

**KERNFORSCHUNGSZENTRUM  
KARLSRUHE**

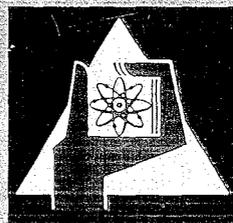
Mai 1970

KFK 1224

Abteilung Dekontaminationsbetriebe

Behandlung der festen radioaktiven Abfälle  
im Kernforschungszentrum Karlsruhe

W. Hempelmann, H. Krause



GESELLSCHAFT FÜR KERNFORSCHUNG M. B. H.  
KARLSRUHE



---

**Sonderdruck aus der Zeitschrift „Chemie-Ingenieur-Technik“**  
Zeitschrift für Verfahrenstechnik, Technische Chemie und Apparatewesen

**CHEMIE  
INGENIEUR  
TECHNIK**

42. Jahrgang · Heft 9 + 10 (1970) · Seite 645-653  
Verlag Chemie GmbH, Weinheim/Bergstr.

---

**Verfahrenstechnik  
Technische Chemie  
Apparatewesen**

---

## **Behandlung der festen radioaktiven Abfälle im Kernforschungszentrum Karlsruhe**

**W. Hempelmann und Dr. Helmut Krause**  
Gesellschaft für Kernforschung mbH, Karlsruhe



# Behandlung der festen radioaktiven Abfälle im Kernforschungszentrum Karlsruhe

W. Hempelmann und Dr. Helmut Krause

Gesellschaft für Kernforschung mbH, Karlsruhe

Von den im Kernforschungszentrum Karlsruhe anfallenden festen radioaktiven Abfällen sind rd. 60% brennbar. Sie werden in einer 1963 installierten Versuchsversuchsanlage verbrannt. Die Volumenreduktion beträgt dabei etwa 1:77. Die entstehende Asche wird mit Zement gebunden und ist gefahrlos zu lagern. Die Ofenabgase können bis auf Atemluftkonzentration gereinigt werden. Das Volumen der nicht brennbaren radioaktiven Abfälle wird durch Pressen in einer hydraulischen Säulendrehpresse um etwa die Hälfte verringert. Anhand der in der Versuchsanlage erzielten guten Ergebnisse bei der Veraschung wird gegenwärtig eine Betriebsanlage gebaut, die bei einem geplanten Durchsatz von 50 kg/h eine wirtschaftliche Abfallaufarbeitung erwarten läßt.

Im Kernforschungszentrum Karlsruhe (KFK) entstanden 1969 etwa 1200 m<sup>3</sup> feste radioaktive Abfälle, vgl. Abb. 1. Die sichere Lagerung derart großer Mengen am Standort ist sehr aufwendig und kann, da laufend neuer Lagerraum erforderlich wird, nur als Zwischenlösung angesehen werden. Auch die endgültige Beseitigung radioaktiver Abfälle, etwa durch Einbringen in geeignete geologische Formationen (z. B. Salzgesteine) oder Versenken in das Meer, ist nicht billig und kann bei Fehlen entsprechender Möglichkeiten sogar zu prinzipiellen Schwierigkeiten führen.

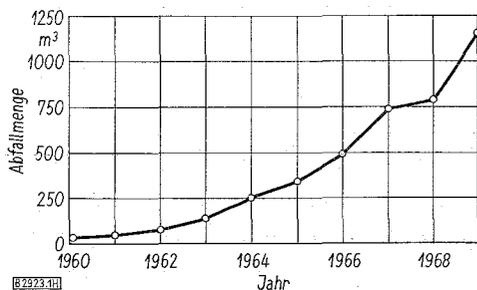


Abb. 1. Anfall an festen radioaktiven Abfällen im Kernforschungszentrum Karlsruhe.

Daher liegt es nahe, daß man bei der Behandlung radioaktiver Abfälle u. a. auch eine möglichst weitgehende Volumenreduktion anstrebt. Gleichzeitig damit ist man bemüht, die Abfälle in eine Form zu bringen, die eine sichere Lagerung über die zum Abklingen der Radioaktivität erforderlichen langen Zeiträume gewährleistet und ein Entweichen von Radionukliden in den Biozyklus weitgehend verhindert [1]. Durch die Berücksichtigung dieser Gesichtspunkte sowie der generellen Besonderheiten des Umganges mit radioaktiven Stoffen unterscheidet sich die Behandlung fester radioaktiver Abfälle in vielen Punkten von der Behandlung inaktiven Mülls.

## Zusammensetzung der Abfälle

Nach den bisherigen Erfahrungen sind ca. 60% der im KFK anfallenden radioaktiven Abfälle brennbar. Sie bestehen im wesentlichen aus Papier, Kunststoffen und Fil-

termaterial. Daneben enthalten sie auch geringere Mengen anderer Materialien, wie Gummi, Holz, Textilien und Tierkadaver. Der Anteil an Kunststoffen beträgt 30 bis 50%. Etwa 15% der radioaktiven Abfälle sind nicht brennbar und bestehen aus Blechdosen, Rohren, Werkzeugen, Geräten u. ä. Das Volumen dieser Abfälle kann man nur durch Pressen reduzieren. Die restlichen 25% der Abfälle sind vor allem Fällschlämme und Verdampfungsrückstände aus der Abwasser-Dekontamination, die an Zement oder Bitumen gebunden sind und keiner weiteren Behandlung mehr bedürfen.

In den festen radioaktiven Abfällen kommen, entsprechend der vielfältigen, im KFK ausgeführten Arbeiten, nahezu alle geläufigen Radionuklide vor, am häufigsten jedoch Spalt- und Aktivierungsprodukte. Etwa 7% der Abfälle enthalten Plutonium. Die schwachaktiven Abfälle stellen mit etwa 98% den Hauptanteil dar. In letzter Zeit sind jedoch auch ständig steigende Mengen mittelaktiver Abfälle angefallen, wobei die höchste bisher gemessene Dosisleistung bei etwa  $6 \cdot 10^3$  r/h lag. Die Tab. 1 gibt einen genaueren Überblick über die Häufigkeit der einzelnen Dosis-Kategorien.

Tabelle 1. Aktivitätsverteilung der festen radioaktiven Abfälle (Dosisleistung in 10 cm Abstand).

| Jahr | 0 bis 100<br>mr/h<br>[m³] | 100 bis 200<br>mr/h<br>[m³] | 200 bis 2000<br>mr/h<br>[m³] | 2 bis 100<br>rem/h<br>[m³] | über 100<br>rem/h<br>[m³] | Gesamtmenge<br>[m³] |
|------|---------------------------|-----------------------------|------------------------------|----------------------------|---------------------------|---------------------|
| 1965 | 280                       | 40                          | 2                            | 1                          | —                         | 323                 |
| 1966 | 380                       | 101                         | 3                            | 2                          | —                         | 486                 |
| 1967 | 530                       | 169                         | 4                            | 2                          | 1                         | 706                 |
| 1968 | 530                       | 222                         | 7                            | 5                          | 3                         | 767                 |
| 1969 | 700                       | 380                         | 23                           | 13                         | 5                         | 1121                |

## Sammeln der Abfälle

Die brennbaren und nicht brennbaren radioaktiven Abfälle werden an den einzelnen Anfallstellen getrennt gesammelt. Die brennbaren Abfälle werden nach Möglichkeit zuerst in Polyäthylen- oder PVC-Beutel von etwa 300 mm Dmr. und 500 mm Höhe verpackt, die nach

Füllung verschweißt oder zugebunden und in 200-l-Rollreifenfässer gelegt werden. Die Verpackung der nicht brennbaren Abfälle muß sich weitgehend nach deren Größe und Beschaffenheit richten. Kleinere Laborabfälle kommen in Papptrommeln von 17 l Inhalt, von denen acht Stück in ein 200-l-Faß passen. Abluftfilter werden in Polyäthylen-Säcke eingeschweißt und in Aluminium-Kisten gelagert und transportiert. Sperrige Gegenstände kann man oft nur durch mehrfaches Einwickeln in Kunststoff-Folien und Verkleben der Ränder mit Klebestreifen transportgerecht verpacken.

Höher aktive Abfälle aus Heißen Zellen werden z. Tl. in sog. La Calhène-Behältern angeliefert. Diese haben einen besonderen Verschuß, der gasdicht an entsprechende Gegenstände der Heißen Zellen angeschlossen wird. Man kann den Behälter von der Zelle aus öffnen, mit Abfällen füllen und dann wieder so verschließen und lösen, daß die Zelle stets geschlossen bleibt und die Behälter außen nicht radioaktiv kontaminiert werden.

Die fertig verpackten und je nach Größe und Aktivität meist in 200-l-Fässern, in Blechkisten oder Blei-Behältern befindlichen Abfälle werden von der Transportgruppe der Dekontaminationsabteilung mit Lastkraftwagen oder Elektrokarrenanhängern zum Lager für feste radioaktive Abfälle gebracht. Von dort kommen sie zur weiteren Behandlung in die nachstehend beschriebenen Anlagen.

### Zerkleinerung sperriger Abfälle

Sowohl im Veraschungs-ofen als auch in der Paketierpresse können nur Abfälle verhältnismäßig kleiner Abmessungen verarbeitet werden, so daß alle sperrigen Abfälle vor der Weiterbehandlung zerkleinert werden müssen. Jedoch auch in Fällen, wo eine Weiterbehandlung nicht angestrebt wird, ist eine Zerkleinerung sperriger Gegenstände erforderlich, da die radioaktiven Abfälle, soweit das immer möglich ist, in 200-l-Fässern verpackt werden.

Die am häufigsten vorkommenden sperrigen Abfälle sind die Luftfilter. Die in Karlsruhe verwendeten Vorfilter haben in der Regel die Abmessungen  $610 \times 610 \times 50$  mm und sind brennbar. Sie werden in einer Handschuhbox mit Hilfe einer Kreissäge in vier Teile zerschnitten und dann verbrannt. Die Feinfilter haben Abmessungen von  $610 \times 610 \times 295$  mm und bestehen aus einem imprägnierten Holzrahmen und einer Glasfasermatte, die mit Aluminium-Folien gestützt wird. Aus diesen Filtern wird die Glasfasermatte samt den Einbauten ausgestanzt und zu den preßbaren Abfällen gegeben. Die Holzrahmen werden in vier Teile zerschnitten und verbrannt.

Sonstige sperrige Gegenstände, wie Rohre, Handschuhboxen u. ä., kommen nur verhältnismäßig selten vor. Deshalb wurden in der Einengungsanlage keine eigenen Einrichtungen für ihre Zerkleinerung vorgesehen. Diese geschieht vielmehr in der Geräte-Dekontaminationsanlage.

### Veraschung

Es liegt nahe, alle brennbaren radioaktiven Abfälle zu veraschen, da man hierdurch nicht nur eine maximale Volumenreduktion erreicht, sondern die Abfälle auch in

eine Form überführt, die Faulung, Gärung oder einen Brand während der Lagerung ausschließt. Wenn man die Asche mit Zementbrei verrührt oder in geeigneter anderer Weise behandelt, kann ein Entweichen von Radionukliden selbst bei Katastrophen praktisch ausgeschlossen werden.

Allerdings wirft die Veraschung auch eine Reihe von Problemen auf. Die Verbrennung des in seiner Zusammensetzung ständig wechselnden Brenngutes, die sichere Verhinderung des Austritts von Radionukliden aus dem Ofen sowie die Behandlung der sehr aggressiven Abgase sind die Hauptschwierigkeiten. Wegen der erforderlichen hohen Investitionskosten können nur Anlagen mit großen Durchsätzen annähernd wirtschaftlich arbeiten. Dementsprechend wurden mehrere Veraschungsanlagen wegen technischer Schwierigkeiten oder wegen Unwirtschaftlichkeit wieder außer Betrieb gesetzt. Es gibt jedoch auch einige Veraschungsanlagen, die schon seit Jahren in Betrieb sind und zufriedenstellend arbeiten [2-7].

Ein einheitliches Bauprinzip liegt den bisher bekannten Veraschungsanlagen für radioaktive Abfälle nicht zu Grunde. So findet man sowohl Öfen mit Zusatzheizung (Öl, Gas, elektrische Erhitzer) als auch Verbrennungsöfen ohne Zusatzheizung. Die Luft im Ofen wird entweder von oben nach unten oder auch umgekehrt geführt. Bei der Rauchgasreinigung findet man trocken arbeitende Systeme und Naßwäscher. Jedes dieser Systeme weist Vor- und Nachteile auf, so daß die Wahl nicht einfach ist. Auf einige Versuche sowohl mit trockener als auch mit nasser Abgasreinigung in der Anlage des KFK wird weiter unten (S. 649) kurz eingegangen.

### Grundsätzliches zur Auslegung der Veraschungsanlage

Bei der Festlegung der wichtigsten Kriterien unserer Veraschungsanlage wurden die Betriebssicherheit, die Wirtschaftlichkeit und die Einfachheit der Bedienung an erste Stelle gesetzt. Die Anlage sollte sowohl die Besonderheiten der Zusammensetzung der Abfälle als auch diejenigen des Umgangs mit radioaktiven Stoffen berücksichtigen. Weiterhin sollte sie möglichst kompakt gebaut sein. Da im Ofen im Laufe des Betriebes die Aktivität langsam zunimmt, was die Reinigung sehr erschwert, sollten Einbauten weitgehend vermieden und ein möglichst glatter Innenraum angestrebt werden.

Der Heizwert der brennbaren Abfälle schwankt zwischen 2800 und 10000 kcal/kg. Durch Vorsortierung, Zerkleinerung und Mischung ließe sich zwar in gewissen Grenzen ein mittlerer Heizwert einstellen, aber die für eine Sortierbox, eine Zerkleinerungsmaschine, eine Mischvorrichtung, einen Silo sowie die dazugehörige Transporteinrichtung notwendigen Investitionen und der zusätzliche Platzbedarf sprachen gegen eine solche Anlage. Außerdem birgt sie eine gewisse Gefahr von Bränden in der Vorlage bzw. in der Verbindungsleitung zwischen Vorlage und Ofen bei undichten Absperrorganen in sich. Die relativ großen Abfallmengen im Silo würden weiterhin zu einer zusätzlichen Strahlenbelastung des Bedienungspersonals führen, und wegen der starken Beanspruchung der genannten Einrichtungen durch mechanische Einwirkung und Korrosion wäre mit hohen Reparaturkosten zu rechnen. Als Vorteile

hätten sich allerdings eine gleichmäßige Verbrennung sowie die Möglichkeit einer automatischen Beschickung des Ofens ergeben. In Karlsruhe wurde aus verschiedenen, zum Teil durch äußere Umstände erzwungenen Gründen der folgende Weg gewählt:

Der Brennstoff wird in der Reihenfolge der Anlieferung dem Ofen aufgegeben. Eine Einteilung der Abfälle nach ihrer Art oder den enthaltenen Radionukliden wird nicht vorgenommen. Lediglich Kernbrennstoffe sowie explosive Materialien werden gesondert gesammelt. Die Praxis hat gezeigt, daß sich im allgemeinen nur selten unbrennbare Gegenstände im brennbaren Abfall befinden, so daß die umständliche Vorsortierung nicht notwendig ist. Bei der Beschickung des Ofens von Hand wird der Abfall auf etwa enthaltene sperrige Stoffe kontrolliert.

Wegen des hohen Kunststoffanteils sind die Rauchgase sehr aggressiv. Es bilden sich Chlorwasserstoff und Chlor, was dazu führt, daß sich an allen kalten Stellen der Anlage Salzsäure als Kondensat niederschlägt. Außerdem entstehen teerige Kondensate. Aus der Literatur ist bekannt, daß auch ausländische Anlagen mit ähnlichen Schwierigkeiten zu kämpfen haben. Dieses Problem mußte bei der Planung der Anlage besonders beachtet werden, vor allem bei der Wahl der Absperrorgane sowie der Abgasreinigungsanlage.

Die Zuluft wird entsprechend den Erfordernissen in Grenzen von ca. 50% der Gesamtluftmenge reguliert. Sofern dies nicht ausreicht oder nur mit einer gewissen Verzögerung geschehen kann, wird eine zeitweilig unvollkommene Verbrennung mit hohem Anteil an Ruß im Rauchgas in Kauf genommen. Die unverbrannten Rußteile werden durch eine Nachverbrennung beseitigt.

#### Aufbau der Versuchsveraschungsanlage

Da die Veraschung radioaktiver Abfälle mit vielen noch nicht ganz gelösten Problemen verbunden ist, wurde 1963 zunächst eine Versuchsanlage installiert, in der die erforderlichen Erfahrungen für die Entwicklung einer betriebs-sicheren Anlage gesammelt werden sollten.

Die Versuchsanlage ist vorerst in einer provisorischen Halle (Grundfläche 9 × 7 m, Höhe 5 m) aus einem mit Polyester verkleideten Stahlgerüst untergebracht. In einer zweiten Halle befinden sich die Abluftventilatoren, Abluftfilter und weitere Hilfseinrichtungen. Der Veraschungs-ofen besteht aus einer Stahlzarge von 4 mm

Dicke und hat eine 300 mm dicke Ausmauerung, zusammengesetzt aus einer inneren Schicht von feuerfester Stampfmasse bzw. Steinen, einer Zwischenschicht aus Leichtschamotte und einer Isolierschicht aus Steinwolle. Er hat die Form eines Zylinders (inn. Dmr. 700 mm, Höhe 1500 mm), der sich unten verjüngt und in einen zweiten Zylinder (300 mm Dmr., 600 mm Höhe) übergeht, vgl. Abb. 2. Den unteren Abschluß bildet eine als Rost dienende drehbare Stahl-Platte. Über dem Ofen ist eine zur Einführung der Abfälle dienende Schiebeschleuse (500 mm Dmr., 600 mm Höhe) angebracht.

Dem Ofen vorgeschaltet ist ein ebenfalls ausgemauerter elektrischer Lufterhitzer, der eine Windmenge von 50 m<sup>3</sup>/h auf etwa 600 °C erhitzt. Hinter dem Ofen sind zunächst zwei parallel geschaltete Nachbrennkammern angeordnet, die gleichzeitig zur Grobfiltration der Rauchgase dienen. Sie haben einen Querschnitt von 1000 × 1000 mm, eine Höhe von 3000 mm und sind feuerfest ausgemauert. In einer Höhe von 2 m ist eine Gußeisen-Platte eingezogen, in der 49 keramische Filterkerzen (Handelsname Pantel [Wilhelm Schuler Filtertechnik GmbH, Eisenberg], Porenweite 40 µm) hängen, die gegen die Platte durch verstemmte Asbestschnüre abdichtet sind. Der Deckel ist ebenfalls ausgemauert und kann zum Wechseln der Filterkerzen abgehoben werden. Eine der beiden Kammern steht jeweils in Reserve. An die beiden Nachbrennkammern schließt sich eine weitere an, die der Feinfiltration dient.

Es folgt eine als Teerabscheider benutzte zweistufige Wasservorlage. Ihre Form wurde nicht bewußt gewählt, sondern ergab sich daraus, daß ein derartiger Behälter gerade verfügbar war. In der künftigen Anlage soll hierauf verzichtet werden. Vor dem Teerabscheider werden die Rauchgase durch Zumischen von Luft auf etwa 100 °C abgekühlt. Falls das nicht ausreicht, kann über eine Düse Wasser in den heißen Rauchgasstrom eingespritzt werden. Nach dem Passieren des Abscheiders drücken zwei Gebläse von je 250 m<sup>3</sup> Förderleistung das Rauchgas in einen 10,5 m hohen Kamin.

#### Betriebsablauf

Die Anlage wird z. Z. in zwei Schichten gefahren. Zur Inbetriebnahme wird der Ofen mit elektrisch erwärmter Luft auf etwa 200 °C aufgeheizt. Sodann wird dem Ofen leicht brennbares Material zugegeben, wobei er rasch die Betriebstemperatur von 900 bis 1100 °C erreicht. Die elek-

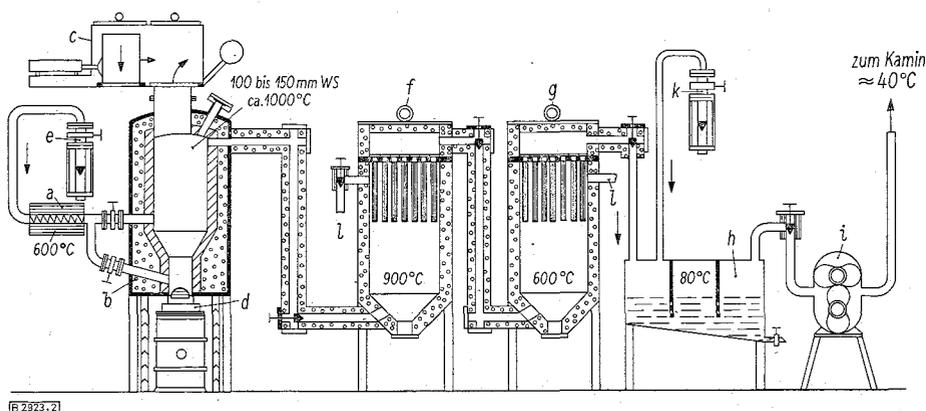


Abb. 2. Schema der Veraschungsanlage (Leistung ca. 30 kg/h, Stand Ende 1969).

a elektrischer Winderhitzer, b Veraschungs-ofen, c Aufschüttmaschine, d Ascheaustrag, e Zuluftregelung, f Nachbrennkammer (Grobfilter), g Feinfilter (49 Filterelemente), h Teerabscheider, i Drehkolbengebläse, k Bypassregelung, l Anfahrkreis.

trische Luftvorwärmung wird dann ausgeschaltet. Das Anheizen dauert am Wochenanfang, nachdem der Ofen 36 h außer Betrieb war, etwa 4 bis 5 h. Während der Woche hat der Ofen trotz der achtstündigen Betriebsunterbrechung am Morgen noch eine Temperatur von 400 bis 500 °C.

Die radioaktiven Abfälle werden, in Kunststoffbeuteln von maximal 30 l Inhalt verpackt, über die Schiebeschleuse zugegeben. Sie bauen sich zunächst auf der konischen Verjüngung des Ofens auf, die wie ein zweiter Rost wirkt und fallen erst nach weitgehender Verbrennung bis zum eigentlichen Rost durch. Die weitere Zugabe des Brenngutes erfolgt entsprechend dem über ein Schauglas zu beobachtenden Feuerbild sowie nach dem Differenzdruck in den Nachbrennkammern. Durch richtige Dosierung und Auswahl des Brenngutes kann mit einiger Erfahrung eine weitgehend gleichmäßige Verbrennung erzielt werden. Die Asche wird einmal täglich durch Drehen des Rostes in ein angeflanshtes 200-l-Rollreifenfaß abgelassen. Wenn dieses zu etwa 80% gefüllt ist, wird die Asche durch Übergießen mit einem dünnen Zementbrei gebunden.

Die Zuluft wird dem Ofen an zwei Stellen im unteren Teil zugeleitet, und zwar knapp oberhalb des Rostes und oberhalb des konischen Ofenteils. Ihre Menge kann mit Hilfe von zwei Ventilen und einem Bypassventil geregelt werden. Der jeweilige Durchfluß ist an drei Rotametern abzulesen. Die Rauchgase werden durch einen im Deckel waagrecht angeordneten Stutzen abgezogen. Sie gelangen zunächst in eine der beiden als Vorfilter ausgebildeten Nachbrennkammern. Dort strömt das Gas von unten auf die Filter. Der mitgeführte Ruß beginnt bereits beim Eintritt in die Kammer zu brennen. Er lagert sich dann auf den Kerzen ab und verglüht auf diesen vollkommen. Die Asche fällt von Zeit zu Zeit in Form von Schuppen von den Kerzen ab und kann am Boden der Kammern abgezogen werden.

In dem nachfolgenden Feinfilter werden die Ofenabgase noch weiter gereinigt, doch dient dieses vor allem als Sicherheitsfilter bei Defekten in dem vorgeschalteten Grobfilter. Während des Betriebs herrscht in den Vorfiltern eine Temperatur von 900 °C, in den Feinfiltern eine solche von 600 °C. Der Widerstand der Filter schwankt zwischen 80 und 600 mm WS. Da der Verbrennungsprozeß auf den keramischen Filtern erst bei Temperaturen über 400 °C in Gang kommt, müssen sie beim Anfahren mit heißer Luft vorgewärmt werden.

Nach dem Passieren des Feinfilters wird die Ofenabluft zur weiteren Abkühlung mit Frischluft vermischt und, wie bereits beschrieben, durch Einspritzen von Wasser auf etwa 100 °C abgekühlt. Im Teerabscheider kondensiert der größte Teil der Salzsäure sowie der teerigen Produkte aus. Da im Abscheider im Mittel pro Betriebsstunde ca. 1 kg HCl ausgewaschen wird, neutralisiert man seinen Inhalt laufend mit Soda. Einmal wöchentlich muß diese Lösung abgelassen werden.

Während des Betriebes herrscht im Ofen ein Unterdruck von 100 bis 150 mm WS. Dadurch wird der Austritt von radioaktiven Stäuben in die Raumluft wirksam verhindert. Der Unterdruck wird an einer, die Temperatur an sechs Stellen kontrolliert. Die Aktivität der Rauchgase wird sowohl kontinuierlich als diskontinuierlich gemessen.

## Betriebserfahrungen

In der Versuchsveraschungsanlage wurden in den vergangenen sechs Jahren rd. 1600 m<sup>3</sup> feste radioaktive Abfälle verbrannt. Nachfolgend werden die wichtigsten während dieser Zeit gesammelten Erfahrungen kurz beschrieben.

### *Verstopfung und Korrosion*

Die Form des Ofens mit der konischen Einschnürung wurde von Anfang an beibehalten. Dieses Konzept hat sich insofern gut bewährt, als infolge des glatten Innenraumes Verstopfungen bisher kaum vorgekommen sind bzw. leicht zu beseitigen waren. Auch die an den Wänden angebackenen Schlacken konnten durch Stochern mit einer Eisen-Stange leicht abgestoßen werden. Ein weiterer Vorteil dieser Ofenform liegt in dem geringen Raumbedarf. Allerdings lassen sich Öfen dieser Art nicht in beliebiger Größe bauen.

Die gewählte Ausmauerung überstand zwei Betriebsjahre ohne jede Reparatur und hält nach Ausbesserung einiger Risse nun bereits das dritte Jahr. Dies ist um so bemerkenswerter, als die Ausmauerung durch die Abschaltung des Ofens über Nacht (2-Schichtbetrieb) und über das Wochenende häufigen Temperaturwechseln ausgesetzt ist. Die keramischen Auskleidungen hielten auch der Korrosion gut stand. Dagegen zeigten Metallteile schon nach relativ kurzen Betriebszeiten ernsthafte Korrosionsschäden. Interessant ist dabei, daß legierte Stähle vom Typ 4541, 4841 und 4821 zum Teil eine geringere Lebensdauer als normaler Baustahl erreichten. Deshalb werden nunmehr alle Teile, die aus Stahl gefertigt werden müssen, aus diesem billigen Material hergestellt, wobei bei der Konstruktion auf leichte Austauschbarkeit geachtet wird.

### *Rauchgasreinigung über Sackfilter und Feinstfilter*

Während der ersten vier Betriebsjahre wurde die Ofenabluft über einen Vorabscheider von groben Staubteilchen gereinigt und über einen Röhren-Wärmeaustauscher auf etwa 170 °C abgekühlt. Sie passierte dann ein Sackfilter, wurde schließlich durch zwei hintereinandergeschaltete Schwebstoff-Filter der Klasse S gesaugt und dann in den Schornstein abgelassen. Dieses trocken arbeitende Abgas-Reinigungssystem erlaubte zwar ohne Schwierigkeiten, die Rauchgase so weit von radioaktiven Stäuben und Aerosolen zu befreien, daß sie den Normen der I. Strahlenschutzverordnung für Atemluft entsprachen, es hafteten ihm jedoch auch einige Nachteile an. Da der Heizwert der Abfälle und dementsprechend der Luftdurchsatz in weiten Grenzen schwanken, war keine exakte Auslegung des Vorabscheiders möglich, so daß dieser mehr als Nachverbrennungskammer denn als Abscheider wirkte. In dem nachgeschalteten Röhrenkühler schieden sich neben stark sauren wäßrigen (bis 150 g Cl<sup>-</sup>-Ionen/l) auch teerige Kondensate aus. Letztere bildeten zwar auf den Austauscherröhren einen Belag und verhinderten so die rasche Korrosion der Kühler, nachteilig war jedoch, daß sie von Zeit zu Zeit mit Hilfe von rotierenden Bürsten entfernt werden mußten. Um diese Reinigungsoperationen kontaminationssicher ausführen zu können, waren auf den Kühler Handschuhkästen montiert.

Da die provisorische Halle für einen genügend hohen Feuerraum des Ofens nicht ausreichte, wurde mit den Rauchgasen stets eine gewisse Menge Ruß bis in die Sackfilter gesaugt und dort zusammen mit der Flugasche abgeschieden, so daß mitgerissene Funken in den Sackfiltern Schwelbrände verursachen konnten. Aus diesem Grunde war eine sehr sorgfältige Bedienung des Ofens erforderlich. Beim Auftreten von Filterbränden mußte auf ein Reservefilter umgeschaltet und der betroffene Filterkasten abgeschiebert werden. Nach einigem Warten konnte man den Sack wechseln. Hierfür sowie für den routinemäßigen Wechsel der Sackfilter waren unter den Filtergehäusen Handschuhkästen angebracht.

Als Material für die Filtersäcke bewährte sich am besten ein Polyamid-Gewebe mit dem Handelsnamen Nomex (Du Pont). Es hatte bei Betriebstemperaturen von etwa 170°C eine Lebensdauer von 3 bis 4 Tagen. Allerdings mußte der im Sack gesammelte Staub mehrmals pro Stunde abgeschüttelt werden. Die verbrauchten Filter wurden schließlich samt ihrem Inhalt gleich wieder im Ofen verbrannt. Solange die Veraschungsanlage nach dem eben beschriebenen Abgasreinigungssystem betrieben wurde, stellte ihre Bedienung hohe Anforderungen an die Aufmerksamkeit des Personals.

#### *Abluftreinigung über keramische Filter*

Einen wesentlichen Fortschritt in der Rauchgasreinigung brachte die Einführung von keramischen Filterkerzen, obgleich es bei den ersten Versuchen mit diesem System eine Reihe von Schwierigkeiten gab. Zunächst verstopften sich die Kerzen stets schon nach kurzer Zeit, weil sie nicht rasch genug auf die erforderliche Temperatur von über 400°C gebracht werden konnten. Große Schwierigkeiten bereitete auch das Reißen der aus zwei je 500 mm langen Elementen hergestellten Filter an der Verbindungsnaht. Durch Änderung des Herstellungsverfahrens und Wahl eines geeigneten Klebers konnte jedoch auch dieser Mangel beseitigt werden. Die Filterkerzen haben jetzt bereits eine Lebensdauer von rd. vier Wochen, die wahrscheinlich durch bessere Fertigungsverfahren und Materialzusammensetzung auf etwa drei Monate gesteigert werden kann. Nach dieser Zeit dürfte nach den bisherigen Beobachtungen der Filterwiderstand soweit angestiegen sein, daß die Kerzen ausgewechselt werden müssen. Im nachgeschalteten Feinfilter werden, bedingt durch die geringere Beanspruchung, bereits jetzt Standzeiten von drei Monaten erreicht.

Durch die Verwendung der Filterkerzen wurde die Abgasreinigung in vielerlei Hinsicht wesentlich verbessert: Das Schütteln der Filtersäcke und ihr häufiges Wechseln entfällt; Schwebstoff-Filter sind nicht mehr erforderlich; Filterbrände sind ausgeschlossen; der Ofen kann fast von Ungelernten bedient werden, und die Bedienung ist auch physisch einfach geworden.

#### *Naßreinigung der Abgase*

Während einer kurzen Zeit wurde auch die Naßreinigung der Verbrennungsgase in Waschtürmen untersucht. Hierbei entstanden jedoch große Mengen radioaktiver Abwässer, deren Beseitigung zu erheblichen Betriebskosten führte, vgl. [8]. Weiterhin traten bei der Naßreinigung wegen der großen Mengen an Chlorwasserstoff und Chlor

im Abgas beträchtliche Korrosionsprobleme auf. Aus diesen Gründen sowie wegen der guten Erfolge mit den gleichzeitig erprobten keramischen Kerzen wurde die Naßreinigung wieder aufgegeben.

#### *Verpuffungen*

Obwohl es im Kernforschungszentrum verboten ist, organische Lösungsmittel und explosive Stoffe zu den festen brennbaren Abfällen zu geben, und obwohl auch bei der Beschickung des Ofens Flaschen, sofern man sie bemerkt, aussortiert werden, kommen im Ofen gelegentlich Verpuffungen vor (etwa 2- bis 3mal pro Jahr). Aus diesem Grunde wurden in der Verbrennungsanlage fünf gewichtsbelastete Explosionsklappen vorgesehen, die bei einem Überdruck von 500 mm WS abheben. Um zu verhindern, daß hierbei radioaktive Stoffe in den Arbeitsraum gelangen, sind über die Explosionsklappen Metallschläuche gestülpt, die über Funkenfänger an die Abluftleitung angeschlossen sind. Das beschriebene System hat sich sehr gut bewährt. Kontaminationen auf Grund von Verpuffungen sind bisher kaum vorgekommen.

#### *Aktivität und Unfälle*

Die bisher verbrannten Abfälle wiesen im Mittel eine Strahlendosisleistung von rd. 10 mr/h im Kontakt auf. Abfälle mit einer Dosisleistung > 500 mr/h werden nicht mehr verbrannt. Die Aschefässer haben im Durchschnitt eine Dosisleistung von 150 bis 500 mr/h. Es wurden jedoch auch schon Spitzenwerte von 25 r/h gemessen, die nur so erklärt werden können, daß kleinere radioaktive Präparate in Blei-Gefäßen verpackt waren, die im Ofen geschmolzen sind und so ihren Inhalt freigesetzt haben. Kontaminationen sind sehr selten und meist nur auf kleine Bereiche beschränkt. Sie werden überwiegend durch unsachgemäße Verpackung oder falsche Kennzeichnung der Abfälle verursacht.

#### *Paketierung*

Die Volumina der nicht brennbaren Abfälle, wie Blechbüchsen, Filtermaterial, Schrott, Laborgeräte und Glaswaren, werden durch Pressen verringert. Im KFK wird hierzu eine hydraulische Säulendrehpresse mit einem Preßdruck von 300 t<sup>1)</sup> verwendet (spezifischer Preßdruck 150 kg/cm<sup>2</sup>). Der Preßzylinder hat eine Höhe von 800 mm und einen Durchmesser von 500 mm und ist horizontal in drei Stellungen schwenkbar. In der ersten Stellung werden die Abfälle in den Preßzylinder gefüllt. Dann wird dieser um 120° unter den Preßkolben geschwenkt, der die Abfälle mit einem Preßdruck 300 t zusammenpreßt. Nachdem der Preßkolben wieder in seine Ausgangsposition zurückgekehrt ist, schwenkt der Preßzylinder erneut um 120°. Er steht dann unter dem Ausstoßkolben, der den Preßling mit einem Preßdruck von 10 t in ein unter der Presse stehendes und von einem Gabelhubwagen fest an die Presse angedrücktes 200-l-Faß ausstößt. Nach einer weiteren Drehung um 120° steht der Preßzylinder wieder in der Beladeposition und kann erneut beschickt werden, vgl. Abb. 3 und 4.

1) Auf die Gesamtfäche bezogen.

Damit die Preßlinge, die meist nicht über den ganzen Umfang gleich schwer sind, im Faß nicht verkanten und sich quer legen, wird auf das leere Faß jeweils ein Polyäthylen-Sack aufgelegt, dessen Rand über die Faßwand gestülpt und von einem Gummiband gehalten wird. Durch das Gewicht der Preßlinge sinkt der Sack nach und nach immer tiefer. Ist ein Faß gefüllt, wird der Hohlraum

darüber hinausgehender Dosisleistung werden nicht pakettiert, weil der Aufwand für die Abschirmungseinrichtungen im Verhältnis zum Durchsatz zu groß würde.

Kontaminationen kamen bisher außerhalb der Paketierpresse nur zweimal vor. Gelegentlich konnte beobachtet werden, daß Abfälle beim Pressen verglimmen. Da jedoch

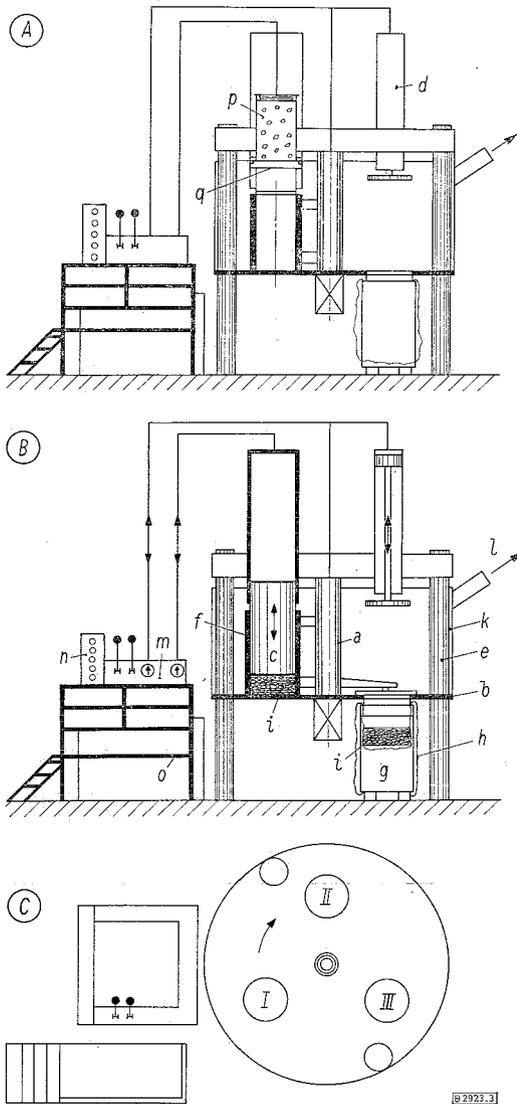


Abb. 3. Schema der Paketierpresse.

A) Presse in Füllstellung, B) Presse in Paketierstellung, C) Funktionsstellung (Position: I Füllen, II Pressen, III Ausstoßen).

a Schwenkachse, b Preßtisch, c Preßkolben (300 t), d Ausstoßkolben, e Pressenständer, f Preßzylinder, g Faß, h Plastiksack, i Preßkuchen, k Box, l Abluftableitung, m Pumpengehäuse, n Schaltkasten, o Bedienungsbühne, p Transportgefäß, q Doppelschieber.

zwischen den Preßlingen und der Faßwand mit Zementbrei ausgegossen, damit eine ausreichende mechanische Stabilität gewährleistet und ein Entweichen radioaktiver Substanzen verhindert wird.

Durch die Paketierung wird je nach der Art der Abfälle eine Volumenreduktion von 1:2 bis 1:3 erreicht. Von 1963 bis Ende 1969 wurden 560 m<sup>3</sup> nicht brennbare Abfälle gepreßt. Die Dosisleistung der Abfälle betrug im Mittel etwa 50 mr/h und erreichte in der Spitze 2 r/h. Abfälle mit

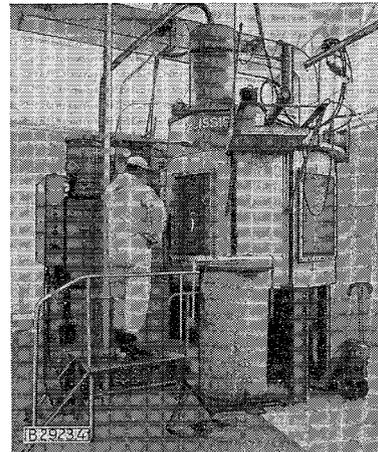


Abb. 4. Paketierpresse.

alle mit radioaktivem Material in Berührung kommenden Teile der Presse in einer Box untergebracht sind, hatte dies keinerlei Folgen. Lediglich die Tatsache, daß sich einige Teile, die einer öfteren Wartung bedürfen, innerhalb der Box befinden, führte zu gewissen Schwierigkeiten. Bei jeder Reparatur oder Wartung war es nämlich notwendig, große Teile der Presse zu dekontaminieren. Aus diesem Grunde wurde die Presse nicht immer genügend gewartet, so daß es zu größeren Ausfallzeiten kam.

### Zwischenlagerung

Für die Lagerung der festen radioaktiven Abfälle vor der Zerkleinerung, Paketierung und Verbrennung sowie für die Zwischenlagerung der eingegengten Abfälle stehen drei leichte Hallen, ein Betonbunker sowie ein überdachtes Freigelände zur Verfügung. Das Lagergelände ist von einem 3 m hohen Erdwall umgeben, vgl. Abb. 5. Die Hallen wurden in Stahlskelett-Leichtbauweise zum Teil mit Welleternit-Wänden errichtet und haben die Abmessungen von 20 × 10, 10 × 10 und 36 × 10 m. Sie erlauben die Stapelung von ca. 6000 200-l-Fässern in drei bis vier Lagen übereinander, so daß insgesamt etwa 1200 m<sup>3</sup> radioaktive Abfälle untergebracht werden können. Die Beschickung kann über 21 Tore an den Längsseiten der Hallen erfolgen. Dies ermöglicht eine einfache Manipulation und erfordert nur geringe Flächen als Verkehrswege. Die Fußböden aller Bauten sind als wasserdichte Wannen ausgebildet und haben Ablaufrinnen, die zu einem Pumpensumpf führen. Die Hallen sind nicht zwangsgelüftet.

Die Abfälle mit einer Außenstrahlung > 1 r/h werden in einem Bunker mit zwei Kammern von je 70 m<sup>2</sup> Grundfläche gelagert. Der Bunker wird von einem abgeschirmten Gabelstapler, s. Abb. 6, mit den in der Regel in 200-l-Rollreifensäcken verpackten Abfällen beschickt. Die Vorgänge in den Lagerkammern können von einem abgeschirmten Beobachtungsraum aus über Periskope beob-

achtet werden, vgl. Abb. 7. Die Wände des Bunkers haben aus Abschirmgründen eine Stärke von 80 cm Normalbeton.

Bis Ende 1969 lagerten im Bunker 50 m<sup>3</sup> mittelaktiver Abfälle mit einer Gesamtaktivität von ca.  $2 \cdot 10^4$  Ci. Als höchste Strahlendosisleistung wurden bisher  $6 \cdot 10^3$  r/h gemessen.

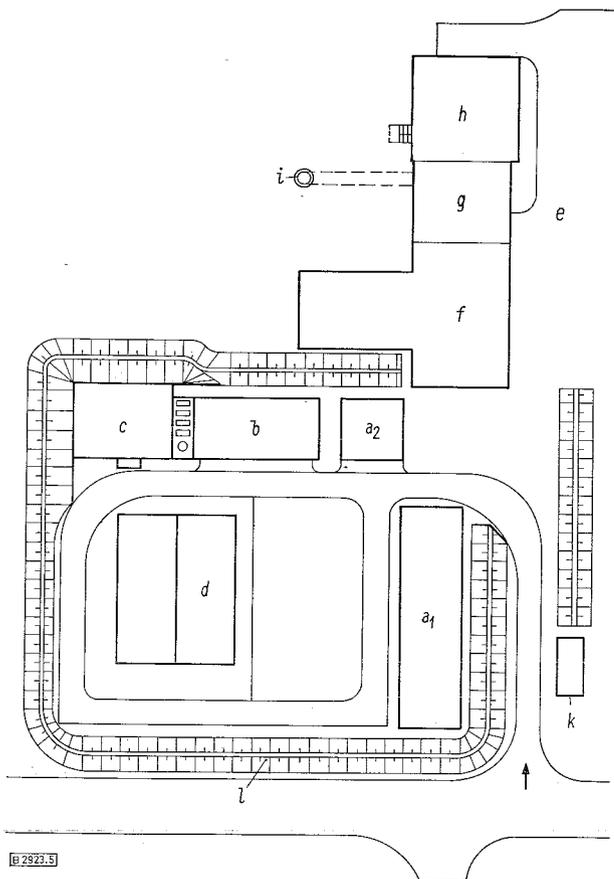


Abb. 5. Lageplan des Lagers für radioaktive Abfälle und der Einengungsanlage.

$a_1, a_2$  Lagerhallen,  $b$  beheizte Lagerhalle mit Lösungsmittel-Sammelstation,  $c$  Lagerbunker,  $d$  überdachter Lagerplatz,  $e$  Einengungsanlage,  $f$  Lager für mittelaktive Abfälle,  $g$  Sozialräume,  $h$  Veraschungsanlage,  $i$  Kamin,  $k$  Kontrollbaracke,  $l$  Erdwall.

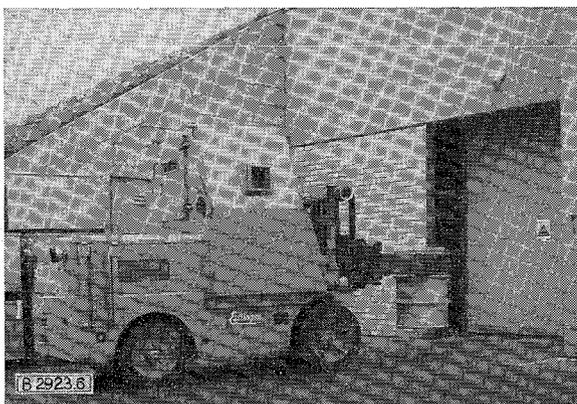


Abb. 6. Lagerbunker für mittelaktive Abfälle mit abgeschirmtem Gabelstapler.

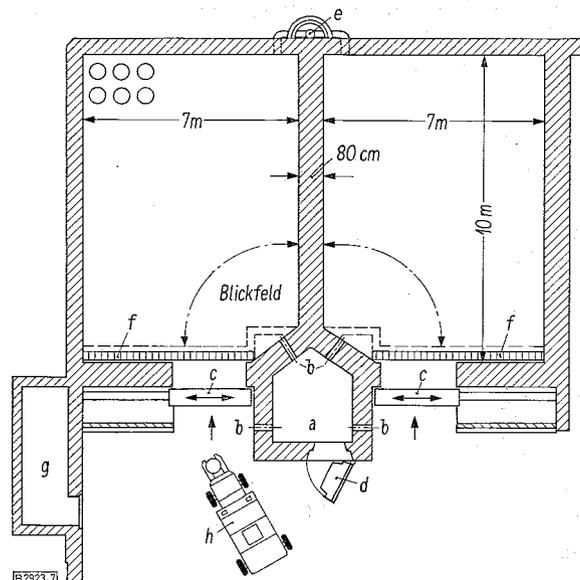


Abb. 7. Grundriß des Bunkers für mittelaktive Abfälle.

$a$  Beobachtungsraum,  $b$  Periskope,  $c$  Schiebetür (Schwerbeton),  $d$  Drehtür,  $e$  Abluftventilator,  $f$  Entwässerung mit Sumpf,  $g$  automatische Feuerlöschanlage,  $h$  abgeschirmter Gabelstapler.

### Betriebskosten

#### Einengungskosten

In der beschriebenen Versuchsanlage wurden die Betriebsperioden bisher in regelmäßigen Abständen von Umbau- und Versuchsperioden abgelöst. Deshalb blieb der tatsächliche Durchsatz der Anlage weit unter dem theoretisch möglichen. Obwohl eine exakte Trennung der Betriebs- und Versuchskosten nicht möglich ist, soll doch versucht werden, wenigstens einen Überblick über die augenblicklichen und künftigen Betriebskosten zu geben.

Tab. 2 zeigt deutlich, daß ein wirtschaftlicher Betrieb nur bei relativ hohen Durchsätzen zu erreichen ist. In der neuen, im Bau befindlichen Betriebsanlage werden die Kosten der Einengung bei einem Durchsatz von ca. 1000 m<sup>3</sup>/a ca. 660 DM/m<sup>3</sup> betragen. Bei einem Durchsatz von 1500 m<sup>3</sup>/a ist nur noch mit einem Preis von ca. 470 DM/m<sup>3</sup> zu rechnen. Da die Kosten für Veraschung und Paketierung nicht getrennt erfaßt werden, ist eine genaue Angabe über die sich bei den einzelnen Verfahren ergebenden Kosten nicht möglich. Für 1969 wurden anhand der jeweiligen Betriebszeiten der beiden Anlagen und der eingegangenen Abfallmengen die Kosten der Veraschung mit 860 DM/m<sup>3</sup>, die der Paketierung mit 368 DM/m<sup>3</sup> ermittelt. Der Betriebsgewinn durch die Einengung betrug bei der Veraschung 21 DM/m<sup>3</sup> und bei der Paketierung 264 DM/m<sup>3</sup>. Diese Zahlen bestätigen, daß eine Paketierungsanlage bereits bei wesentlich kleineren Abfallmengen wirtschaftlicher arbeiten kann als eine Veraschungsanlage. Hinsichtlich der Volumenreduktion ist die Veraschung dagegen wesentlich günstiger. Der Einengungsfaktor lag 1969 bei 1:77 für die Veraschung und bei nur 1:2,1 für die Paketierung.

Die genannten Kosten sind im Vergleich zur normalen Müllverbrennung sehr hoch. Der Unterschied ergibt sich

Tabelle 2. Betriebskosten der Einengungsanlage.

|   | 1966  | 1967 | 1968 | 1969 |
|---|-------|------|------|------|
| Durchsatz <sup>*)</sup><br>[m <sup>3</sup> /a]                                      | 173   | 505  | 476  | 552  |
| Kosten ohne<br>Abschreibung<br>[DM/m <sup>3</sup> ]                                 | 1400  | 720  | 665  | 595  |
| Kosten mit<br>Abschreibung<br>[DM/m <sup>3</sup> ]                                  | 1510  | 785  | 815  | 730  |
| Einsparungen an<br>Faß-, Transport-<br>und Endlager-<br>kosten [DM/m <sup>3</sup> ] | 715   | 808  | 781  | 817  |
| Gesamtbilanz<br>[DM/m <sup>3</sup> ]  | - 795 | + 23 | - 34 | + 87 |

<sup>\*)</sup> 1966 wurde die Anlage nur in einer Schicht betrieben, in den folgenden Jahren in zwei Schichten.

einerseits aus den um Größenordnungen unterschiedlichen Durchsätzen sowie aus dem gar nicht vergleichbaren Aufwand für die Sicherheit. Außerdem sind die Gemeinkosten einer Kernforschungsanlage sehr hoch. Trotzdem ist die Einengung der festen radioaktiven Abfälle bei größeren Durchsätzen auch ein wirtschaftlicher Gewinn.

#### Kosten der Zwischenlagerung und des innerbetrieblichen Transportes

Die Kosten für die Zwischenlagerung sind aus Tab. 3 zu entnehmen. Sie enthalten die Einsammlung der Abfälle an den Abfallstellen, das Verpackungsmaterial einschließlich der Fässer, die Lagerung der eingesammelten Abfälle bis zur Aufarbeitung sowie die Kosten für die Lagerung der eingegangenen Rückstände bis zum Abtransport in das Endlager. Daneben sind in diesen Kosten jedoch auch Beträge für den Transport radioaktiver Flüssigkeiten sowie für verschiedene innerbetriebliche Transporte enthalten, welche die Zahlen wahrscheinlich um ca. 30% verfälschen.

Tabelle 3. Kosten der Zwischenlagerung.

|   | 1966 | 1967 | 1968 | 1969 <sup>*)</sup> |
|---|------|------|------|--------------------|
| Eingelagerte Abfälle [m <sup>3</sup> /a]            | 487  | 707  | 767  | 1121               |
| Kosten ohne<br>Abschreibung<br>[DM/m <sup>3</sup> ] | 948  | 605  | 575  | 410                |
| Kosten mit<br>Abschreibung<br>[DM/m <sup>3</sup> ]  | 1255 | 824  | 845  | 590                |

<sup>\*)</sup> Die Zahlen für 1969 sind aus dem Anfall der ersten 11 Monate extrapoliert.

#### Neue Anlagen

Nachdem die Arbeitsmöglichkeiten in der provisorischen Einengungsanlage sehr beschränkt sind und der Ver-

suchsbetrieb bisher ausreichende Erfahrungen geliefert hat, wurde mit dem Bau einer Betriebsanlage begonnen. Sie wird im wesentlichen nach dem gleichen Prinzip wie die Versuchsanlage in ihrer letzten Version arbeiten. Mit dem Betriebsbeginn wird für Anfang 1971 gerechnet. In Abb. 8 ist das Schaltschema der neuen Anlage dargestellt.

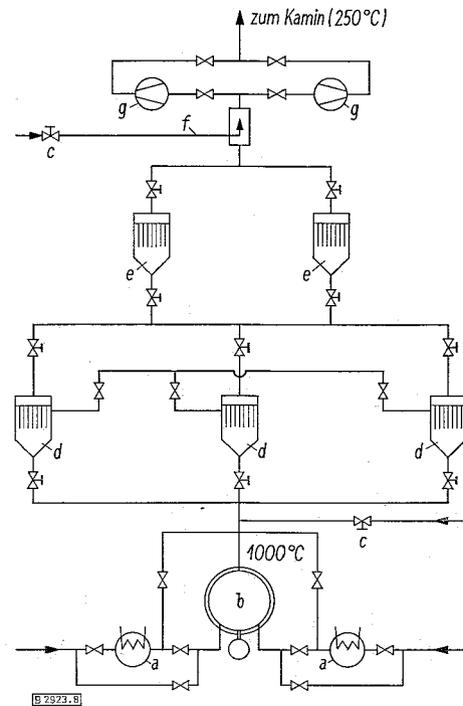


Abb. 8. Schaltschema der neuen Veraschungsanlage (Leistung: 50 bis 60 kg/h).

a Windvorwärmer, b Ofen, c Windbeimischung, d keramische Grobfilter, e keramische Feinfilter, f Mischstrecke, g Gebläse, je 6000 m<sup>3</sup>/h (1 × Reserve).

Der Durchsatz der neuen Veraschungsanlage soll 50 kg/h betragen. Der Feuerraum wird wesentlich vergrößert. Durch eigene Luftvorwärmer sollen die Nachverbrennungskammern mit den keramischen Filterkerzen auf 400°C aufgeheizt werden können. Auf Kühler wird zunächst ganz verzichtet. Es ist vielmehr vorgesehen, die Ofenabluft durch Vermischen mit Frischluft auf etwa 250°C abzukühlen und mit dieser Temperatur in den Schornstein abzuleiten. Der Schornstein wird eine Höhe von 70 m haben und besteht aus Beton mit einer säurefesten Auskleidung.

In das neue Gebäude werden auch die bisher verwendete Paketierpresse sowie die Boxen zur Filterzerkleinerung und zur Sortierung der festen radioaktiven Abfälle umgesetzt. Neu hinzu kommt eine Faßreinigungsanlage, in der sowohl die entleerten als auch die für den Abtransport in das Endlager vorbereiteten Fässer gereinigt werden sollen.

Da der jetzt vorhandene Bunker künftig weder in seiner Größe noch in seiner Abschirmung ausreichen dürfte, wird das Veraschungsgebäude noch einen Bunker für höher aktive Abfälle sowie eine Heiße Zelle zur Behandlung und Zerkleinerung höher aktiver, sperriger Abfälle erhalten.

Die Autoren möchten an dieser Stelle darauf hinweisen, daß die Form des Ofens auf Arbeiten des inzwischen in den Ruhestand getretenen Mitarbeiters Herrn *H. Stollberg* zurückzuführen ist. Seine Verdienste sollen hier nachdrücklich hervorgehoben werden.

Eingegangen am 17. Februar 1970 [B 2923]

## Literatur

- [1] *H. Krause, F. Perzl*, Behandlung und Beseitigung radioaktiver Abfälle, Haus der Technik-Vortragsveröffentlichungen, Heft 214, S. 70 [1969].
- [2] *H. Krause, H. Stollberg, W. Hempelmann*, Treatment of low-level solid waste at the Karlsruhe Nuclear Research Centre. Proc. Symp. on Practices in the Treatment of Low- and Intermediate-Level Radioactive Wastes, Internat. Atomenergiebehörde, Wien 1965, STI/PUB/116, S. 699, 1966.
- [3] *H. Krause*, Brennstoff · Wärme · Kraft 21, 485 [1969].
- [4] *L. Silverman*, Disposal of low-level combustible solid wastes by incineration, Proc. Symp. on Practices in the Treatment of Low- and Intermediate-Level Radioactive Wastes, Internat. Atomenergiebehörde, Wien 1965, STI/PUB/116, S. 89, 1966.
- [5] *R. H. Burns, G. W. Clare, A. J. Smith, D. A. Dunkason*, Treatment of low-level solid wastes at the Atomic Energy Research Establishment, Harwell, Proc. Symp. on Practices in the Treatment of Low- and Intermediate-Level Radioactive Wastes, Internat. Atomenergiebehörde, Wien 1965, STI/PUB/116, S. 639, 1966.
- [6] *J. Rodier, G. Lefillatre, R. Estournel*, Incinération industrielle des déchets radioactifs, Bilan technique et financier, Proc. Symp. on Practices in the Treatment of Low- and Intermediate-Level Radioactive Wastes, Internat. Atomenergiebehörde, Wien 1965, STI/PUB/116, S. 663, 1966.
- [7] *N. van de Voorde, E. Hoffmann*, Gestion de la Station de Traitement des Déchets Radioactifs à Mol, Proc. Symp. on Practices in the Treatment of Low- and Intermediate-Level Radioactive Wastes, Internat. Atomenergiebehörde, Wien 1965, STI/PUB/116, S. 527, 1966.
- [8] *H. Krause, O. Nentwich*, diese Ztschr. 40, 301 [1968].