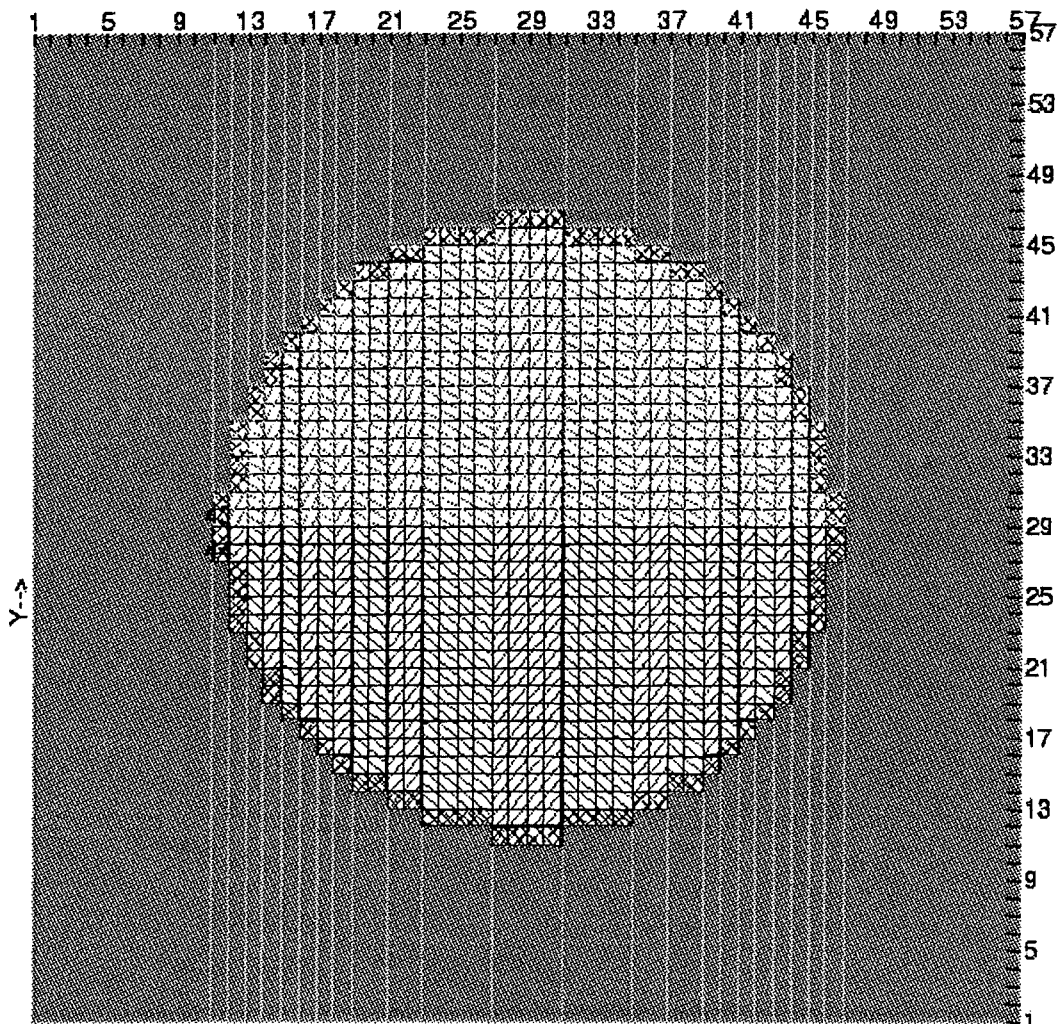


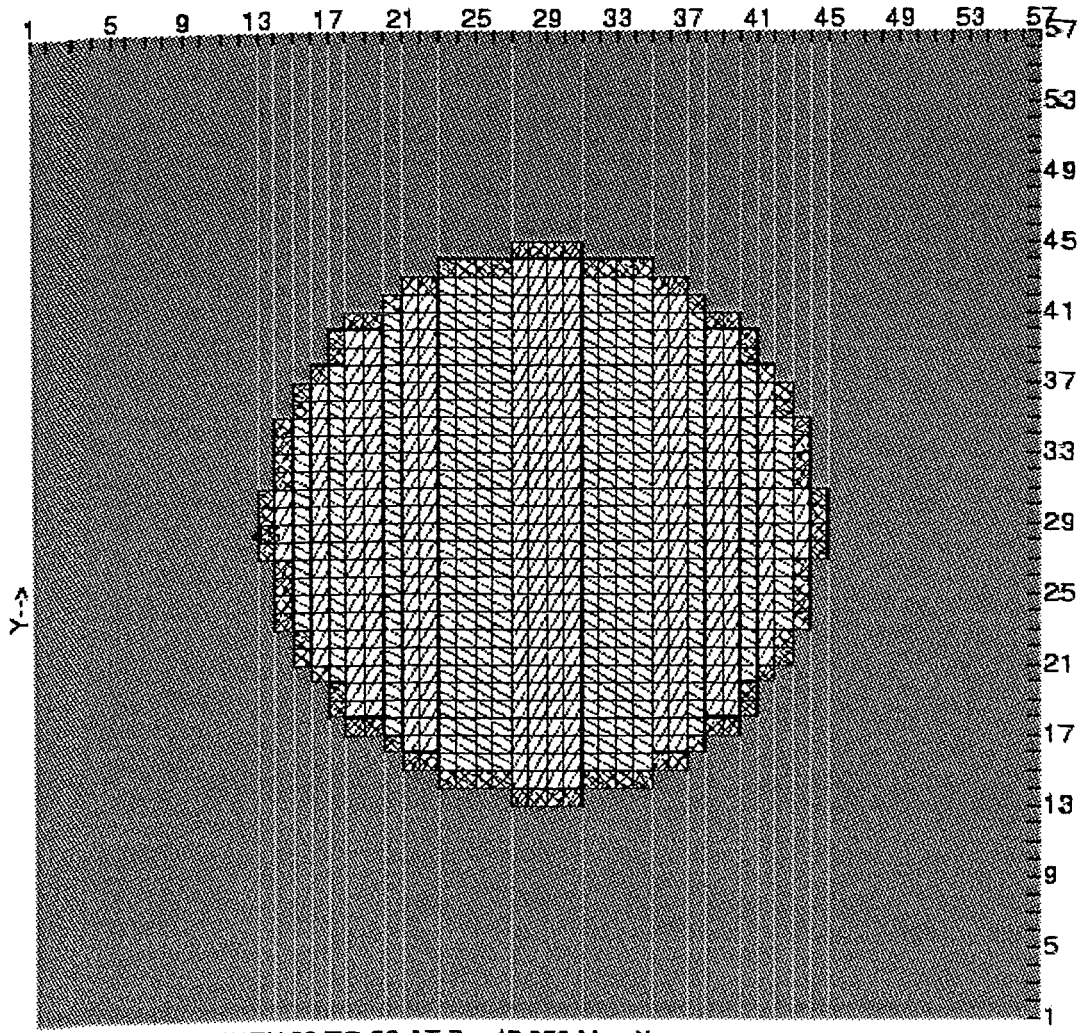
Z-INDEX 33 TO 34 AT Z = 38.102 M X-->



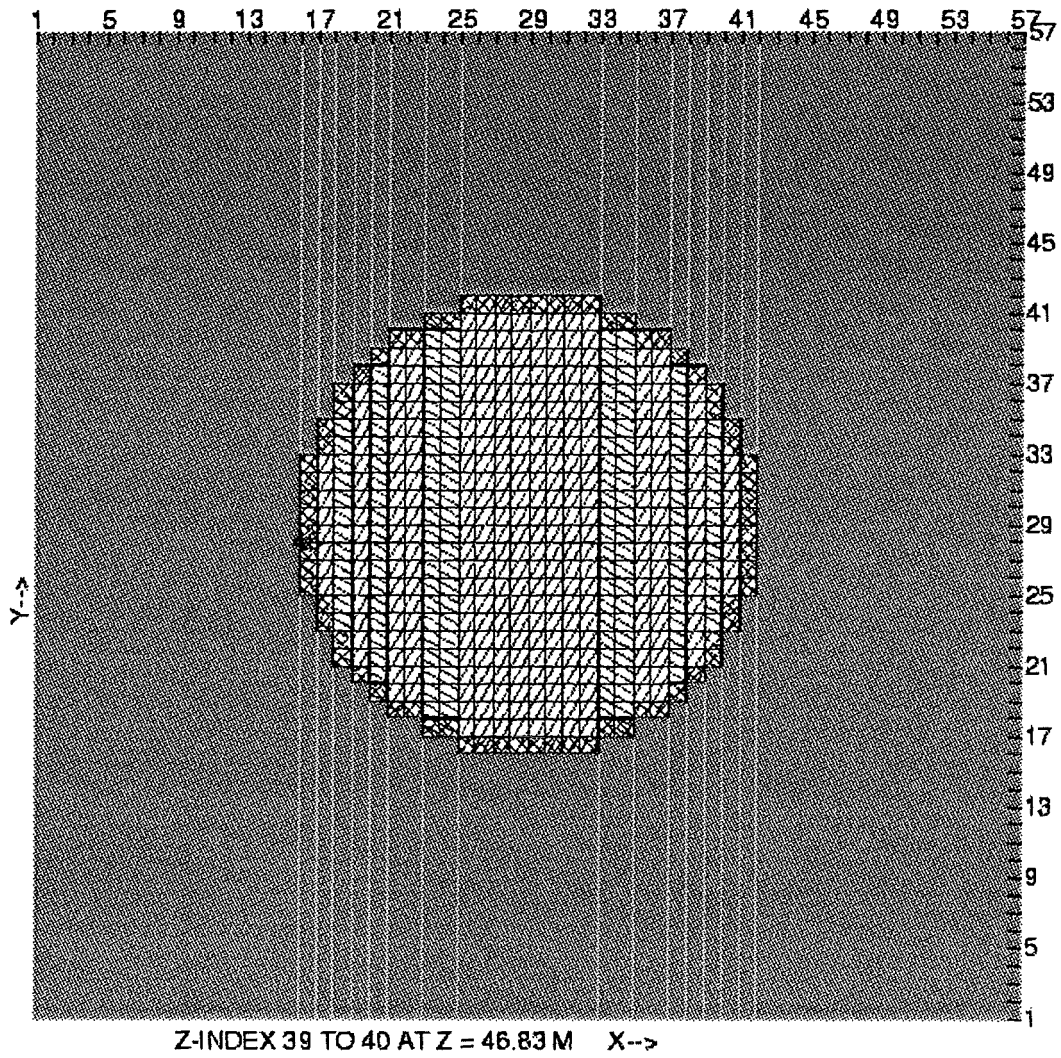


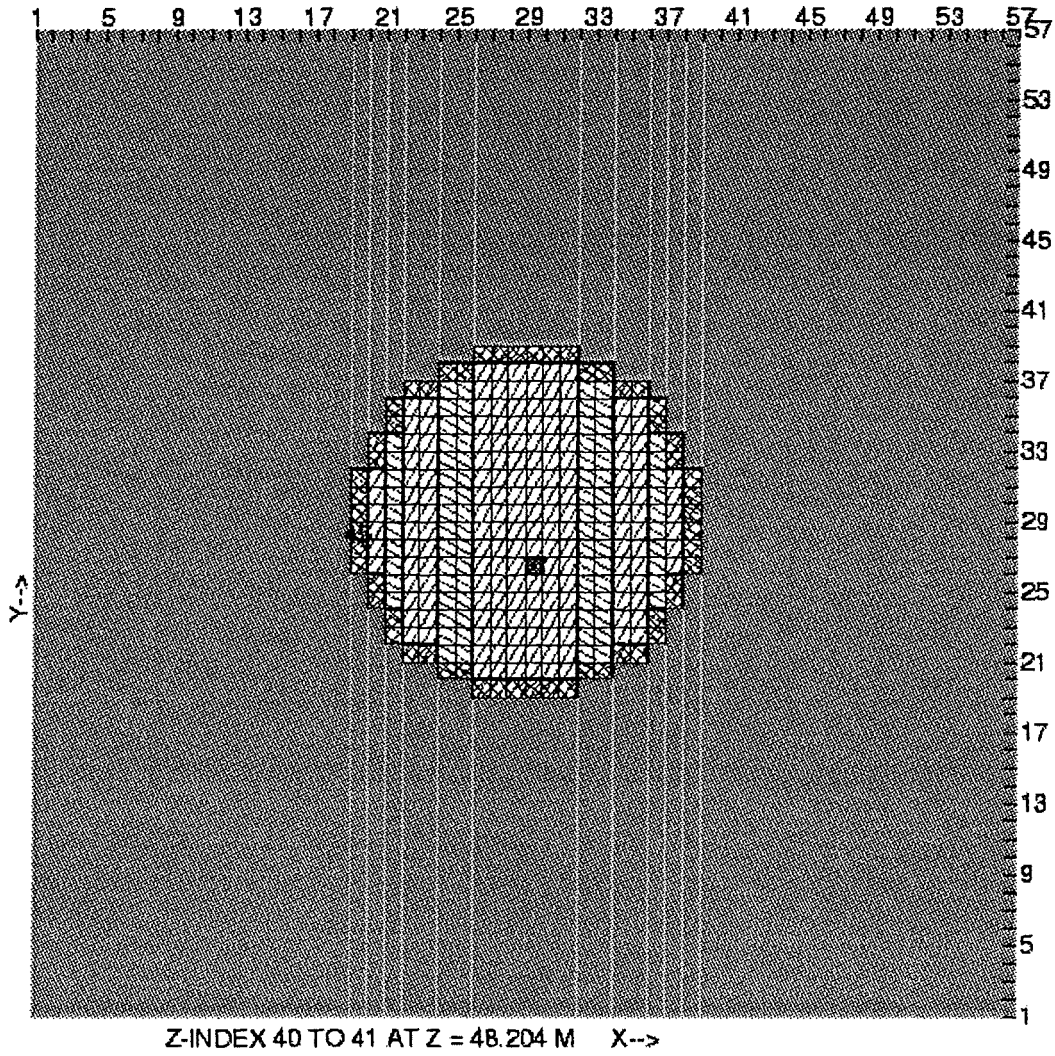






Z-INDEX 38 TO 39 AT Z = 45.359 M X-->





4.2 Darstellung der RALOC-Räume

Dieses Kapitel zeigt, wie innerhalb der GASFLOW Eingabedaten die RALOC- Räume identifiziert wurden, die für die Analysen der Gesellschaft für Reaktorsicherheit benutzt wurden. Diese sehr aufwendigen Arbeiten waren erforderlich, damit

- eine direkte Vergleichbarkeit der Ergebnisse gewährleistet ist, und damit
- die Strukturdaten verwendet werden können die die GRS für die einzelnen Räume zusammengestellt hat.

Die farbliche Kodierung zusätzlich zu der weiter vorne gegebenen Kodierung ist folgendermaßen:

Farbe

Farbige Schraffur 45°

Modellierung

- RALOC-Räume nummeriert entsprechend der GRS-Angaben

Zur Abbildung der 106 RALOC-Räume auf das GASFLOW- Rechengitter mußte jede der ca. 125000 GASFLOW-Zellen einem bestimmten RALOC-Raum zugeordnet werden. Da dies eine extrem langwierige und fehleranfällige Aufgabe ist, wurde ein spezieller grafischer Preprozessor geschrieben [1] , der diese Zuordnung am Bildschirm mit Mausbefehl erlaubt. Damit wurde jeder der 50 horizontalen Schnitte so bearbeitet, daß eine eindeutige Beziehung zwischen jeder GASFLOW-Zelle und dem zugehörigem RALOC-Raum besteht (Abb.4.17).

Die Nummerierung der Räume steht in der sich am weitesten links befindlichen GASFLOW Zelle (vgl. Abb. 4.17).

Zusätzlich sind in diesem Bild entlang der Kugelschale Schraffuren zu erkennen, die anzeigen, in welchen Zellen die Modellierung des Wärmeüberganges der Stahlschale durchgeführt wurde. Das Abklingbecken ist frei und keinem Raum zugeordnet.

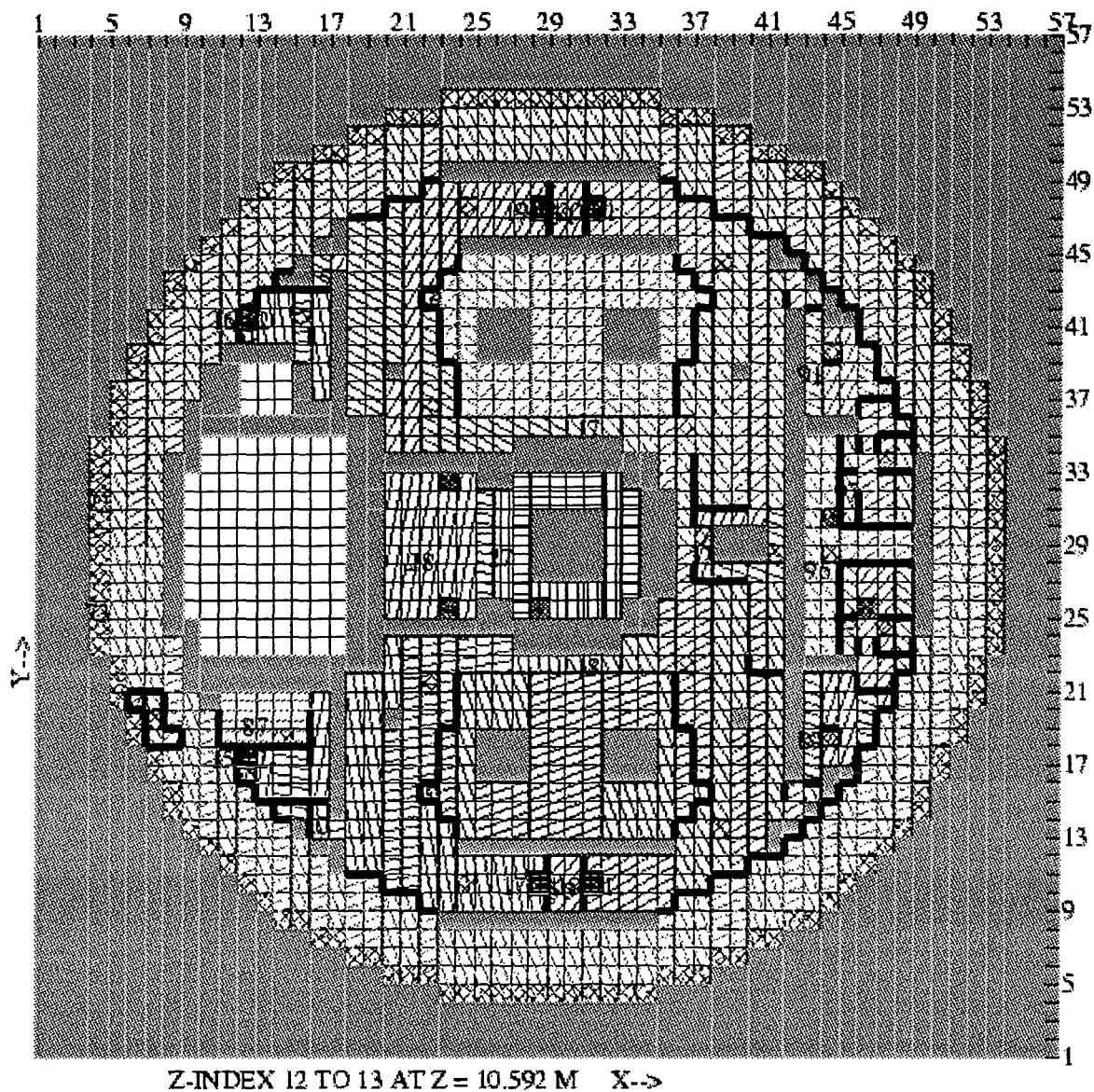


Abb. 4.17: Beispiel eines Schnittes in Horizontalebene mit den zugehörigen RALOC-Raumdefinitionen

Literatur

- [1] H. Rochholz, "Speakeasy-tool as a grafic preprocessor for GASFLOW", FZK Interner Bericht (Mai 1997)

4.3 Modellierung der Rekombinatoren und Berstfolien

In den ersten GASFLOW-Analysen wurden folgende Rekombinatoren simuliert:

Z-Index	Nr.	Anzahl	Größe	Raumbezeichnung
9.5	Nonu	4	2	Ringraum
10.5	1-4	je 1	1	Unterer DE-Raum
10.5	5-8	je 1	1	Armaturenraum
11.5	40	je 1	2	unterer/mittlerer Treppenraum
11.5	41	je 1	2	unterer/mittlerer Treppenraum
12.5	36	je 1	2	unterer/mittlerer Treppenraum L10
12.5	38	je 1	2	unterer/mittlerer Treppenraum L40
12.5	9,11,12,14	je 1	1	Pumpe u. Flur L10-40
13.5	21	1	1	Reakraum
13.5	22	2	2	Abstellbecken
14.5	42	1	2	Oberer Treppenraum Loop 20
14.5	43	1	2	Oberer Treppenraum Loop 30
14.5	24	1	2	DHmitte
15.5	37	1	2	Oberer Treppenraum Loop 10
15.5	39	1	2	Oberer Treppenraum Loop 40
15.5	10	2	3	Mittlerer DE-Raum L10/20
15.5	13	2	3	Mittlerer DE-Raum L30/40
17.5	44/1	1(#2)	2	Treppenhaus
18.5	46	1	1	Raum neben HKMP 10
18.5	47	1	1	Raum neben HKMP 40
18.5	17	1	2	über HKMP 20
18.5	18	1(#1)	2	über HKMP 30
18.5	18	1(#2)	1	über HKMP 30 nördlich von 18/1
18.5	25	1	2	Dhkopf
21.5	23	1	1	Druckabstellplatz
21.5	26	1	1	DH-Armaraum (Nur 1 eingebaut)

21.5	27	2	1	Beckenflur L 10/40
21.5	28	2	1	Beckenflur L 20/30
21.5	33	1	3	Lüftungsraum
21.5	35	1	3	Lüftungsraum
21.5	44/2	1(#2)	2	Treppenhaus
22.5	19	2	2	Hinter DE L 10/20
22.5	20	2	2	Hinter DE L 30/40
23.5	15	2	3	Oberer DE-Raum L 10/20
23.5	16	2	3	Oberer DE-Raum L 30/40
28.5	29	1	1	Überströmdecke
28.5	30	1	1	Überströmdecke
33.5	31	1	1	Krahnbahn

Diese Liste der Rekombinatoren entspricht der GRS-Liste vom 28.08.1996 (Gehrig-schp). Entsprechend dieser Liste sind sie auch in den Bildern numeriert dargestellt (Nummer links des Rekombinators). Die Größenkennung befindet sich rechts davon. Die Bezeichnung „Z-Index“ bezieht sich auf einen Mittelschnitt durch ein Volumen in vertikaler Richtung. Es kann vorkommen, daß Rekombinatoren einen Index höher platziert werden mußten, da sie von unten durchströmt werden und so unter ihnen eine freie Zelle vorhanden sein muß.

Die Berstfolien befinden sich in der 29m-Ebene und sind in Abbildung 4.6 blau dargestellt. Die meisten dieser Berstfolien haben eine Größe von 2 m². Im geschlossenen Zustand verhalten sie sich wie eine infinitesimal dünne Wand, im geöffneten Zustand ist eine Durchströmung möglich. Nach dem Bersten, wird angenommen, daß die Fläche sich zu 70% öffnet, die zwei Reihen mit der betragsmäßig kleinsten y-Koordinate öffnen sich nur zu 35%, da hier relativ viele Träger vorhanden sind. Der Öffnungsdruck der Berstfolien wurde in 4 Klassen gestaffelt, d.h. es wurden von den 8 Klassen, die die GRS verwendete, jeweils 2 zusammengefaßt. Die vier verwendeten Berstdrücke sind 24 mbar, 32 mbar, 40 mbar und 48 mbar. Die Fläche für jede Klasse wurden nach den Angaben der GRS festgesetzt. Die Berst-

folienversagensdrücke wurden statistisch über die Berstfolienfläche verteilt, jedoch wurde eine zur x-Achse symmetrische Verteilung angenommen.

Literatur

- [1] Royl, P.; Travis, J.R.; Rochholz, H.; Wilkening, H.: *Verteilung von Dampf und Wasserstoff bei Unfällen in Druckwasserreaktoren*, FZK Nachrichten Jahrgang 29, 4/97, 1997.
- [2] Gehrig; Tiltmann, Position der Rekombinatoren Interne Information, 1996.
- [3] Tiltmann, Positionen der Berstfolien, Interne Information, 1996.
- [4] Kraus, T.; *Sensitivity Study of a small Break Loca and a Feedwater Accident in a PWR of Konvoi type with Melcor 1.8.3*, Interner Bericht, 32.21.07, FZK, 1997.
- [5] Tiltman.M, "RALOC -Mod4-Untersuchungen für die KONVOI-Kernkraftwerksanlage Neckarwestheim 2 (GKN 2).; Dokumentation der Eingabedaten für die ND-Störfall-Sequenz Teil 1, Interner Bericht, 32.21.07, FZK, 1997.

4.4 Analyse zum Methodenvergleich

Die Raumdefinitionen der ersten RALOC-Rechnung (übergeben April 97) wurden mit einem speziell entwickelten interaktiven Preprozessor auf die GASFLOW-Nodalisierung übertragen, so daß für jeden der 106 RALOC-Räume die zugehörigen GASFLOW-Rechenzellen bekannt sind. Der Mittelwert einer Zustandsgröße in diesen GASFLOW-Zellen (z.B. die Wasserstoffkonzentration) ist dann direkt mit dem RALOC-Wert des entsprechenden Raumes vergleichbar.

Der Vergleich der so mit RALOC und GASFLOW berechneten mittleren Wasserstoffkonzentrationsverläufe hat folgende Ergebnisse gezeigt:

- die langfristigen Mittelwerte stimmen sehr gut überein, d.h. die integralen Bilanzen sind korrekt,
- merkliche Unterschiede bestehen bei den lokalen H_2 -Konzentrationen vor allem in den transienten Phasen der Wasserstofffreisetzung (2500 - 3500 s, 5800 - 6300s),
- während der transienten Phasen zeigen die mittleren H_2 -Konzentrationen in RALOC im Vergleich zu GASFLOW eine systematische Tendenz zu verringerten H_2 -Konzentrationen und verlangsamten Anstiegszeiten.

Zur Deutung dieser beobachteten Unterschiede in den H_2 -Konzentrationsverläufen von GASFLOW und RALOC wird im folgenden untersucht welchen Einfluß die instantane Vermischungsannahme in einer LP-Kontrollzone auf berechnete Konzentrationen haben kann. Diese Annahme bewirkt, daß jede Gasmenge die in eine Kontrollzone eintritt, schon im nächsten Zeitschritt über das gesamte Zonenvolumen verteilt ist.

Die nachfolgende Ableitung beruht teilweise auf der von A. Miassoedov gegebenen Analyse für die H_2 -Vermischung in CORA-Versuchen [1]. Abb.1 zeigt die untersuchte Kontrollzone, in die von links Wasserstoff eintritt und rechts austritt. Es wird angenommen, daß der eintretenden Wasserstoff

instantan im Kontrollvolumen verteilt wird, so daß innerhalb der Zone immer eine homogene Mischung mit der mittleren Konzentration \bar{C} vorliegt.

Gesucht ist der Massenstrom am Ausgang (q_{out}) als Funktion des Massenstroms am Eingang (q_{in}). Zur analytischen Beschreibung des Problems werden folgende Größen benutzt

q_{in} = H_2 -Massenstrom am Eingang, g/s

q_{out} = H_2 -Massenstrom am Ausgang, g/s

S = Eingangs- und Ausgangsquerschnitt, m^2

v = Gasgeschwindigkeit, m/s

C_{in}, \bar{C} = H_2 -Konzentration am Eingang und Ausgang, g/m^3

Q = H_2 -Gesamtmenge im Kontrollvolumen, g

V = Volumen der Kontrollzone, m^3

Die Massenströme am Eingang und Ausgang sind:

$$q_{in} = SvC_{in} \quad (1)$$

$$q_{out} = Sv\bar{C} \quad (2)$$

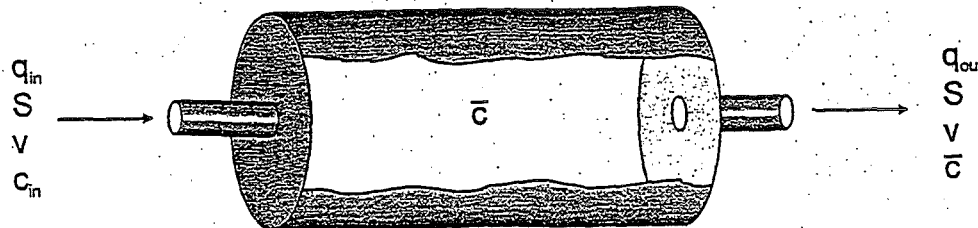


Abb.1 Kontrollzone mit H_2 -Massenstrom am Eingang (q_{in}), einer mittleren H_2 -Konzentration (\bar{C}) und H_2 -Massenstrom am Ausgang (q_{out}).

Die gesamte Wasserstoffmenge im Kontrollvolumen läßt sich ausdrücken als

$$Q = \bar{C}V = \frac{q_{out}}{S_v} \cdot V \quad (3)$$

Die Bilanzgleichung für Q lautet

$$\frac{dQ}{dt} = q_{in} - q_{out} \quad (4)$$

mit Gleichung (3) ergibt sich

$$\frac{V}{S_v} \cdot \frac{dq_{out}}{dt} = q_{in} - q_{out} \quad (5)$$

Definiert man V/S_v als charakteristische Zeitkonstante α des Systems

$$\alpha = \frac{V}{S_v} = \frac{\text{Kontrollvolumen}}{\text{Eintrittsstrom}} \quad (6)$$

erhält man folgende Differentialgleichung für den Massenstrom am Ausgang

$$\alpha \cdot \frac{dq_{out}}{dt} = q_{in} - q_{out} \quad (7)$$

Gleichung (7) hat folgende Lösung

$$q_{out}(t) = \frac{1}{\alpha} e^{-t/\alpha} \int_0^t q_{in}(\tau) e^{\tau/\alpha} d\tau \quad (8)$$

Demnach ergibt sich das Ausgangssignal durch eine zeitliche Mittlung des Eingangssignals, gewichtet mit dem zeitabhängigen Faktor $\exp(t/\alpha)$.

Als einfachstes Beispiel wird im folgenden ein Rechteckimpuls als Eingangssignal betrachtet bei dem der Massenstrom für die Dauer T den konstanten Wert $q_{in}=q_0$ hat:

$$q_{in}(t) = \begin{cases} q_0, & 0 \leq t \leq T \\ 0, & t > T \end{cases} \quad (9)$$

Jeder beliebige Eingangsstrom läßt sich durch eine lineare Kombination solcher Elementarpulse darstellen. Für den Eingangsstrom nach Gleichung (9) ergibt Gleichung (8) folgenden Ausgangsstrom:

$$q_{out}(t) = \begin{cases} q_0(1 - e^{-t/\alpha}), & 0 \leq t \leq T \\ q_0(1 - e^{-T/\alpha})e^{-t/\alpha}, & t > T \end{cases}$$

(10)

Abb. 2 zeigt Beispiele für einen Doppeleingangspuls, d.h. für eine zweifache Anwendung von Gl.(9) und (10). Die dargestellten Kurven treffen z.B. auf folgende Situationen zu:

Masseneingangsstrom: $q_0 = 100 \text{ gH}_2/\text{s}$

Volumenstrom: $Sv = 50 \text{ Mol H}_2/\text{s} = 1.12 \text{ Nm}^3\text{H}_2/\text{s}$

v (m/s)	S (m ²)	V (m ³)	α (s)	Abb. 3
1	1.12	280.0	250	a)
1	1.12	112.0	100	b)
1	1.12	11.2	10	c)

Abb. 2 demonstriert das allgemeine Verhalten der Lösung in Gl. (8) und zeigt den wichtigen Einfluß der hydrodynamischen Zeitkonstanten α auf die Systemantwort. Ein großer Wert von α , der einer niedrigen Einströmrates oder einem großen Kontrollvolumen entspricht, führt zu einem langsamen Anstieg des Ausgangssignals und zu einer verringerten Maximalamplitude. Nur bei hinreichend kleinen α -Werten ($\alpha \ll T$) erreicht das Ausgangssignal die volle

Amplitude des Eingangssignals, oder anders gesagt, nur wenn das Kontrollvolumen V sehr viel kleiner ist als das insgesamt eingeströmte Gasvolumen ($V \ll S_v T$) erfolgt keine Dämpfung der Signalamplitude. Dieses Verhalten der numerischen Lösung kann bei langsamen Strömungsproblemen dem realen Verlauf von der Tendenz her entsprechen.

Eine wichtige Folgerung ist die Tatsache, daß die mit Gl. (8) berechneten Lösungen über den Wert von α von der Größe des gewählten Kontrollvolumens abhängen.

Abb. 2 gibt auch prinzipielle Hinweise zum dynamischen Verhalten des Ausgangssignals. Das Ausgangssignal beginnt immer bei $t=0$, d.h. die instantane Mischungsannahme im Kontrollvolumen führt zu einem künstlich beschleunigten Massentransport. In der Realität wird die Transportzeit einer Gasfront vom Eingang zum Ausgang größenordnungsmäßig den Wert

$$\frac{\text{Kontrollvolumen}}{\text{Einströmrate}} = \frac{V}{S_v} = \alpha \text{ besitzen.}$$

Die vorgegebene Systemzeitkonstante α führt dazu, daß nur dynamische Vorgänge die deutlich langsamer ablaufen, also ein Mehrfaches von α benötigen, am Ausgang des Systems noch als getrennte Signale auftreten.

Weiterhin ist zu beachten, daß das Ausgangssignal unabhängig von der Lage der Ausströmöffnung ist. Für jede andere Lage der Ausströmöffnung in Abb. 1 ergäbe sich dasselbe Ausgangssignal aus Abb. 2, was nicht den physikalischen Gegebenheiten entspricht, und letztlich durch die fehlende Richtungsinformation im LP-Ansatz verursacht wird (kein Impulsvektor).

Zusammenfassend läßt sich feststellen, daß die instantane Mischungsannahme in vorgegebenen Kontrollvolumina, wie sie in LP-Programmen verwendet wird, eine integrierende Wirkung hat. Das Eingangssignal wird entsprechend Gleichung (8) in der Amplitude modifiziert und integriert. Entscheidend für die Dämpfung der Amplitude und die Verminderung der Dynamik im Ausgangssignal ist die Zeitkonstante α .

(=Kontrollvolumen / Eingangsstrom) deren Größe auch von der Wahl des Kontrollvolumens abhängt.

Es ist zu erwarten, daß auf Grund der physikalischen Vermischungsprozesse in vielen realen Strömungsproblemen mit langsamer Druckausgleichsströmung (ohne Impulsdominanz) die Vermischungszeitkonstante in der Tat einen Wert nahe V/Sv (= Volumen/Eingangsstrom) hat. In solchen Fällen ist die rein numerisch, über die Raumauflösung eingeführte Zeitkonstante α in Gl.(8) von der gleichen Größenordnung, wie die reale, physikalisch verursachte Mischungszeitkonstante. Die numerische Zeitkonstante in LP-Lösungen kann daher in manchen Fällen der realen physikalischen Vermischung durch Diffusion und Turbulenz entsprechen, ohne diese Vorgänge allerdings explizit zu modellieren, wie es in CFD-Ansatz realisiert wird.

Die Vernachlässigung der Impulsbilanz (einer Vektorgleichung) im üblichen LP-Modellierungsansatz führt dazu, daß keine Information über Strömungsrichtungen in den Gleichungen enthalten ist. Die Strömungsrichtung wird durch die Position der Quelle, durch die Definition der Kontrollvolumina und deren Verbindungen, sowie durch die Angabe der Druckverlustkoeffizienten vom Benutzer mitbestimmt. Dies mag zwar bei klar definierten Raumketten in kleinen Testanlagen leicht möglich sein, aber i.a. müssen bei Reaktoranalysen sehr komplexe 3-d Gebäude mit vielen Räumen in wesentlich weniger Kontrollzonen kondensiert werden. Diese Nodalisierung ist nicht eindeutig und ein wesentlicher Grund dafür, daß in vielen Benchmarks deutlich unterschiedliche Resultate mit ein und demselben LP-Programm erzielt wurden (sog. Benutzereffekte).

Bei Strömungsproblemen mit Impulseinfluß sind die vereinfachten Gleichungen der üblichen Lumped-Parameter Programme nicht mehr ausreichend, wenn der Impulstransport eine bevorzugte Strömungsrichtung im Rechengitter bewirkt, die sich über mehr als eine Kontrollzone fortsetzt. Vor der Analyse eines Verteilungsproblems sollte daher sichergestellt werden, daß es keine transienten dynamischen Phasen mit hohen

Einspeiseraten gibt, die einen vorzugsweise gerichteten Gastransport über mehrere Kontrollzonen bewirken. Der Strahlimpuls sollte innerhalb einer Kontrollzone dissipiert werden.

Eine kontinuierliche Impulszunahme und damit eine Vorzugsrichtung bei der Gasströmung kann auch durch Auftriebskräfte verursacht werden. Es erscheint schwierig, solche Verteilungsprobleme in realen Reaktoranlagen mit dem vereinfachten LP-Gleichungssatz zu analysieren, wenn sich die Naturkonvektionsströmungen im Laufe der Zeit durch die veränderten Temperaturgradienten verschieben. Solche Vorgänge wurden z.B. bei der CFD-Simulation eines Kühlmittelverluststörf

alls in einem deutschen DWR beobachtet [2]. In diesem Fall folgte nach der Blow-down Phase eine klar erkennbare Stratifikationsphase, in der sich getrennte stabile Konvektionswalzen in der Kuppel und in den unteren Anlagenräumen ausbildeten. Diese Schichtung wurde jedoch durch eine globale Konvektionsströmung durchbrochen, sobald die Kuppeltemperatur durch die Wärmeverluste über die Stahlschale unter die Sumpftemperatur gefallen war.

Es gibt in der Literatur verschiedene Hinweise, daß stabile Schichtungen und auftriebskontrollierte Strömungen zu den fluiddynamischen Problemen gehören die sich mit LP-Ansätzen nur schwierig beschreiben lassen [3,4]. Dies sind Einzelbeobachtungen die an speziellen, meist recht komplexen Problemen mit einer Vielzahl verknüpfter Transportprozesse gemacht wurden. Für einen ausführlichen und systematischen Methodenvergleich müßte a) der Satz von Annahmen formuliert werden, der von den allgemein gültigen Navier-Stockes-Gleichungen auf die reduzierten LP-Gleichungen führt, b) der Einfluß dieser Annahmen in Einzeleffekt-Rechnungen untersucht werde. Den Autoren sind keine entsprechenden Untersuchungen bekannt geworden.

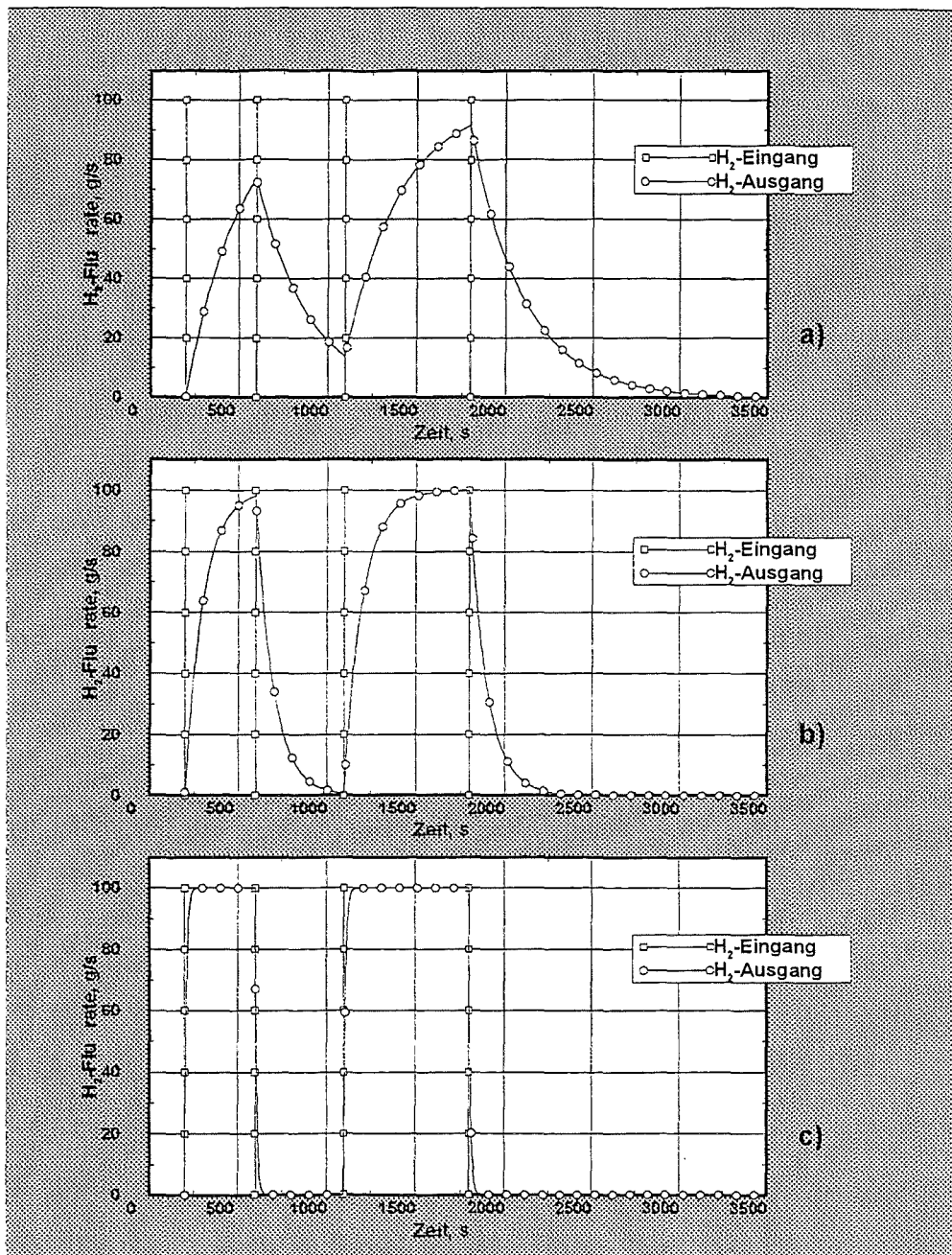


Abb. 2 Eingangssignal entsprechend Gl. 9 und berechnetes Ausgangssignal (Gl. 10) für verschiedene Systemzeitkonstanten α = Kontrollvolumen/ Eingangsstrom:

a) $\alpha = 250$ s, b) $\alpha = 100$ s, c) $\alpha = 10$ s

Literatur

- [1] A. Miassoedov, "Ein Modell zur Beschreibung der Wasserstofferzeugung durch Kernflutung bei Kernschmelzeunfällen", Dissertation, Universität Karlsruhe 1997, Wissenschaftliche Berichte, FZKA-6042 (Dezember 97).
- [2] W. Breitung, P. Royl, J.R. Travis, H. Wilkening, "Analysen zur Wasserstoffverteilung", Atomwirtschaft-Atomtechnik atw 41 (Juni 1996) 411.
- [3] P.N. Smith, P. Ellicott, "A UK analysis of light GAS Distribution Experiment E11.2 in the HDR Facility", Proc. 4th Intern. Seminar on Containment of Nuclear Reactors, August 14-16, 1991, Shanghai, China, p. 143 - 158.
- [4] H. Karwat, "Distribution of Hydrogen within the HDR-Containment under Severe Accident Conditions-Final Comparison Report", Report NEA/CSNI/R 4 (1993).