

KfK 3825
Januar 1985
(1. Ex.)

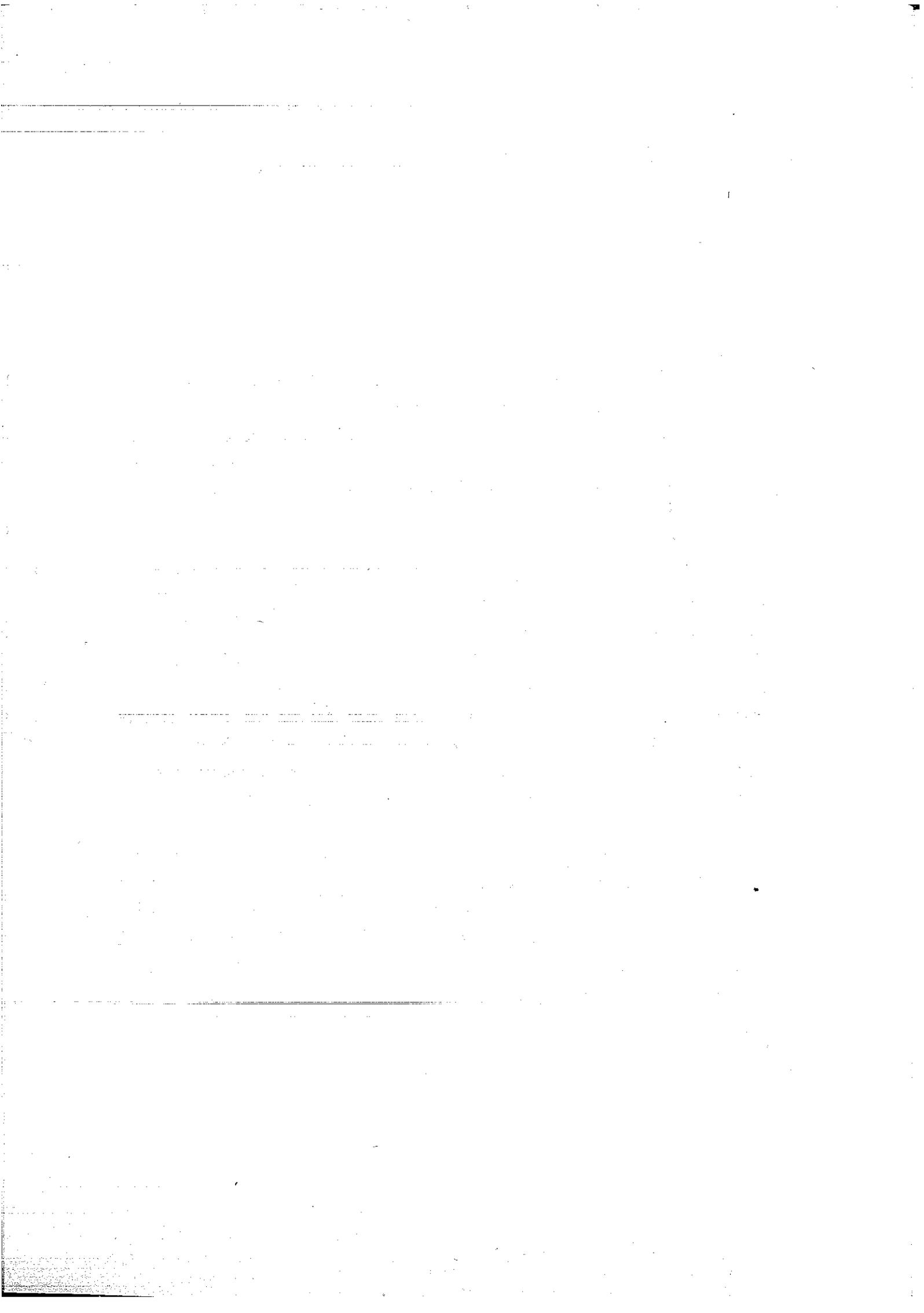
Optimierung der Aktivitätsbeladung von schwach- und mittelaktiven Abfallgebinden

**Beschreibung des Programmpakets
PROMAX mit Anwendungsrechnungen**

**W. Hauser
Institut für Nukleare Entsorgungstechnik**

Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH
Zentralbibliothek

Kernforschungszentrum Karlsruhe



KERNFORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE

Institut für Nukleare Entsorgungstechnik

KfK 3825

Optimierung der Aktivitätsbeladung von schwach-
und mittelaktiven Abfallgebinden

- Beschreibung des Programmpakets PROMAX mit
Anwendungsrechnungen -

Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH
Zentralbibliothek

W. Hauser

Büroexemplar Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH	Nr. 2
---	----------

Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe

Als Manuskript vervielfältigt
Für diesen Bericht behalten wir uns alle Rechte vor

Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH
ISSN 0303-4003

Optimierung der Aktivitätsbeladung von schwach- und mittelaktiven Abfallgebinden

- Beschreibung des Programmpakets PROMAX mit Anwendungsrechnungen -

Zusammenfassung

Bei der Konditionierung radioaktiver Abfälle wird die spezifische Aktivität der Abfallprodukte zumeist durch die Abschirmung des Behälters bzw. die Selbstabschirmung des Produkts begrenzt. Für die Zwischen- und Endlagerung der Abfälle ist es aus Kostengründen (Lagerrauminimierung) vorteilhaft, die gegebenen Verpackungen so zu befüllen, daß die vorgeschriebenen Dosisleistungsgrenzwerte jeweils erreicht, aber nicht unter- oder überschritten werden.

Das beschriebene BASIC-Programmpaket PROMAX, bestehend aus 15 unabhängigen Einzelprogrammen, jedes für einen Verpackungstyp, berechnet unter Eingabe der Nuklidnamen und der Aktivitätsanteile (abfallspezifische Aktivitätszusammensetzung) die maximale spezifische Aktivität (Ausgabe) des Endabfallprodukts für die vorgegebenen Dosisleistungsgrenzwerte. Es werden die im Kernforschungszentrum Karlsruhe verwendeten Verpackungen für schwach- und mittelradioaktive Abfälle, wie unabgeschirmte 200/400 l-Fässer, Stahlblechcontainer, Einzelbetonabschirmungen für 200/400 l-Fässer, Betoncontainer und ein Stahlgußbehälter zugrunde gelegt.

Aufgrund der Berechnungen kann für einen zu konditionierenden Abfall die geeigneteste Verpackung ausgewählt und gegebenenfalls eine Vorschrift zur Aufkonzentrierung oder Mischung unterschiedlicher Abfälle gegeben werden. Der vorliegende Bericht beschreibt das Rechenverfahren und demonstriert die Anwendung des Programmpakets am Beispiel der Konditionierung verschiedener LAW/MAW-Abfallösungen. Ferner werden die beschriebenen Behälter hinsichtlich ihrer Abschirmeigenschaften diskutiert.

Optimization of Activity Loading of Low and Medium Level Waste Packages

Description of the PROMAX Program Packet and Calculations for Practical Application

Abstract

In radioactive waste conditioning the specific activity of the waste forms in most cases is limited by the canister shield or the self-shielding of the waste form, respectively. In regard to intermediate storage and disposal of the wastes it is advantageous for cost reasons (minimization of storage space) to fill the provided canisters in such a way that the prescribed dose rate limits are reached in each case but are neither fallen short nor exceeded.

The described BASIC program packet PROMAX, consisting of 15 independent single programs, each one applicable to one type of waste package, calculates the maximum specific activity (output) of the final waste form for the specified dose rate limits with the nuclide names and activity portions (waste specific composition of activity) used as the input. The calculations are based on the packages for low and medium level wastes used at the Karlsruhe Nuclear Research Center, e.g., non-shielded 200/400 l drums, sheet steel containers, single concrete shieldings for 200/400 l drums, concrete containers and a cast steel container.

Based on the calculations the most appropriate package can be selected for a waste to be conditioned and, if applicable, a specification be given for concentrating or mixing various waste types. This report describes the method of calculation and demonstrates the application of the program packet on the example of conditioning various LLW/MLW waste solutions. In addition, the containers described are discussed with a view to their shielding properties.

Inhaltsverzeichnis

	Seite
1. Einleitung und Problemstellung	1
2. Randbedingungen	2
2.1 Behältertypen und ihre Abmessungen	3
2.2 Abfallzusammensetzungen	5
2.2.1 Beschreibung der Abfallprodukte	5
2.2.2 Zusammenstellung der in typischen LAW/MAW-Abfällen enthaltenen gammastrahlenden Radionuklide	5
2.3 Transport- und Einlagerungsvorschriften für Abfallgebinde	6
3. Beschreibung des Rechenverfahrens	7
3.1 Abschirmberechnungen zur Erstellung der Datensätze	8
3.2 Ermittlung der aktivitätsbegrenzenden Dosisleistungswerte	10
4. Handhabungsbeschreibung des Programmpakets PROMAX	12
4.1 Rechnertyp, Programmlänge und Speicherplatzbedarf	13
4.2 Programmaufruf, Ein- und Ausgabe	13
5. Anwendung des Rechenverfahrens bei der Zementierung radioaktiver Abfalllösungen	14
5.1 Berechnung der Maximalaktivität verschiedener Gebindetypen	15
5.2 Mischen von LAW- mit MAW-Abfalllösungen	18
5.3 Erfüllung der Transportvorschriften nach längerer Zwischenlagerung der Abfallgebinde	19
5.4 Genauigkeit des Verfahrens	20
6. Schlußfolgerungen	21

	Seite
7. Literaturverzeichnis	24
Tabellen, Abbildungen	27
Anhang A: Rechenausdruck des Programms FAS200	45
Anhang B: Programmlisten des Programmpakets PROMAX	

Anhang B ist auf Anfrage über die Abteilung Patente und Lizenzen des Kernforschungszentrums Karlsruhe GmbH, Postfach 3640, 7500 Karlsruhe 1 erhältlich.

1. Einleitung und Problemstellung

Für den Transport und die Endlagerung von radioaktiven Abfällen dürfen nach den Transportvorschriften bzw. nach den zu erwartenden Einlagerungsvorschriften für ein Endlager nur solche Abfallgebinde (Abfallprodukt und Verpackung) verwendet werden, die u.a. bestimmte, die Maximalaktivität in den Abfallgebinden betreffenden Grenzwerte nicht überschreiten.

Bei der Konditionierung schwach- und mittelaktiver Abfälle sind insbesondere die einzuhaltenden Grenzwerte von Dosisleistung an der Oberfläche des Abfallgebundes, Dosisleistung in 1 m bzw. 2 m Abstand von der Behälteroberfläche, Dosisleistung in 3 m Abstand von der Oberfläche des entmantelten Produkts von Bedeutung. Zur Einhaltung dieser vorgeschriebenen Dosisleistungsgrenzwerte darf die Aktivität des Abfallprodukts einen zu bestimmenden Maximalwert nicht überschreiten. Dieser Maximalwert ist abhängig von der Abfallzusammensetzung (Nuklidvektor), dem Abfallprodukt (Produktdichte) und dem Behältermaterial bzw. der Behältergeometrie (Selbstabschirmung des Produkts bzw. Abschirmung des Behälters).

In der Praxis wurde die Dosisleistung nach der Konditionierung und Verpackung der Abfälle d.h. am fertigen Gebinde gemessen. Bei Überschreiten der Dosisleistungsgrenzwerte mußte der Abfallbehälter in eine zusätzliche äußere Abschirmung eingebettet werden. Betriebserfahrungen bzw. Näherungsrechnungen mit Modellzusammensetzungen gaben Anhaltspunkte für die Auswahl des günstigsten Abfallbehälters. Als Folge dieses Verfahrens war die Dosisleistung an vielen Abfallgebinden weit unter den vorgegebenen Grenzwerten. So waren z.B. Abfallfässer mit schwachaktiven Abfällen aktivitätsmäßig unterbelegt und kosten- bzw. raumaufwendige Abschirmungen konnten nicht voll genutzt werden. Dies ergab eine unnötige Erhöhung des Endabfallvolumens.

Aufgrund der Genehmigungssituation für ein Endlager für radioaktive Abfälle in der Bundesrepublik Deutschland sind Lagerzeiten in oberirdischen Zwischenlagern (z.B. bei KfK/HDB als Landessammelstelle oder bei

Kernkraftwerken) von 10 bis 20 Jahren zu veranschlagen. Aus Kostengründen kommt insbesondere hier einer Lagerraumminimierung durch bestmögliche Ausnutzung von Abfallgebinden eine große Bedeutung zu.

Ziel der hier durchgeführten Überlegungen war es, einen Formalismus zu entwickeln, mit dem eine bessere Ausnutzung der Abfallgebinde erzielt und damit Endabfallaufkommen bzw. Kosten reduziert werden können.

Zu diesem Zweck wurde ein für Routinerechnungen im Betriebseinsatz geeignetes Rechenverfahren entwickelt, mit dem bei Vorgabe der Aktivitätszusammensetzung (Nuklidvektor) die maximal mögliche Produktaktivität für einen bestimmten Verpackungstyp unter Einhaltung der Dosisleistungsgrenzwerte berechnet werden kann. Das im vorliegenden Bericht beschriebene Verfahren setzt die Kenntnis der Aktivitätszusammensetzung des Rohabfalls (z.B. einer Abfallösung) voraus. Sie ist anhand von Probenanalysen bzw. Abbrandrechnungen zu bestimmen und als Nuklidvektor für die Berechnungen vorzugeben. Für ein bestimmtes Endabfallprodukt und einen auszuwählenden Behältertyp kann damit die maximale Aktivitätskonzentration berechnet und die bestmögliche Ausnutzung des Abfallgebindes erzielt werden.

Es ist hervorzuheben, daß sich bei den zunächst für die Bedürfnisse von KfK/HDB entwickelten Rechenprogrammen die berechnete maximale Produktaktivität ausschließlich auf Dosisleistungsgrenzwerte bezieht, die für die Zwischenlagerung der Abfälle im KfK-Zwischenlager und deren Transport in ein Endlager gelten. Eine Aktivitätsbegrenzung in den Abfallprodukten bezüglich der Einhaltung nuklidspezifischer Randbedingungen, wie z.B. Tritiumgehalt, Gehalt an Alpha-Strahlern wird hier nicht betrachtet.

2. Randbedingungen

Obwohl das beschriebene Rechenverfahren für den Betriebseinsatz bei KfK/HDB zur Behandlung radioaktiver Abfälle entwickelt wurde, ist es allgemein bei Institutionen einsetzbar, die sich mit der Behandlung und Zwischenlagerung, dem Transport und der Endlagerung radioaktiver Abfälle be-

schäftigen. Die beschriebenen Rechenprogramme legen die bei KfK/HDB für die Verpackung der Abfälle vorgesehenen Behälter- und Abschirmtypen zugrunde. Deshalb werden im folgenden diese Behältertypen und die darin enthaltenen Abfallprodukte übersichtsweise beschrieben.

2.1. Behältertypen und ihre Abmessungen

Im einzelnen werden folgende Behälter bzw. Verpackungsvarianten betrachtet:

- 200 l-Rollsickenfaß ("BKM-Faß")

Hierbei handelt es sich um ein längsnahtgeschweißtes, innen und außen lackbeschichtetes Faß aus Stahlblech St 1203 mit den in Fig. 1 angegebenen Abmessungen. Das Faß hat einen aufgeschraubten Pilzdeckel. Es ist der Standard-Abfallbehälter bei KfK/HDB, der sowohl als Einzelbehälter als auch als Einsatzbehälter in Beton-/Gußeisenabschirmungen verwendet wird.

- 400 l-Faß

Nach dem Konzept der DWK ist das 400 l Faß der Standard-Abfallbehälter für die geplante Wiederaufarbeitungsanlage für abgebrannte Brennelemente. Fig. 2 zeigt die Geometrie des 400 l Fasses mit verschraubtem Deckel.

- Verlorene Betonabschirmung für ein 200 l-Einsatzfaß

Die in Fig. 3 dargestellte, mit einer Eisenarmierung versehene, verlorene Betonabschirmung (VBA) dient zur zusätzlichen Abschirmung von Abfällen, die in ein 200 l Faß verpackt sind. Hierbei wird das Einsatzfaß in der VBA vollständig mit Beton umgossen. Diese Abschirmung gibt es in der Ausführung als Normalbetonabschirmung (NBA) und als Schwerbetonabschirmung (SBA) mit Hämatitzusatz im Beton.

- Verlorene Betonabschirmung für ein 400 l-Einsatzfaß

Fig. 4 zeigt die VBA für ein 400 l Einsatzfaß. Bei gleichem Außendurchmesser ist die Wandstärke um 65 mm kleiner und die Außenhöhe um 140 mm größer als bei der 200 l VBA. Ansonsten entspricht der Aufbau dem der 200 l VBA.

- Betoncontainer für 8 Stück 200 l-Einsatzfässer

Der in Fig. 5 gezeigte eisenarmierte Betoncontainer wurde als Abschirm- und Lager-/Transportbehälter für 8 Stck. 200 l Abfallgebinde entwickelt. Hierbei können die Abfallfässer in den Container einbetoniert oder ohne Verfüllung reversibel eingesetzt und mit dem Betondeckel verschlossen werden. Weiterhin ist vorgesehen, zur besseren Gebindeausnutzung Abfälle direkt, d.h. ohne Einsatzfässer, in den Container einzubringen. Hierbei wird das Innenvolumen des Containers mit 3,17 m³ vollständig mit Abfallprodukt befüllt. Den Container gibt es sowohl in Normal- (NBC) als auch in Schwerbetonausführung (SBC).

- Stahlblechcontainer

Derzeit befindet sich ein lackbeschichteter Stahlblechcontainer mit den gleichen Außenabmessungen wie der Betoncontainer in der Entwicklung (Fig. 6). Er ist für Schwachaktivabfälle vorgesehen, die keine zusätzliche Abschirmung erforderlich machen.

Stahlblech- wie Betoncontainer werden in Zukunft sicher mehr Bedeutung gewinnen und nach und nach die oben beschriebenen Rundbehälter ersetzen, da hiermit eine bessere Lagerraumausnutzung erzielt werden soll.

- Gußbehälter

Fig. 7 zeigt die Geometrie des bei KfK/HDB verwendeten Sphärogußbehälters. Der mit einem Schutzanstrich versehene Behälter besitzt einen aufgeschraubten Gußdeckel mit zusätzlicher Schraubenabdeckung. Er ist

sowohl zur Aufnahme von radioaktiven Abfällen in einem 200 l Einsatzfaß, als auch zur direkten Aufnahme der Abfälle ohne Einsatzbehälter geeignet.

2.2. Abfallzusammensetzungen

2.2.1 Beschreibung der Abfallprodukte

Nachfolgende Zusammenstellung umfaßt Abfallprodukte, wie sie insbesondere in KfK/HDB als Einrichtung zur Behandlung radioaktiver Reststoffe aus Großforschungseinrichtungen, Landessammelstellen und der Wiederaufarbeitungsanlage Karlsruhe (WAK) konditioniert und zwischengelagert werden. Ein Großteil dieser Abfälle wird in 200 l-Fässern mit Zement verfestigt und, sofern aus Abschirmgründen erforderlich, zusätzlich in VBA's, Betoncontainer oder Gußbehälter eingebracht. Es ist geplant, in Zukunft auch Stahlcontainer anstatt der 200 l-Fässer zu verwenden.

Hierbei handelt es sich um folgende Rohabfälle:

- Abwässer, Konzentrate, Schlämme,
- Kugel- oder Pulverharze als Filterrückstände aus der Wasserreinigung,
- Verbrennungs- und Pyrolyserückstände wie Aschen, Keramikfiltermaterial und Calziumpyrophosphat aus der Tributylphosphat (TBP)- Zersetzung,
- feste Komponenten, Schrott, Luftfilter, Isoliermaterial, Bauschutt und Erdreich, was soweit möglich kompaktiert wird,
- Strahlenquellen,
- Brennelementhülsen, Strukturteile und Feedklärschlämme.

2.2.2 Zusammenstellung der in typischen LAW/MAW-Abfällen enthaltenen gammastrahlenden Radionuklide

Kriterien für die Auswahl der zu berücksichtigenden Radionuklide sind Konzentration des Radionuklids im Abfall, seine Halbwertszeit, die Strahlenart sowie Energie der Strahlung und Übergangswahrscheinlichkeit.

Für die oben diskutierten radioaktiven Abfälle werden nur Gammastrahler berücksichtigt, die hinreichend häufig vorhanden sind, deren Halbwertszeit nicht zu klein ist und die Gammaquanten mit hinreichend großen Energien ($E \geq 100 \text{ KeV}$) und Häufigkeiten ($H \geq 1\%$) aussenden. Vernachlässigbar und deshalb unberücksichtigt bleiben solche Radionuklide, die Neutronen emittieren (Spontanspaltung) wegen ihrer geringen Konzentration im Abfall sowie reine Alpha- bzw. Betastrahler wegen der kurzen Reichweite dieser Strahlung.

Tab. 1 zeigt eine Zusammenstellung der Radionuklide, die für diese Betrachtungen berücksichtigt wurden. Mit in die Zusammenstellung aufgenommen sind langlebige Mutternuklide (im Vergleich zum Tochternuklid), die reine Betastrahler sind und deren Tochternuklide für die Abschirmbetrachtungen nicht zu vernachlässigen sind.

Das im vorliegenden Bericht beschriebene Rechenverfahren setzt eine homogene Verteilung der Strahler in den Abfallprodukten voraus.

2.3. Transport- und Einlagerungsvorschriften für Abfallgebinde

Für die Konditionierung der Abfallprodukte bzw. für die Befüllung der Abfallbehälter sind neben den Randbedingungen, die die Qualität des Abfallgebundes betreffen (z.B. Wasser/Zement-Wert, ausgehärtetes Produkt, Korrosionsbeständigkeit) zusätzlich Vorschriften für den Transport und die Endlagerung des Abfallgebundes einzuhalten. Dies sind die internationalen IAEA-Transportvorschriften /1/ bzw. die sich darauf beziehenden nationalen Richtlinien für den Transport gefährlicher Güter (Gefahrgutverordnung Straße (GGVS) /2/ und Gefahrgutverordnung Eisenbahn (GGVE) /3/). Es ist zu erwarten, daß die Einlagerungsbedingungen für ein Endlager teilweise schärfere Bestimmungen als diese Transportvorschriften enthalten werden (vgl. z.B.ASSE Einlagerungsbedingungen /4/).

Demnach sind transport- und endlagerfähige Abfallgebinde so herzustellen, daß u.a. vorgegebene Grenzwerte, die die spezifische Aktivität des Abfallprodukts und die Strahlung außerhalb des Gebundes (Dosisleistungs-

grenzwerte) betreffen, eingehalten werden. In der Praxis sind zumeist die Dosisleistungsgrenzwerte bestimmend für das Abfallprodukt. Deshalb sind im vorliegenden Bericht diese Dosisleistungsgrenzwerte als Maß für die Aktivitätsbegrenzung der beschriebenen Abfallgebilde betrachtet worden.

Die einzuhaltenden Grenzwerte nach den oben diskutierten Vorschriften sind:

- Dosisleistung an der Oberfläche des Abfallgebildes
 $\dot{D}(0 \text{ m}) \leq 200 \text{ mrem/h (2 mSv/h) /1, 2, 3/}$
- Dosisleistung in 2 m Abstand von der Oberfläche des Abfallgebildes
 $\dot{D}(2 \text{ m}) \leq 10 \text{ mrem/h (0,1 mSv/h) /1, 2, 3/ (nur bei Containern).}$
- Dosisleistung in 1 m Abstand von der Oberfläche des Abfallgebildes
 $\dot{D}(1 \text{ m}) \leq 10 \text{ mrem/h (0,1 mSv/h) (Betriebsgenehmigung des KfK-Zwischenlagers sowie /1 - 4/).}$
- Zusätzlich bei abgeschirmten Einheiten wie VBA's, Betoncontainern, Gußbehältern:
Dosisleistung in 3 m Abstand von der Oberfläche des entmantelten Produkts
 $\dot{D}(3 \text{ m}) \leq 1 \text{ rem/h (10 mSv/h) /5/}.$

Bei Zulassung von abgeschirmten Einheiten als Typ B-Verpackung (z.B. Falltests, Brandversuche) /1/, was insbesondere für die beschriebenen Gußbehälter in Betracht kommt, muß der obengenannte Dosisleistungsgrenzwert in 3 m Abstand nicht eingehalten werden.

3. Beschreibung des Rechenverfahrens

Für die Berechnung von Strahlenintensitäten außerhalb großvolumiger Zylinderquellen werden im allgemeinen Methoden angewandt, die auf sogenannten Monte-Carlo-Rechenverfahren oder auf Punktintegrationsverfahren /6-9/

basieren. Diese Verfahren erfordern viel Rechenzeit auf einer Großrechenanlage oder benötigen umfangreiche Eingabedaten, die für jedes Rechenproblem neu erstellt werden müssen. Die zumeist unhandlichen Rechenprogramme sind deshalb für den hier diskutierten Anwendungsfall im Betriebs-einsatz, bei ständig sich ändernder Zusammensetzung der Quellstärke (Nuklidspektrum des Abfalls) ungeeignet.

Im vorliegenden Fall wurde ein Punktintegrationsrechenverfahren /8/ für ein vorgegebenes normiertes Nuklidspektrum (Gleichverteilung) und eine vorgegebene Behälter-/Abschirmgeometrie nur zur Berechnung der Dosisleistung für jedes Einzelnuclid angewandt. Die damit berechneten normierten nuklidspezifischen Dosisleistungen wurden als Datensätze in einfache BASIC Rechenprogramme eingebaut. Hierbei wurde für jede Behälter-/Abschirmgeometrie ein getrenntes Rechenprogramm mit Datensatz erstellt. Hiermit wird durch Eingabe des Nuklidvektors die Maximalaktivität für feste Dosisleistungswerte berechnet.

3.1 Abschirmberechnungen zur Erstellung der Datensätze

Die Abschirmberechnungen zur Erstellung der Datensätze wurden mit dem Fortran IV-Rechenprogramm HAGAM4 auf der IBM 3033 des KfK durchgeführt. Dieses Rechenprogramm ist eine Weiterentwicklung eines KfK/HS Rechenprogramms /10/ und basiert auf der Integrationsmethode nach Rockwell /8/. Es berechnet die Gammadosisleistung außerhalb von homogenen Zylinderquellen für vorgegebene Quellstärken.

Im allgemeinen werden nach dieser Methode Abschirmberechnungen durchgeführt, bei denen eine aus mehreren Radionukliden zusammengesetzte Strahlenquelle zur Minimierung des Rechenaufwandes mit wenigen Energielinien angenähert wird. Im vorliegenden Fall, wo sich die Strahlenquelle aus den in Tab. 1 zusammengestellten $N = 34$ Radionukliden zusammensetzt (Gammastrahler), wurden für jedes Radionuklid n_i und insgesamt 195 Energielinien berücksichtigt.

Die Dosisleistung \dot{D} in einem Aufpunkt außerhalb der Volumenquelle addiert sich aus den Einzelbeiträgen \dot{D}_{ij}

$$\dot{D} = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{n_i} \dot{D}_{ij}$$

mit N = Anzahl der Radionuklide, n_i = Anzahl der Gamma-Linien für das Radionuklid i .

\dot{D}_{ij} ist proportional zur Aktivität A_i und neben der Quellengeometrie abhängig von

$$\dot{D}_{ij} = \dot{D}_{ij} (E_j, H_j, U_j, A_i, (\mu/\rho)_{jk}, B_{jk}, \rho_K)$$

Hierbei sind

- E_j = Energie der Gamma-Linie j
- H_j = Häufigkeit der Gamma-Linie j
- U_j = energieabhängiger Umrechnungsfaktor
- A_i = spezifische Aktivität des Radionuklids i
- $(\mu/\rho)_{jk}$ = Massenabsorptionskoeffizient der Gamma-Linie j für den Absorber K
- B_{jk} = energieabhängiger Dosisaufbaufaktor für den Absorber K
- ρ_K = spezifisches Gewicht des Absorbers K

Der Dosisaufbaufaktor B_{jk} , der den Dosisaufbau durch Streuung der Gamma-Strahlung beschreibt, wird durch Summation zweier Exponentialfunktionen gemäß /8/ angenähert.

$$B_{jk} = A_1 \cdot e^{-\alpha_1 \mu x} + (1-A_1) \cdot e^{-\alpha_2 \mu x}$$

A_1, α_1, α_2 sind dabei energie- bzw. absorbermaterialabhängige Parameter, wobei x und μ Dicke und Absorptionskoeffizient des Absorbers sind.

Die beschriebenen Daten sind der Literatur /8, 11-13/ entnommen und für die hier benötigten Quellen-/Absorbermaterialien als Datensätze im Fortran-Programm HAGAM4 gespeichert. Bei den Berechnungen wurde das spezifische Gewicht der Abfallprodukte (Papierabfälle, Schüttgut, Bitumen-/Zementprodukte mit Metallteilen) von 0,15 bis 5,0 g/cm³ als Parameter variiert unter Berücksichtigung der Selbstabschirmung der Strahlenquelle.

Tab. 2 zeigt eine Zusammenstellung der in den Abschirmberechnungen verwendeten Geometriedaten der Behälter. Da das Berechnungsverfahren auf Zylindergeometrie beruht, mußten die quaderförmigen Stahlblech- und Betoncontainer (ohne Einsatzfässer) durch jeweils eine Zylinderquelle mit gleichem Stirnflächenquerschnitt angenähert werden.

Im Fall der Beton-Container mit acht 200 l Einsatzfässern haben Testrechnungen gezeigt, daß die Strahlenquelle nicht als ein homogener Zylinder mit äußerer Betonabschirmung betrachtet werden kann. Gemäß Fig. 5 mußte bei den Berechnungen die Aneinanderreihung der Zylinderquellen durch Summation der Einzelbeiträge des Strahlenflusses in einem Aufpunkt mit berücksichtigt werden. Hierbei wird vorausgesetzt, daß alle acht Einsatzfässer untereinander identische Strahlenquellen und nicht in den Container einbetoniert sind.

Durch Vorgabe des auf das Abfallprodukt bezogenen Aktivitätsvektors $A = (A_1, \dots, A_N)$ mit den Elementen $A_i = 1 \text{ Ci/l}$ ($3,7 \cdot 10^{10} \text{ Bq/l}$) für jedes Einzelnuclid wurde für die oben diskutierten Behältervarianten der Dosisleistungsvektor $\dot{D} = (\dot{D}_1, \dots, \dot{D}_N)$ für die Aufpunkte an der Behälteroberfläche, in 1 m Abstand von der Oberfläche bzw. in 3 m Abstand vom entmantelten Produkt berechnet.

3.2. Ermittlung der aktivitätsbegrenzenden Dosisleistungswerte

Es wurden zunächst eine Reihe von Testrechnungen durchgeführt mit dem Ziel, die aktivitätsbegrenzenden Dosisleistungswerte zu ermitteln. Hierzu wurde der für Wagenladungen und Container gültige Dosisleistungsgrenzwert in 2 m Abstand $\dot{D}(2 \text{ m}) = 10 \text{ mrem/h}$ ($0,1 \text{ m Sv/h}$) /1, 2, 3/ durch den restriktiveren Wert $\dot{D}(1 \text{ m}) = 10 \text{ mrem/h}$ gemäß Umgangsgenehmigung für das KfK-Zwischenlager und /4/ ersetzt.

Die Berechnungen haben gezeigt, daß bei Einhaltung von $\dot{D}(1\text{ m}) = 10\text{ mrem/h}$ in 1 m Abstand von der Behälteroberfläche bei den hier gegebenen Geometrien (Tab. 2) unabhängig vom Nuklidspektrum die Bedingung Oberflächendosisleistung $\dot{D}(0\text{ m}) \leq 200\text{ mrem/h}$ (2 mSv/h) immer erfüllt ist. Hierzu zeigt Fig. 8 für verschiedene Behältervarianten am Beispiel einer Gamma-Energie von $E_{\text{Gamma}} = 0,8\text{ MeV}$ (dies entspricht näherungsweise einer mittleren Gamma-Energie typischer LAW/MAW-Abfallgebinde) die Dosisleistung als Funktion des Abstandes von der Behälteroberfläche, wenn immer die Bedingung $\dot{D}(1\text{ m}) = 10\text{ mrem/h}$ erfüllt ist. Beim 200 l Abfallfaß, das geometrisch den ungünstigsten Fall darstellt, wird nach Fig. 8 eine Oberflächendosisleistung von $\dot{D}(0\text{ m}) = 140\text{ mrem/h}$ ($1,4\text{ mSv/h}$) erreicht. Mit zunehmendem Behälter-/Abschirmvolumen sinkt $\dot{D}(0\text{ m})$ und erreicht im Falle des Schwerbetoncontainers mit acht 200 l Einsatzfässern nur noch 22 mrem/h ($0,22\text{ mSv/h}$).

Für die abgeschirmten Gebinde (Verlorene Betonabschirmungen, Betoncontainer und Gußbehälter) muß zusätzlich der Grenzwert $\dot{D}(3\text{ m}) \leq 1\text{ rem/h}$ (10 mSv/h) in 3 m Abstand von der dazugehörigen unabgeschirmten Einheit eingehalten werden. Als unabgeschirmte Einheit wird im Falle der Abschirmungen für Einzelbehälter (Normal-/Schwerbetonabschirmungen, Gußbehälter) der jeweilige Einsatzbehälter (z.B. ein 200 l Einsatzfaß) und für den Fall der Betoncontainer die eingesetzte Behälterkombination bestehend aus acht 200 l Fässern (geometrische Anordnung siehe Fig. 5) bzw. der konditionierte Innenraum betrachtet. Hierzu ist zusammenfassend festzuhalten:

- Bei allen Normalbetonabschirmungen sowie bei den Schwerbetonabschirmungen für 400 l Fässer ist immer $\dot{D}(1\text{ m})$ die begrenzende Größe.
- Für die Schwerbetonabschirmungen für 200 l Fässer (Einzelabschirmungen, Container) sowie für die Schwerbetoncontainer, die ohne Einsatzfässer verwendet werden, ist bei den für LAW/MAW-Abfälle typischen mittleren Gamma-Energien von i.a. $E_{\text{Gamma}} = 0,5$ bis $0,8\text{ MeV}$ auch $\dot{D}(1\text{ m})$ aktivitätsbestimmend. Lediglich für sehr niedrige mittlere Gamma-Energien im Abfall, d.h. für $E_{\text{Gamma}} \leq \text{ca. } 0,3\text{ MeV}$ ist der Dosisleistungswert für die unabgeschirmte Einheit $\dot{D}(3\text{ m})$ begrenzend.

- Bei Verwendung des Stahlgußbehälters (Fig. 7) als zusätzliche Abschirmung für ein 200 l Einsatzfaß wird die aktivitätsbestimmende Größe immer durch die Dosisleistung in 3 m Abstand von unabgeschirmten 200 l Einsatzfaß \dot{D} (3 m) gegeben. Lediglich bei Zulassung des Gußbehälters als Typ B-Verpackung /1/ entfällt dieser Grenzwert. Dann wird die wesentlich höher liegende Maximalaktivität im Behälter durch \dot{D} (1 m) bestimmt.

Die hier für die Lagerung im KfK-Zwischenlager und den Transport der Abfallbehälter durchgeführten Überlegungen machen deutlich, daß es für die Behältertypen ohne Einsatzbehälter genügt, Rechenprogramme allein für die Bedingung \dot{D} (1 m) = 10 mrem/h zu erstellen. Lediglich bei den beschriebenen Schwerbeton/Gußeisenabschirmungen mit Einsatzbehältern muß die Zusatzbedingung für die unabgeschirmte Einheit \dot{D} (3 m) = 1 rem/h mit in die Rechenprogramme eingearbeitet werden.

Die vorgestellten Rechenprogramme sind allgemein gültig, außer für die beschriebenen Container. Hier wäre außerhalb KfK \dot{D} (2 m) mit in die Überlegung einzubeziehen.

4. Handhabungsbeschreibung des Programmpakets PROMAX

Das aufgrund der vorhergehenden Überlegungen erstellte Programmpaket PROMAX besteht aus insgesamt 15 voneinander unabhängigen Einzelprogrammen. Hierbei können Berechnungen für jeweils bis zu 34 vorgegebene Radionuklide (Tab. 1) durchgeführt werden. Eine Zusammenstellung der Rechenprogramme findet sich in Tab. 3. Die Programme beziehen sich auf die in Fig. 1-7 und Tab. 2 beschriebenen Behälter bzw. Behälterkombinationen. Für die Berechnung der Gesamtaktivität im Behälter werden dabei die angegebenen Nutzvolumina berücksichtigt. Zur besseren Handhabbarkeit ist bei den Programmen für Behälterkombinationen mit zusätzlicher Abschirmung (z.B. NBA200) die Bedingung \dot{D} (3 m) = 1 rem/h (10 mSv/h) von der unabgeschirmten Einheit nicht mit eingebaut worden. Für die jeweils dazugehörigen unabgeschirmten Einheiten wurden deshalb die Einzelprogramme FAS201, FAS208 und BECON1 erstellt.

4.1. Rechnertyp, Programmlänge und Speicherplatzbedarf

Die Rechenprogramme wurden in Standard-BASIC erstellt und können auf geeigneten Kleinrechnern/Personal-Computern mit BASIC-Interpreter bzw. BASIC-Compiler implementiert werden. Bis jetzt existieren lauffähige Versionen für die Rechner Dietz 621 und IBM 5110 (Personal-Computer). Für diese Rechner liegen Floppy Disks bzw. Bandcassetten mit allen Einzelprogrammen vor. Es ist geplant, die Programme auch auf Personal-Computern der Firma Hewlett Packard (z.B. HP 9816) zu implementieren.

Jedes der 15 Einzelprogramme hat ca. 180 Anweisungen. Dies erfordert auf einem Rechner wie der Dietz 621 (Betriebssystem TSOS) einen Hauptspeicherplatzbedarf pro Rechenprogramm von ca. 8,3 KBytes (incl. Felder).

4.2. Programmaufruf, Ein- und Ausgabe

Anhand folgenden Beispiels werden Programmaufruf, Ein- und Ausgabe auf der Dietz 621 mit Betriebssystem TSOS erläutert. Die Eingabe erfolgt hier im Dialog-Verfahren über ein Eingabeterminal. Mit einem geeigneten Betriebssystem ist jedoch auch Stapelbetrieb möglich.

Es soll die Maximalaktivität für ein 200 l Abfallfaß bei Vorgabe des Nuklidvektors Mn-54: 10%, Co-60: 70%, Cs-134: 20% (Angaben in Aktivitäts-%) berechnet werden.

Die einzelnen Schritte sind:

- Laden des BASIC-Interpreters:

```
DIAL
*BASIC

*** BASIC-06.02 *** 12 USER ***
READY
```

- Aufruf des Programms FAS200 von Unit 3 (Floppy-Laufwerk):

```
*LOA,3,FAS200
```

- Programmstart:

```
READY
*RUN
BEGIN
```

- Dateneingabe:

```
AUSGABEEINHEIT : DEVICE = ?3
```

```
ANZAHL DER NUKLIDE N = ?3
```

```
NUKLID , AKTIVITAETSANTEIL A(PROZENT) : PMN-054,10.
NUKLID , AKTIVITAETSANTEIL A(PROZENT) : PCO-060,70.
NUKLID , AKTIVITAETSANTEIL A(PROZENT) : PCS-134,20.
```

```
READY
```

```
*
```

Hierbei sind die in Tab. 1 dargestellten 6-stelligen Nuklidbezeichnungen (Text-Strings) zu verwenden.

Im vorliegenden Beispiel erfolgt die Ausgabe über die Ausgabeeinheit DEVICE 3 (Matrixdrucker). Die dazugehörige Ausgabeliste findet sich im Anhang A. Der Ausdruck ist selbsterläuternd.

Sowohl die Eingabe als auch die Ausgabe sind bei Aufruf der anderen Programme des Programmpakets identisch.

5. Anwendung des Rechenverfahrens bei der Zementierung radioaktiver Abfalllösungen

Im folgenden soll die Anwendung des Rechenverfahrens im Betriebseinsatz bei der Zementierung von MAW/LAW-Konzentraten demonstriert werden. Weiterhin werden zusätzliche Möglichkeiten zur Einsparung von Lagervolumen

durch Mischen von Abfalllösungen unterschiedlicher Aktivitätskonzentrationen (z.B. MAW mit LAW) bzw. durch definierte Aktivitätsüberladung von Abfallgebinden aufgezeigt.

Tab. 4 zeigt die Aktivitätszusammensetzung verschiedener MAW/LAW-Konzentrate, die bei KfK/HDB im Jahr 1983 konditioniert wurden. Hierbei handelt es sich um Konzentrate aus dem Betrieb der WAK (MAW-004, MAW-005, LAW-007) bzw. aus dem KfK/Institut für Heiße Chemie (MAW-IHCH). Die hier dargestellten Aktivitätszusammensetzungen wurden an Laborproben gamma-spektrometrisch (Spaltprodukte) bzw. durch Messung des Gesamtalphagehalts und mit Abbrandrechnungen /14/ (Aktinidennuklide) bestimmt.

Die von KfK/HDB /15/ ermittelten Zusammensetzungen werden zur Demonstration des Rechenverfahrens herangezogen.

5.1. Berechnung der Maximalaktivität verschiedener Gebindetypen

Am Beispiel der für eine Wiederaufarbeitungsanlage typischen MAW-Abfallzusammensetzung MAW-004 (Prozeß-MAW) sind in Tab. 5 die berechneten spezifischen Aktivitäten für die bei KfK/HDB verwendeten Behältertypen mit einem zementierten Abfallprodukt (Produktdichte $\rho = 2 \text{ g/cm}^3$) dargestellt. Hierbei sind die Berechnungen mit den entsprechenden BASIC-Programmen (Tab. 3) für die Bedingungen $\dot{D}(1 \text{ m}) = 10 \text{ mrem/h}$ ($0,1 \text{ mSv/h}$) in 1 m Abstand vom Gebinde und $\dot{D}(3 \text{ m}) = 1 \text{ rem/h}$ in 3 m Abstand vom entmantelten Produkt als Aktivitätsbegrenzung vorgegeben worden. Wie in Kap. 3.2 diskutiert, werden als entmantelte Einheiten für den Fall der Abschirmungen für Einzelbehälter ein 200 l-Faß und für den Fall der Betoncontainer mit 8 Einsatzfässern die Faßkombination bestehend aus 8 in gleicher Weise angeordneten Fässern betrachtet.

Die in der Reihenfolge steigender Aktivitätswerte zusammengestellte Tabelle 5 zeigt, daß bis auf den Gußbehälter die Aktivitätsbegrenzung durch den Wert $\dot{D}(1 \text{ m})$ gegeben ist. Bei der gegebenen Abfallzusammensetzung wird allein der Gußbehälter bei Betrachtung als Abschirmung für einen Typ A-Behälter /1, 5/ durch die Dosisleistung $\dot{D}(3 \text{ m})$ in 3 m Abstand

vom entmantelten Produkt begrenzt. Eine Zulassung dieses Behälters als Typ B-Verpackung /1/ würde eine deutliche Erhöhung der Maximalaktivität (Faktor 28) bedeuten. Vom Behälter für die niedrigste spezifische Aktivität, dem Stahlblechcontainer ausgehend ($A = 5 \cdot 10^{-4}$ Ci/l ($1,9 \cdot 10^7$ Bq/l)), nimmt mit abnehmendem Behältervolumen bzw. zunehmender Behälterabschirmung die spezifische Aktivität zu. Beim Stahlgußbehälter, der die stärkste Abschirmwirkung unter allen Behältertypen aufweist, könnte bei Zulassung als Typ B-Behälter (... und damit Wegfallen der Begrenzung \dot{D} (3 m)) die spezifische Aktivität mit $A = 46,1$ Ci/l ($1,7 \cdot 10^{12}$ Bq/l) das $9 \cdot 10^4$ -fache des Wertes eines Blechcontainers betragen.

Vergleicht man die spezifischen Aktivitäten von Normal- und Schwerbetonabschirmungen (Tab. 5), so stellt man fest, daß bei den Schwerbetonausführungen der Gebinde das ca. 6-fache der Aktivität der gleichen Normalbetonausführung verpackt werden kann (bei Abschirmung für ein 400 l-Faß nur Faktor 3 wegen geringerer Wandstärke). Weiterhin zeigt sich, daß die Schwerbetoncontainer nur eine spezifische Maximalaktivität zulassen, die vergleichbar derjenigen der Normalbetonabschirmung mit 200 l-Einsatzfaß ist.

Die beschriebenen Betoncontainer haben gegenüber Einzelabschirmungen neben kürzeren Handhabungszeiten für das Einlagerungspersonal u.a. den Vorteil einer besseren Lagerraumausnutzung bezogen auf gleiches Nutzvolumen. So benötigen Betoncontainer mit 8 Stück 200 l-Einsatzfässern gegenüber 8 Einzelabschirmungen mit jeweils einem 200 l-Einsatzfaß ca. halb soviel Lagerraum. Diese Vorteile werden jedoch wesentlich geschmälert durch die um den Faktor 4,5 mögliche höhere Maximalaktivität (bei Konzentrat MAW-004) der jeweiligen Einzelabschirmungen. Bei Abfällen mit höheren mittleren Gamma-Energien, wie Kernkraftwerksabfällen (höherer Co-60 Anteil) ist dieser Unterschied noch bedeutender. Aus diesem Grunde ist, wie aus Tab. 5 ersichtlich, die Schwerbetonabschirmung mit 200 l-Einsatzfaß weiterhin als sinnvolle Ergänzung für diejenigen Abfälle anzusehen, die aufgrund ihrer hohen spezifischen Aktivität nicht ohne vermischt zu werden in die beschriebenen Schwerbetoncontainer konditioniert werden können.

Wie die Rechenergebnisse am Beispiel der Zusammensetzung MAW-004 jedoch insgesamt zeigen, bieten die beschriebenen Behältertypen eine gute Voraussetzung zur Lagerrauminimierung, da für eine Optimierung der Gebindeausnutzung ein breiter Aktivitätsbereich für die unterschiedlichsten Endabfallprodukte überdeckt werden kann.

Bei den vorgestellten Berechnungen für die verschiedenen Gebindetypen wird die maximale Aktivitätskonzentration durch die Selbstabschirmung des Abfallprodukts bzw. die Abschirmwirkung des Behälters bestimmt. Für die Selbstabschirmung ist es von Bedeutung, welches Abfallprodukt, und damit welche Endprodukt-dichte, vorliegt. Hierzu ist in Fig. 9 die berechnete maximale Aktivitätskonzentration A für ein unabgeschirmtes 200 l-Abfallfaß in Abhängigkeit von der Produktdichte für die Zusammensetzung MAW-004 aufgetragen. Es sind Produktdichten für Papier-/Kunststoffabfälle ($\rho = 0,2 \text{ g/cm}^3$) über Bitumen- und Zementsteindichten ($1,3 \leq \rho \leq 2 \text{ g/cm}^3$) bis hin zu Dichten von Metallschüttgütern ($2 \leq \rho \leq 4 \text{ g/cm}^3$) in den Rechenprogrammen berücksichtigt. Der Kurvenverlauf von Fig. 9 demonstriert, daß für hohe Aktivitätsbelastungen von Abfallgebinden möglichst hohe Endprodukt-dichten anzustreben sind. So ergibt sich allein aufgrund der größeren Dichte für ein Zementprodukt eine um ca. 40% höhere Aktivitätskonzentration bei festem \dot{D} (1 m) als für ein Bitumenprodukt.

Für die Abschirmwirkung der Abfallgebinde ist neben den geometrie- und materialspezifischen Daten die Aktivitätszusammensetzung des Abfalls und damit die Energie und Häufigkeit der emittierten Gamma-Strahlung maßgebend. So bewirken selbst aktivitätsmäßig geringste Mengen von Co-60, das eine relativ hohe mittlere Gamma-Energie von 1,3 MeV (Häufigkeit 100%) hat, einen nicht zu vernachlässigenden Anteil an der Gesamtdosisleistung insbesondere bei dickwandigen Abschirmungen. Dies wird durch Tab. 6 für die Zusammensetzung MAW-004 quantitativ belegt. Obwohl an der Gesamtaktivität nur ca. 0,2% Co-60 vorhanden sind, ist der Dosisleistungsanteil dieses Radionuklids beim unabgeschirmten 200 l-Faß 2,4% und beim Stahlgußbehälter sogar 20% der Gesamtdosisleistung in 1 m Abstand von der Behälteroberfläche. Dahingegen ist das mit jeweils 17% Aktivitätsanteil relativ stark in diesem Abfall vertretene Sr-90 (Beta-Strahler) und Y-90

($E_{\text{Gamma}} = 1,7 \text{ MeV}$, Häufigkeit 0,01%) in Bezug auf die Dosisleistung bei beiden Behältertypen zu vernachlässigen. Insgesamt gesehen, ist die Dosisleistung der Gebinde bei dieser MAW-Zusammensetzung durch die Radionuklide Cs-134 und (Cs-137/) Ba-137 m bestimmt. Eine Abtrennung dieser Radionuklide aus der MAW-Abfalllösung würde damit eine wesentliche Dosisentlastung der Gebinde bedeuten /16, 17/.

5.2. Mischen von LAW- mit MAW-Abfallösungen

Die nach der Konditionierung an Abfallgebinden durchgeführten Dosisleistungsmessungen haben bisher gezeigt, daß für einen gegebenen Behältertyp (z.B. Schwerbetoncontainer) grundsätzlich bei den volumenmäßig stark vertretenen LAW-Konzentraten eine zu niedrige spezifische Aktivität und bei MAW-Konzentraten eine zu hohe spezifische Aktivität der Zementprodukte vorlag. So wurde bei den aktivitätsmäßig nicht voll genutzten LAW-Gebinden unnötig Lagervolumen vergeben. Eine Aufkonzentrierung ist aufgrund der Verschlechterung der Produkteigenschaften durch zu hohen Salzgehalt zumeist nicht möglich. Die MAW-Gebinde würden hingegen zusätzliche Abschirmungen erfordern. Dies führte zu dem Gedanken, LAW- mit MAW-Konzentraten zu vermischen, um so ein bezüglich der Produkteigenschaften optimiertes Endprodukt, eine bessere Gebindeausnutzung und eine Reduzierung des Abschirmvolumens zu erreichen.

Die Anwendung der diskutierten Rechenprogramme ermöglicht nun die definierte Einstellung eines Mischungsverhältnisses für einen vorgegebenen Gebindetyp. Hierzu wird die maximale spezifische Aktivität und das Mischungsverhältnis für die Konditionierung eines optimierten MAW/LAW-Mischkonzentrats berechnet. Dies soll in Fig. 10 am Beispiel der Konditionierung des Mischkonzentrats MAW-005/ LAW-007 (Zusammensetzungen siehe Tab. 4) in einen Schwerbetoncontainer mit 8 Stück 200 l-Einsatzfässern demonstriert werden.

Bei der Konditionierung des MAW-Konzentrats MAW-005 würde allein aufgrund der Konditionierungsparameter (z.B. Salzgehalt, Zement-, Konzentratvolumen) ohne Berücksichtigung der Dosisleistungsgrenzwerte eines ge-

gebenen Behälters ein zementiertes Endprodukt mit einer spezifischen Aktivität von 270 mCi/l ($1,0 \cdot 10^{10}$ Bq/l) entstehen (Fig. 10). Berechnet man für diese Zusammensetzung die zur Einhaltung der Dosisleistungsgrenzwerte (Begrenzung ist \dot{D} (1 m)) mögliche maximale spezifische Aktivität für einen Schwerbetoncontainer mit 8 Stück 200 l-Einsatzfässern, so stellt man fest, daß nur eine Aktivitätskonzentration für ein Zementprodukt von 120 mCi/l ($4,4 \cdot 10^9$ Bq/l) zulässig ist. Für das in größerer Menge auftretende LAW-007 hingegen ist die mit den Konditionierungsparametern ermittelte spezifische Aktivität in einem Zementprodukt mit 6 mCi/l ($2,2 \cdot 10^8$ Bq/l) wesentlich niedriger als die berechnete maximal zulässige spezifische Aktivität von 75 mCi/l ($2,8 \cdot 10^9$ Bq/l) für den Schwerbetoncontainer mit 8 Einsatzfässern.

Aufgrund des linearen Zusammenhangs zwischen Aktivitätskonzentration und Abfallanteil (Fig. 10) können die entsprechenden spezifischen Aktivitäten für LAW/MAW-Mischkonzentrate leicht bestimmt werden. Der Schnittpunkt, der aufgrund der aus den Konditionierungsbedingungen ermittelten Geraden mit der die spezifische Maximalaktivität im Schwerbetoncontainer beschreibenden Geraden ergibt das Mischungsverhältnis für das optimierte Konzentrat.

Im vorliegenden Beispiel wird mit einem Mischkonzentrat von 68 Vol.-% LAW-007 und 32 Vol.-% MAW-005 ein zementiertes Abfallprodukt erzielt, das eine spezifische Aktivität von 90 mCi/l ($3,3 \cdot 10^9$ Bq/l) hat. Bei diesem Mischungsverhältnis ist der Dosisleistungsgrenzwert \dot{D} (1 m) erreicht und zusätzlich eine gute Produktqualität durch Einhaltung der Konditionierungsparameter gewährleistet. Somit liegt ein bezüglich der Schwerbetoncontainerausnutzung und Produktqualität optimiertes LAW/MAW-Mischabfallprodukt vor.

5.3 Erfüllung der Transportvorschriften nach längerer Zwischenlagerung der Abfallgebände

Je nach Abfallzusammensetzung klingt die Aktivität in den Gebänden und damit die Dosisleistung aufgrund des radioaktiven Zerfalls mit zunehmenden

dem Abfallalter ab. Dieses Abklingen der Dosisleistung mit dem Alter bzw. mit der Zwischenlagerzeit der Abfallgebinde könnte genutzt werden, indem die Konzentrate so konditioniert werden, daß die diskutierten zulässigen Dosisleistungsgrenzwerte erst nach Beendigung der Zwischenlagerung erreicht werden. Dies hätte eine zusätzliche Einsparung des Bedarfs an Zwischen-/Endlagervolumen zur Folge.

Zur Bestimmung einer möglichen Aktivitätsüberladung der Abfallgebinde zum Zeitpunkt der Konditionierung ist für die in Tab. 4 zusammengestellten Konzentrate das Abklingen der Dosisleistung mit zunehmender Zwischenlagerzeit in Fig. 11 aufgetragen. Hier zeigt sich, daß die Dosisleistung des Abfallkonzentrats MAW-005 und die des LAW/MAW-Mischkonzentrats aufgrund der bestimmenden Anteile an relativ kurzlebigen Radionukliden Ru/Rh-106, Sb-125 am schnellsten abklingen. Der hohe Anteil des Beta-Strahlers Pu-241 ist dabei zu vernachlässigen. Bei der Zusammensetzung MAW-004 hingegen zeigt sich das geringste Abklingen der Dosisleistung.

Die Umrechnung dieser Abhängigkeit auf die maximale Aktivitätskonzentration in Fig. 12 ergibt, daß eine Zwischenlagerzeit von 16-18 Jahren bei den Konzentraten MAW-005, LAW/MAW eine Überhöhung der Aktivitätskonzentration um den Faktor 10 ermöglicht. Deutlich geringer ist der Einfluß bei den Konzentraten MAW-IHCH und MAW-004. Die hier bestimmenden Radionuklide Sr/Y-90, Cs/Ba-137m, Ce/Pr-144 ermöglichen nur eine Erhöhung der Aktivitätskonzentration um den Faktor 2 - 3,5 für eine Zwischenlagerzeit von 15 Jahren.

Die vorgestellten Ergebnisse zeigen, daß abhängig von der Abfallzusammensetzung eine deutliche Erhöhung der Aktivitätskonzentration bei der Konditionierung erzielt werden kann durch Einhaltung der zulässigen Dosisleistungswerte erst nach Beendigung der Zwischenlagerung.

5.4 Genauigkeit des Verfahrens

Die Genauigkeit der berechneten maximalen Aktivitätskonzentration in den Abfallgebinden wird neben der Güte des Rechenverfahrens insbesondere be-

stimmt durch

- die Genauigkeit der Analyse des Rohabfalls (Aktivitätsvektor),
- die Genauigkeit der Konditionierungsgrößen (Mengenangaben),
- die Homogenität des Endabfallprodukts.

Aussagen hierüber lassen sich am besten aufgrund des Betriebseinsatzes des Verfahrens machen. Hierzu ist vorgesehen /15/, für mehrere Abfallgebinde mit Abfällen unterschiedlicher Aktivitätszusammensetzung einen Vergleich zwischen gemessener und mit beschriebenen Rechenverfahren berechneter Dosisleistung durchzuführen. Dieser Vergleich wird bisher noch fehlende Aussagen über die Genauigkeit des Verfahrens ermöglichen.

6. Schlußfolgerungen

Aufgrund umfangreicher Abschirmberechnungen für verschiedene LAW/MAW-Abfallprodukte und Verpackungstypen wurde ein einfaches Rechenverfahren entwickelt. Es erlaubt, Abfallgebinde bezüglich deren Aktivitätsbeladung zu optimieren mit dem Ziel, eine bessere Gebindeausnutzung und damit eine Reduzierung des Lagervolumens zu erreichen. Hierzu wurden insgesamt 15 BASIC-Rechenprogramme erstellt, die jeweils für einen Verpackungstyp die Maximalaktivität berechnen bei Vorgabe der Aktivitätsverteilung des Abfalls und der nach Transportvorschriften (bzw. angenommenen Einlagerungsvorschriften) /1-5/ gültigen Dosisleistungsgrenzwerte außerhalb der Gebinde. Die beschriebenen Rechenprogramme können auf Kleinrechnern mit einer Speicherkapazität von ca. 10 KBytes implementiert werden. Die einfache Ein- und Ausgabe der Daten ermöglicht den Betriebseinsatz der Programme bei Institutionen, die sich mit der Konditionierung, dem Transport und der Lagerung schwach- und mittelradioaktiver Abfälle befassen.

Obwohl sich die Rechenprogramme an die bei KfK/HDB verwendeten Behälter und Abschirmungen anlehnen, kann das Programmpaket mit zusätzlicher Entwicklungsarbeit für weitere Verpackungstypen erweitert werden.

Die zur Erstellung des Programmpakets durchgeführten Berechnungen haben gezeigt, daß für LAW/MAW-Abfallzusammensetzungen mit mittleren Gamma-Energien von 0,5 bis 0,8 MeV bei den beschriebenen Verpackungstypen der Dosisleistungsgrenzwert in 1 m Abstand von der Behälteroberfläche \dot{D} (1 m) = 10 mrem/h (0,1 mSv/h) aktivitätsbestimmend ist. Lediglich bei der Verpackung, die die größte Abschirmung aufweist, d.h. beim Stahlgußbehälter mit 200 l-Einsatzfaß, ist die Aktivitätsbegrenzung durch den Dosisleistungswert in 3 m Abstand vom entmantelten Produkt (unabgeschirmtes Einsatzfaß) \dot{D} (3 m) = 1 rem/h (10 mSv/h) gegeben. Bei Abfallzusammensetzungen mit niedrigeren Gamma-Energien kann dieser Dosisleistungsgrenzwert auch für Schwerbetonabschirmungen aktivitätsbegrenzend sein.

Im vorliegenden Bericht wurde die Anwendung der Rechenprogramme am Beispiel der Zementierung verschiedener Abfallösungen demonstriert. Hierbei wurden die Aktivitätszusammensetzungen an Konzentratproben bei KfK/HDB bestimmt. Die Ergebnisse dieser zur allgemeinen Übersicht durchgeführten Berechnungen lassen zusammenfassend folgende Schlußfolgerungen zu:

- Die mit den Rechenprogrammen ermittelten Maximalaktivitäten ermöglichen eine eingehende Beurteilung der beschriebenen Behältertypen. So konnte z.B. gezeigt werden, daß Betonabschirmungen für ein 200 l-Einsatzfaß eine wesentlich höhere spezifische Produktaktivität als die diskutierten Betoncontainer zulassen. Aus diesem Grunde sollte die Schwerbetonabschirmung mit 200 l-Einsatzfaß weiterhin als sinnvolle Ergänzung für diejenigen Abfälle angesehen werden, die aufgrund ihrer zu hohen spezifischen Aktivität nicht in Schwerbetoncontainer konditioniert werden können.
- Insgesamt gesehen, bieten die Behältertypen jedoch eine gute Voraussetzung zur Lagerrauminimierung, da für eine Optimierung der Gebindeausnutzung ein breiter Aktivitätsbereich für unterschiedliche Endabfallprodukte überdeckt werden kann.

- Das teilweise praktizierte Mischen von LAW- mit MAW-Abfalllösungen kann durch die mit dem Programmpaket mögliche Berechnung des Mischungsverhältnisses in einer Weise erfolgen, daß für einen bestimmten Behältertyp ein bezüglich Gebindeausnutzung und Produktqualität optimiertes Endabfallprodukt vorliegt.
- Eine auf Analysendaten und Berechnungen sich stützende "Aktivitätsüberladung" von Abfallgebinden zum Zeitpunkt der Konditionierung, d.h. Erfüllung der diskutierten Vorschriften erst nach Beendigung der Zwischenlagerung, würde eine deutliche Reduzierung des Raumbedarfs bei der Zwischenlagerung bedeuten.

Wie die hier gezeigten Beispiele zeigen, kann durch die Anwendung des beschriebenen Rechenverfahrens eine Reduzierung des Zwischen- bzw. Endlagerraumbedarfs für schwach- und mittelradioaktive Abfälle erzielt werden, durch bestmögliche Ausnutzung der dafür vorgesehenen Abfallgebinde.

7. Literaturverzeichnis

- /1/ Regulations for the Safe Transport of Radioactive Materials,
1973 Revised Edition
IAEA Safety Standards, Safety Series No. 6
IAEA, Vienna 1973
- /2/ Verordnung über die Beförderung gefährlicher Güter auf der Straße
(Gefahrgutverordnung Straße - GGVS)
Bundesgesetzblatt Teil 1, Jahrgang 1979, S. 1505
- /3/ Verordnung über die Beförderung gefährlicher Güter mit der
Eisenbahn (Gefahrgutverordnung Eisenbahn - GGVE)
Bundesgesetzblatt Teil 1, Jahrgang 1979, S. 1502
- /4/ Bedingungen für die Lagerung von schwachaktiven Abfällen im
Salzbergwerk Asse
Gesellschaft für Strahlen- und Umweltforschung, München 1975
- /5/ Fourth Draft Revision of the IAEA Regulations for the Safe
Transport of Radioactive Material,
Safety Series No. 6, 1984 Edition
IAEA, Vienna 1984
- /6/ Trubey, D.K., Maskewitz, B.F.
Computer Codes for Shielding Calculations-1969
Nuclear Engineering and Design 10 (1969), S. 505-517
- /7/ Böttcher, A.
Das Programm AZYCON für die Berechnung der Abschirmungen von
zylinderförmigen Transportcontainern für niedrig- bis mittelaktive
Abfälle.
Kernenergie 19 Heft 3, (1976), S. 86 - 90

- /8/ Rockwell, Th.
Reactor Shielding Design Manual
MacMillan and Co. Limited, London 1956
- /9/ Jaeger, R.G., Blizard, E.P., Chilton, A.B. et al.
Engineering Compendium on Radiation Shielding Vol. 1-3
Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1968/1970
- /10/ Elbel, H., Nagel, D.
unveröffentlichte Ergebnisse (1971)
- /11/ Lindacker, K.H.
Praktische Durchführung von Abschirmungsberechnungen
K. Thiernig KG., München 1962
- /12/ Seelmann-Eggebert, W., Pfennig, G., Münzel, H. et al.
Nuklidkarte
Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH., 5. Auflage (1981)
- /13/ Erdtmann, G., Soyka, W.
The Gamma Rays of the Radionuclides
Verlag Chemie, Weinheim, New York (1979)
- /14/ Gasteiger, R.
Abbrandrechnungen für LWR-Brennstoff als Datenbasis zur Aus-
legung von Wiederaufarbeitungsanlagen
KfK 2373 (1979)
- /15/ Drobnik, S.
KfK/HDB, persönliche Mitteilungen (1983)
- /16/ Gompper, K.
in Ergebnisbericht über Forschungs- und Entwicklungsarbeiten
1982 des INE
KfK 3490, 1983

/17/ Gompper, K.

in Ergebnisbericht über Forschungs- und Entwicklungsarbeiten

1983 des INE

KfK 3692, 1984

Tab. 1: Zusammenstellung von für die γ -Strahlenbelastung außerhalb von LAW/MAW-Abfallgebinden zu berücksichtigenden Radionukliden

Radionuklid	Nuklidbezeichnung im Rechenprogramm	Halbwertszeit (a)	Strahlenart	n_i
Na 22	NA-022	2,6	β, γ	2
Mn 54	MN-054	0,855	γ	1
Fe 59	FE-059	0,1235	β, γ	2
Co 57	CO-057	0,739	γ	2
Co 58	CO-058	0,1984	β, γ	3
Co 60	CO-060	5,27	β, γ	2
Kr 85	KR-085	10,76	β, γ	1
Sr 90	-	28,5	β	-
Y 90	Y-0090	2,671 d*	β, γ	1
Y 91	Y-0091	0,160	β, γ	1
Nb 94	NB-094	2,03 E 4	β, γ	2
Zr 95	ZR-095	0,176	β, γ	2
Nb 95	NB-095	35,15 d*	β, γ	1
Ru 106	-	1,01	β	-
Rh 106	RH-106	29,9 s*	β, γ	7
Ag 110 m	AG-110	0,684	β, γ	5
Sn 123	SN-123	0,354	β, γ	1
Sb 124	SB-124	0,165	β, γ	6
Sb 125	} SB-125	2,77	β, γ	} 22
Te 125 m		58,0 d*	γ	
Te 129 m	TE-129	33,6 d	β, γ	2
Cs 134	CS-134	2,062	β, γ	11
Cs 137	-	30,1	β	-
Ba 137 m	BA-137	2,552 min*	γ	5
Ce 144	CE-144	0,78	β, γ	12
Pr 144	PR-144	17,28 min*	β, γ	3
Pm 147	PM-147	2,623	β, γ	1
Pm 148 m	PM-148	41,3 d	β, γ	5
Sm 151	SM-151	93,0	β, γ	1
Eu 154	EU-154	8,8	β, γ	36
EU 155	EU-155	4,96	β, γ	10
Ta 182	TA-182	0,315	β, γ	35
U 235	U-0235	7,038 E 8	α, γ	3
Pu 238	PU-238	87,75	α, γ	1
Pu 239	PU-239	2,413 E 4	α, γ	1
Pu 240	PU-240	6,550 E 3	α, γ	3
Pu 241	-	14,4	β	-
Am 241	AM-241	432,6	α, γ	4
Cm 244	CM-244	18,1	α, γ	1

n_i : In den Rechenprogrammen berücksichtigte Anzahl von γ -Energien

(: Radioaktiver Zerfall

* : Bei den Rechnungen wurde die längere Halbwertszeit des Mutternuklids berücksichtigt.

Tab. 2: Zusammenstellung der für die Abschirmberechnungen verwendeten Behälterdaten

Bezeichnung	Quellendaten				Produkt- dichte ρ (g/cm ³)	1. Abschirmschicht (Eisen)			2. Abschirmschicht (Beton)		Brutto- volumen (m ³)
	L (mm)	B (mm)	H (mm)	D (mm)		d (mm)	ρ (g/cm ³)	d (mm)	ρ (g/cm ³)	Nutz- volumen (m ³)	
200 l-Faß	-	-	860	560	0,15-4,0	1,5	7,8	-	-	0,2	0,3
400 l-Faß	-	-	1050	710	0,15-4,0	1,5	7,8	-	-	0,4	0,5
Normalbeton-Abschirmung mit 200 l-Faß	-	-	860	560	1,5-4,0	1,5	7,8	205	2,2	0,2	1,2
Schwerbeton-Abschirmung mit 200 l-Faß	-	-	860	560	1,5-4,0	1,5	7,8	205	3,6	0,2	1,2
Normalbeton-Abschirmung mit 400 l-Faß	-	-	1050	710	1,5-4,0	1,5	7,8	130	2,2	0,4	1,3
Schwerbeton-Abschirmung mit 400 l-Faß	-	-	1050	710	1,5-4,0	1,5	7,8	130	3,6	0,4	1,3
Normalbeton-Container mit 8 x 200 l-Fässer	2240 ¹⁾	1120 ¹⁾	860 ¹⁾	-	1,5-4,0	1,5 ¹⁾	7,8	200 ¹⁾	2,2	1,6	7,4
Schwerbeton-Container mit 8 x 200 l-Fässer	2240 ¹⁾	1120 ¹⁾	860 ¹⁾	-	1,5-4,0	1,5 ¹⁾	7,8	200 ¹⁾	3,6	1,6	7,4
Stahlblech-Container	2996 ²⁾	1696 ²⁾	1436 ²⁾	-	1,5-5,0	2,0	7,8	-	-	7,0	7,4
Normalbeton-Container	2600 ³⁾	1300 ³⁾	950 ³⁾	-	1,5-5,0	-	-	200	2,2	3,0	7,4
Schwerbeton-Container	2600 ³⁾	1300 ³⁾	950 ³⁾	-	1,5-5,0	-	-	200	3,6	3,0	7,4
Gußbehälter	-	-	934	630	2,0-5,0	215	7,8	-	-	0,27	1,2

1) Berechnung als Aneinanderreihung (2-er Reihe) von 8 Zylindern mit jeweils H=860 mm, D=560 mm gemäß Fig. 5 zur Berücksichtigung der Nachbarquellen eines 200 l-Fasses.

2) Berechnung als Zylinder (H = 2996 mm, D = 1761 mm) mit gleicher Stirnfläche wie angegebener Quader.

3) Berechnung als Zylinder (H = 2600 mm, D = 1254 mm) mit gleicher Stirnfläche wie angegebener Quader.

Tab. 3: Zusammenstellung der Rechenprogramme des
Programmpakets PROMAX

Gebindetyp	Nutzvolumen V (m ³)	Berechnung der Maximalaktivität für die Bedingung	
		10 mrem/h in 1 m Abstand vom Gebinde	1 rem/h in 3 m Abstand von der nicht abgeschirm- Einheit
200 l Abfallfaß	0,2	FAS200	entfällt
400 l Abfallfaß	0,4	FAS400	entfällt
Stahlblechcontainer	7,0	STACON	entfällt
Normalbetonabschirmung mit 200 l Faß	0,2	NBA200	FAS201 ²⁾
Normalbetonabschirmung mit 400 l Faß	0,4	NBA400	Bed. erfüllt
Normalbetoncontainer ⁴⁾ mit 8 x 200 l Fässer	1,6	NBC200	FAS208 ³⁾
Normalbetoncontainer	3,0	NBCONT	BECON1
Schwerbetonabschirmung mit 200 l Faß	0,2	SBA200	FAS201 ²⁾
Schwerbetonabschirmung mit 400 l Faß	0,4	SBA400	Bed. erfüllt
Schwerbetoncontainer ⁴⁾ mit 8 x 200 l Fässer	1,6	SBC200	FAS208 ³⁾
Schwerbetoncontainer	3,0	SBCONT	BECON1
Gußbehälter	0,27 (0,2 ¹⁾)	GUSSBE	FAS201 ²⁾

1) Mit Verwendung eines 200 l Einsatzfasses

2) Nicht abgeschirmte Einheit = 200 l Abfallfaß

3) Nicht abgeschirmte Einheit = Kombination aus acht 200 l Fässern

4) Der Resthohlraum im Container ist nicht verfüllt.

Tab. 4: Aktivitätszusammensetzung verschiedener
LAW/MAW-Lösungen.

	Aktivitätsanteile (%)				
	MAW 004	MAW 005	LAW 007	LAW 007 ⁺ MAW 005	MAW IHCH
H - 3	0,03	0,02	0,28	0,03	0,03
Na-22	0,16	0,15	0,03	0,14	0,
Co-60	0,16	0,	0,08	0,	0,
Sr-90	17,05	2,11	2,99	2,26	6,84
Y -90	17,05	2,11	2,99	2,26	6,84
Zr-95	0,08	0,15	0,65	0,18	0,13
Nb-95	0,08	0,15	0,17	0,24	1,44
Ru-106	6,36	3,98	9,82	4,43	1,93
Rh-106	6,36	3,98	9,82	4,43	1,93
Sb-125	2,20	5,45	3,99	5,42	0,33
Te-125m	0,46	1,06	0,80	0,99	0,07
Cs-134	2,63	2,76	0,42	2,72	0,52
Cs-137	19,08	2,36	3,33	2,44	7,58
Ba-137m	19,08	2,36	3,33	2,44	7,58
Ce-144	1,73	0,30	0,33	0,31	25,28
Pr-144	1,73	0,30	0,33	0,31	25,28
Pu-238	0,13	0,35	0,01	0,47	0,30
Pu-239	0,03	0,03	0,30	0,04	0,11
Pu-240	0,05	0,05	0,42	0,07	0,07
Pu-241	5,20	72,07	59,73	70,52	12,64
Am-241	0,35	0,26	0,17	0,30	1,10

⁺ Mischungsverhältnis: 68 Vol.% LAW, 32 Vol.% MAW

Tab. 5: Zusammenstellung der bei KfK/HDB vorhandenen Gebindetypen nach steigenden berechneten Maximalaktivitäten für die Aktivitätszusammensetzung eines zementierten MAW-Endabfallprodukts (MAW-004, Produktdichte $\rho = 2 \text{ g/cm}^3$)

Lfd. Nr.	Gebindetyp	Nutz- volumen $V(\text{m}^3)$	Spezifische Maximalaktivität für die Bedingung	
			10 mrem/h (0,1mSv/h) A(Ci/l)	1 rem/h (10mSv/h) A(Ci/l)
1	Stahlblechcontainer	7,0	$5,01 \cdot 10^{-4}$	entfällt
2	400 l-Abfallfaß	0,4	$1,70 \cdot 10^{-3}$	entfällt
3	200 l-Abfallfaß	0,2	$2,42 \cdot 10^{-3}$	entfällt
4	Normalbetoncontainer	3,0	$8,51 \cdot 10^{-3}$	$2,69 \cdot 10^{-1}$
5	Normalbetoncontainer ₂₎ mit 8 x 200 l-Fässer ₂₎	1,6	$1,02 \cdot 10^{-2}$	$4,16 \cdot 10^{-1}$
6	Normalbetonabschirmung mit 400 l-Faß	0,4	$1,02 \cdot 10^{-2}$	Bed. erfüllt
7	Schwerbetonabschirmung mit 400 l-Faß	0,4	$3,31 \cdot 10^{-2}$	Bed. erfüllt
8	Normalbetonabschirmung mit 200 l-Faß	0,2	$4,26 \cdot 10^{-2}$	$1,63 \cdot 10^0$
9	Schwerbetoncontainer	3,0	$5,26 \cdot 10^{-2}$	$2,69 \cdot 10^{-1}$
10	Schwerbetoncontainer ₂₎ mit 8 x 200 l-Fässer ₂₎	1,6	$6,23 \cdot 10^{-2}$	$4,16 \cdot 10^{-1}$
11	Schwerbetonabschirmung mit 200 l-Faß	0,2	$2,75 \cdot 10^{-1}$	$1,63 \cdot 10^0$
12	Stahlgußbehälter	0,27 (0,2 ¹⁾)	$4,61 \cdot 10^1$	$1,63 \cdot 10^0$

1) Mit Verwendung eines 200 l-Einsatzfasses

2) Resthohlraum im Container ist nicht verfüllt

Tab. 6: Aktivitäts- und Dosisleistungsanteile einer zementierten MAW-Lösung (MAW-004, $\rho=2,0 \text{ g/cm}^3$)

	Analyse der MAW-Lösung A/Agas. (%)	Berechnung für 200 l-Faß $\dot{D}(1\text{m})/\dot{D}_{\text{ges}}(1\text{m})$ (%)	Berechnung für Gußbehälter $\dot{D}(1\text{m})/\dot{D}_{\text{ges}}(1\text{m})$ (%)
H - 3	0,03	0,	0,
Na - 22	0,16	1,99	9,88
Co - 60	0,16	2,36	20,35
Sr - 90	17,05	0,	0,
Y - 90	17,05	0,02	0,48
Zr - 95	0,08	0,33	0,27
Nb - 95	0,08	0,35	0,33
Ru - 106	6,36	0,	0,
Rh - 106	6,36	6,78	5,63
Sb - 125	2,20	4,88	0,88
Te - 125 m	0,46	0,	0,
Cs - 134	2,63	23,35	25,57
Cs - 137	19,08	0,	0,
Ba - 137 m	19,08	59,53	29,27
Ce - 144	1,73	0,09	0,
Pr - 144	1,73	0,30	7,36
Pu - 238	0,13	0,	0,
Pu - 239	0,03	0,	0,
Pu - 240	0,05	0,	0,
Pu - 241	5,20	0,	0,
Am - 241	0,35	0,01	0,

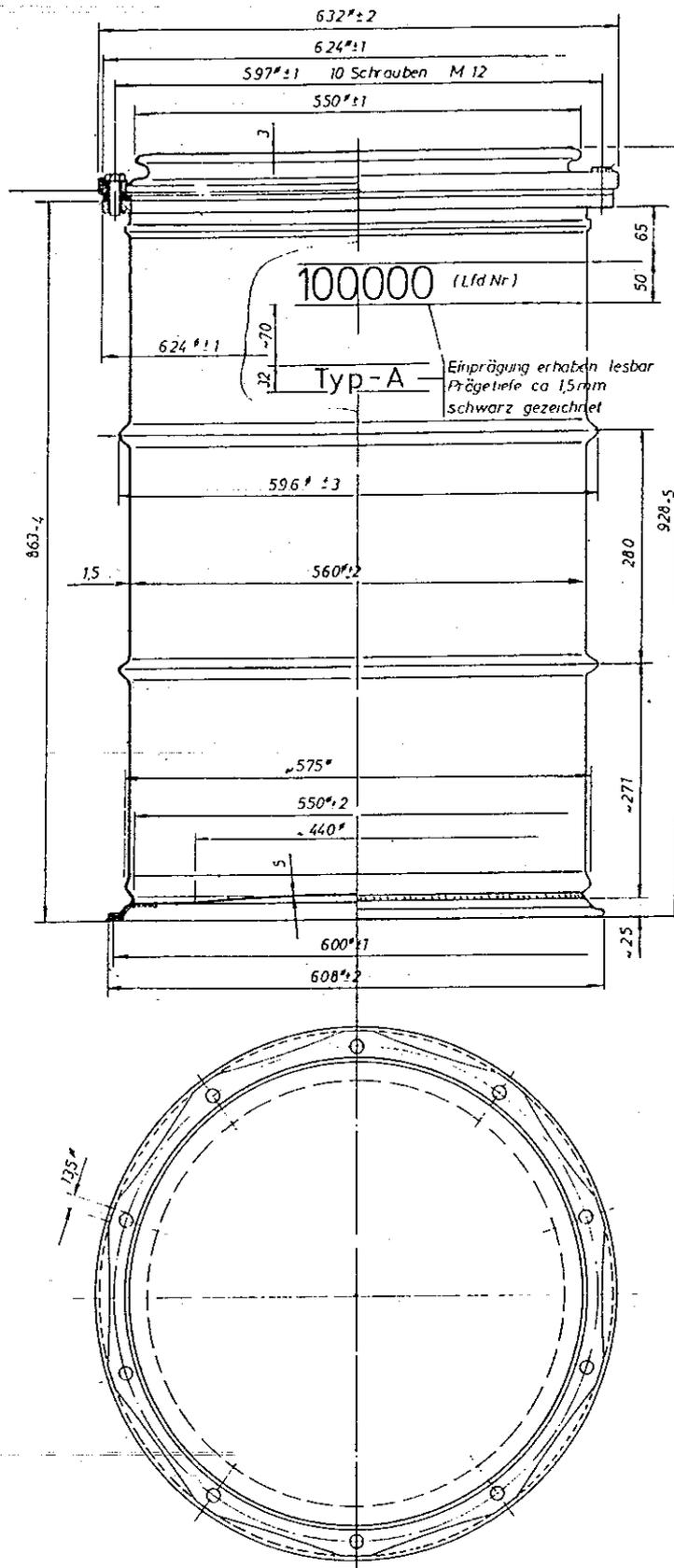


Fig. 1: 200 l Rollsickenfaß ("BKM-Faß") aus lackbeschichtetem Stahlblech St 1203.
Leergewicht: 60 Kg

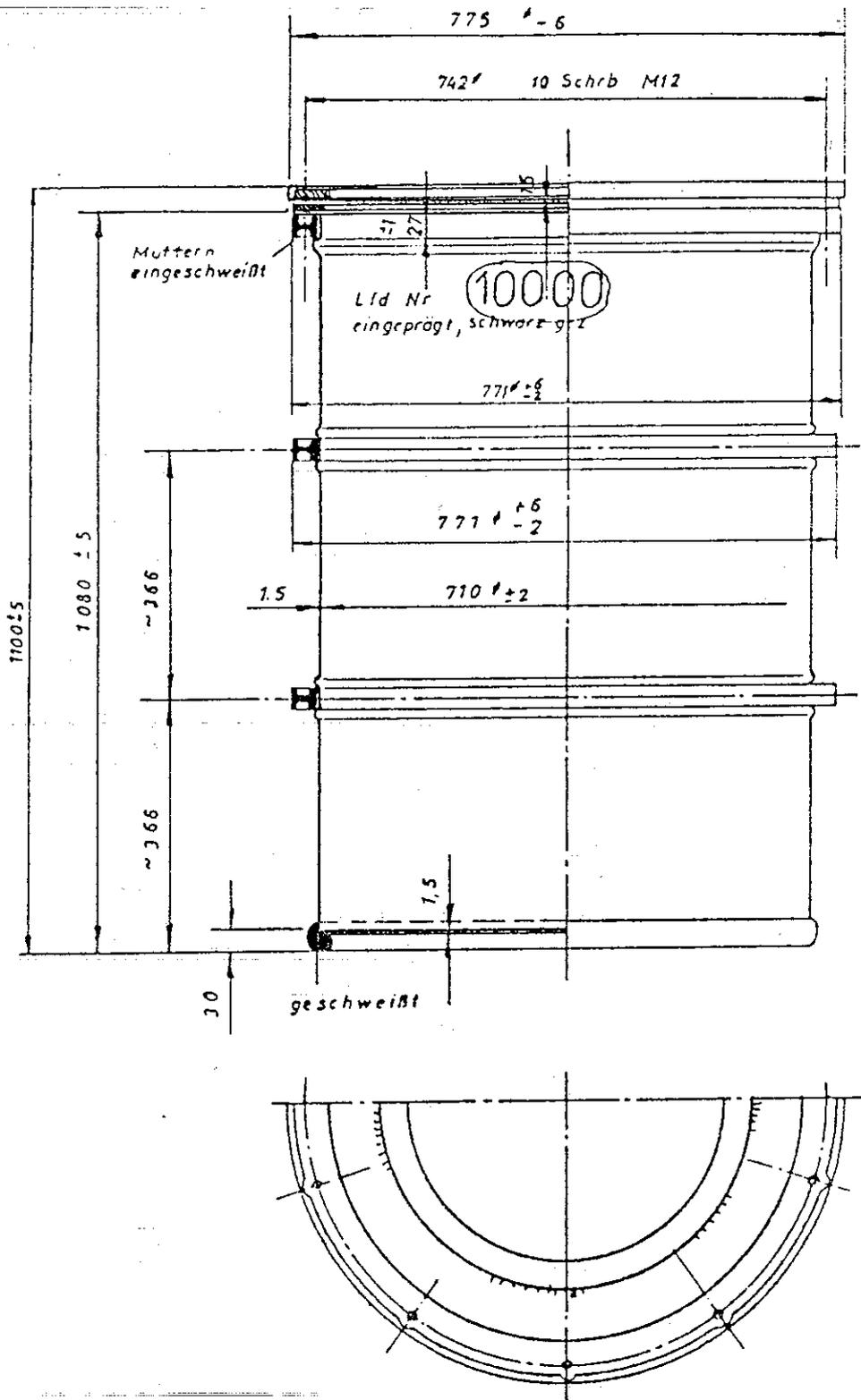
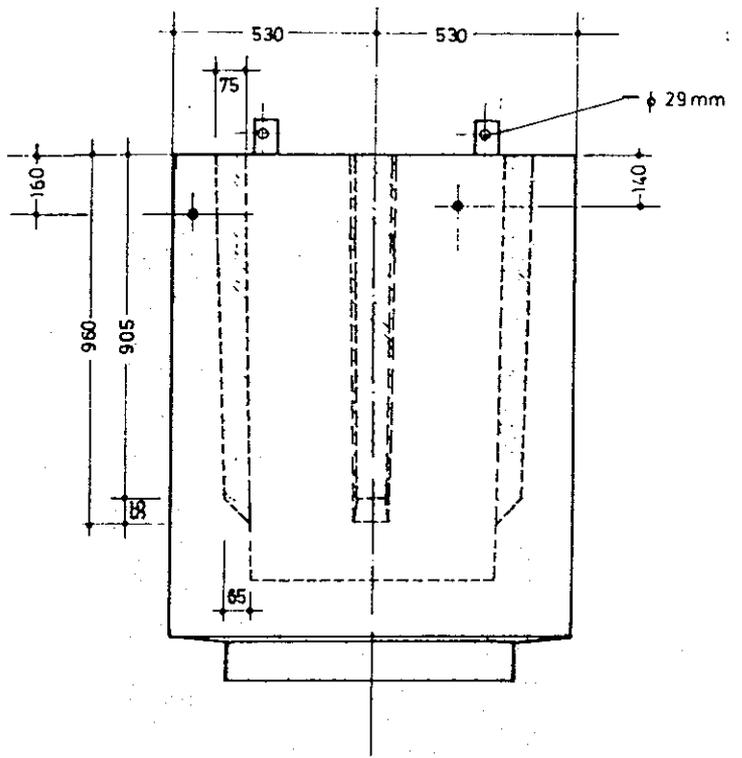
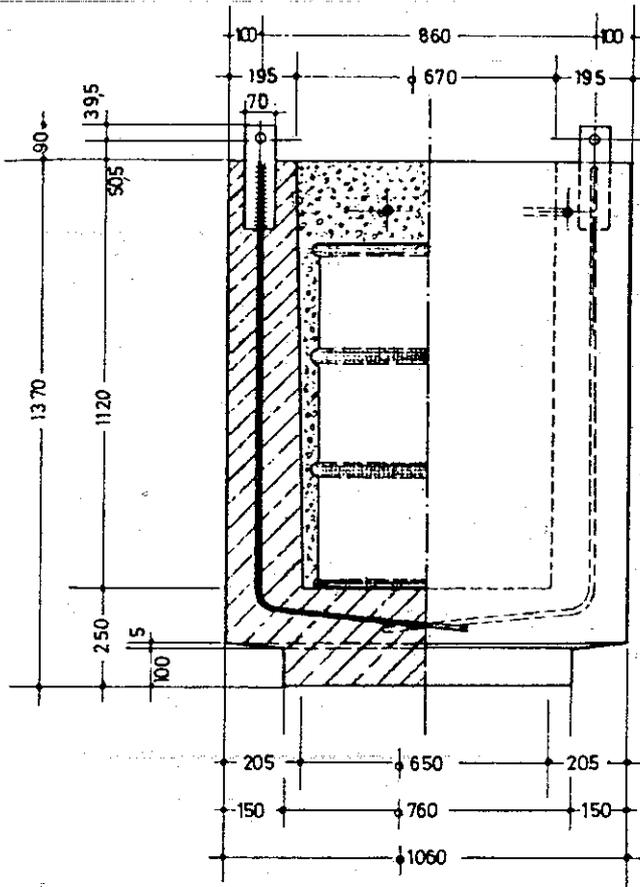


Fig. 2: 400 l Faß aus lackbeschichtetem Stahlblech St 1203.
Leergewicht: 80 Kg

SCHNITT A-A (OHNE ARMIERUNG GEZ.)

SEITENANSICHT:



DRAUFSICHT:

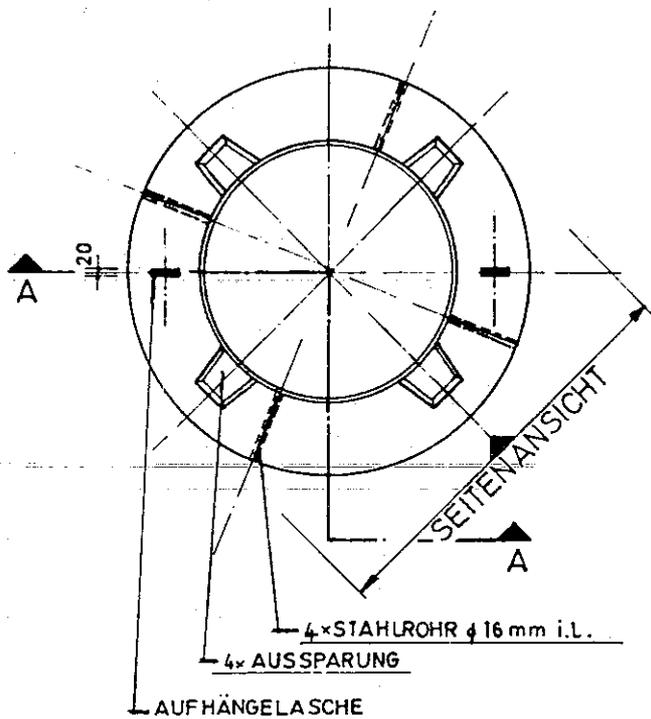


Fig. 3:

Verlorene Betonabschirmung für ein 200 l Einsatzfaß. Leergewicht der Normalbetonabschirmung: 1 800 Kg
Leergewicht der Schwerbetonabschirmung: 2 620 Kg

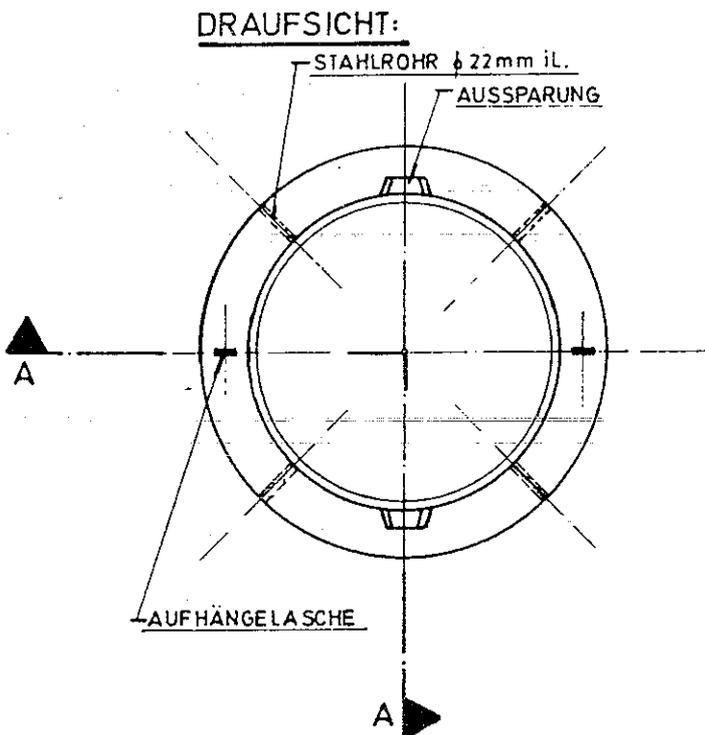
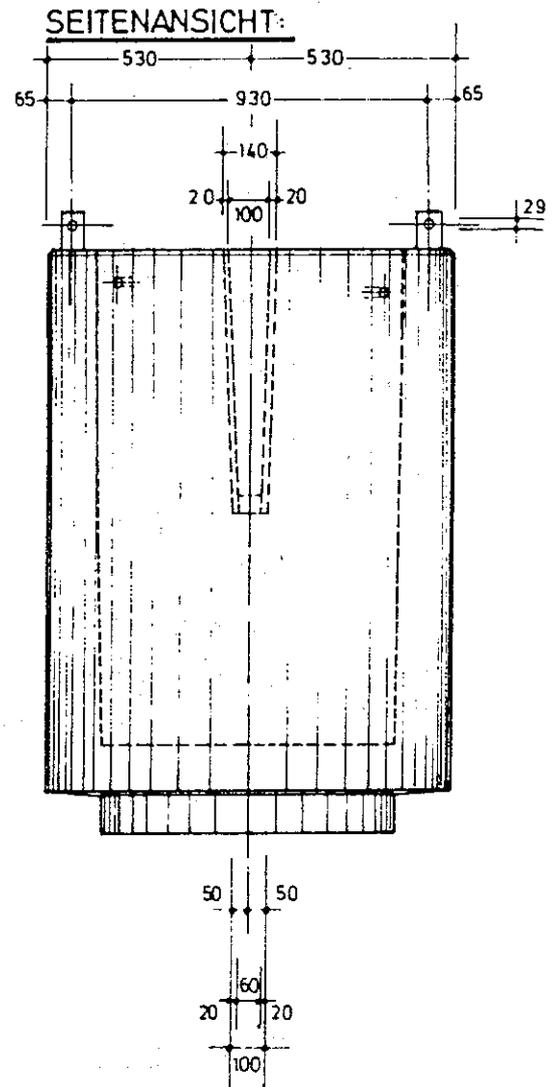
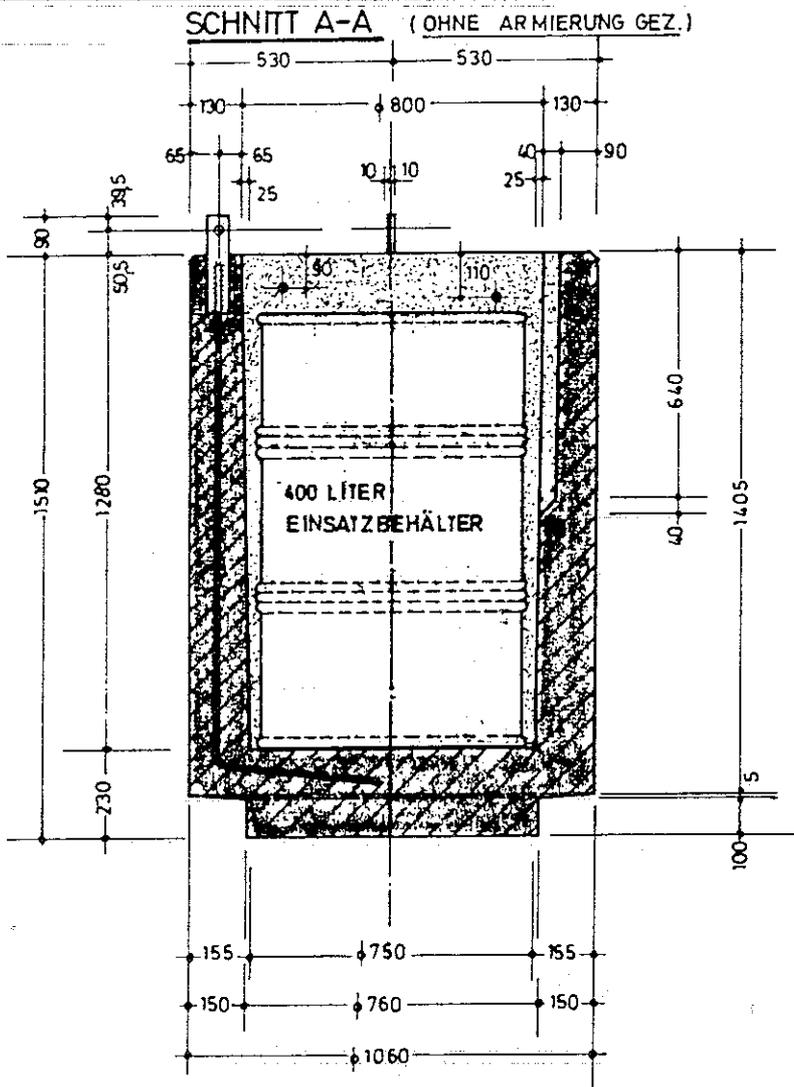


Fig. 4:

Verlorene Betonabschirmung
für ein 400 l Einsatzfaß.
Leergewicht der Normalbeton-
abschirmung: 1 600 Kg
Leergewicht der Schwerbeton-
abschirmung: 2 350 Kg

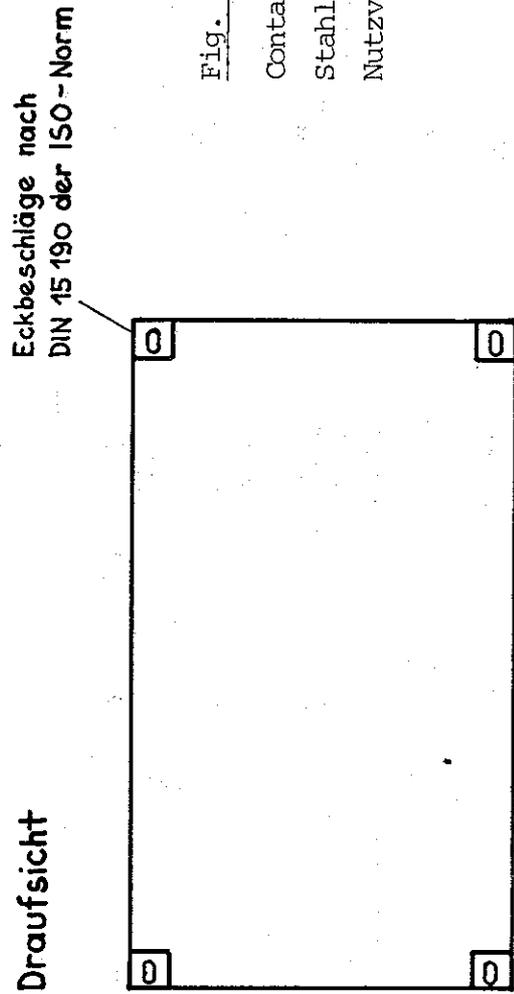
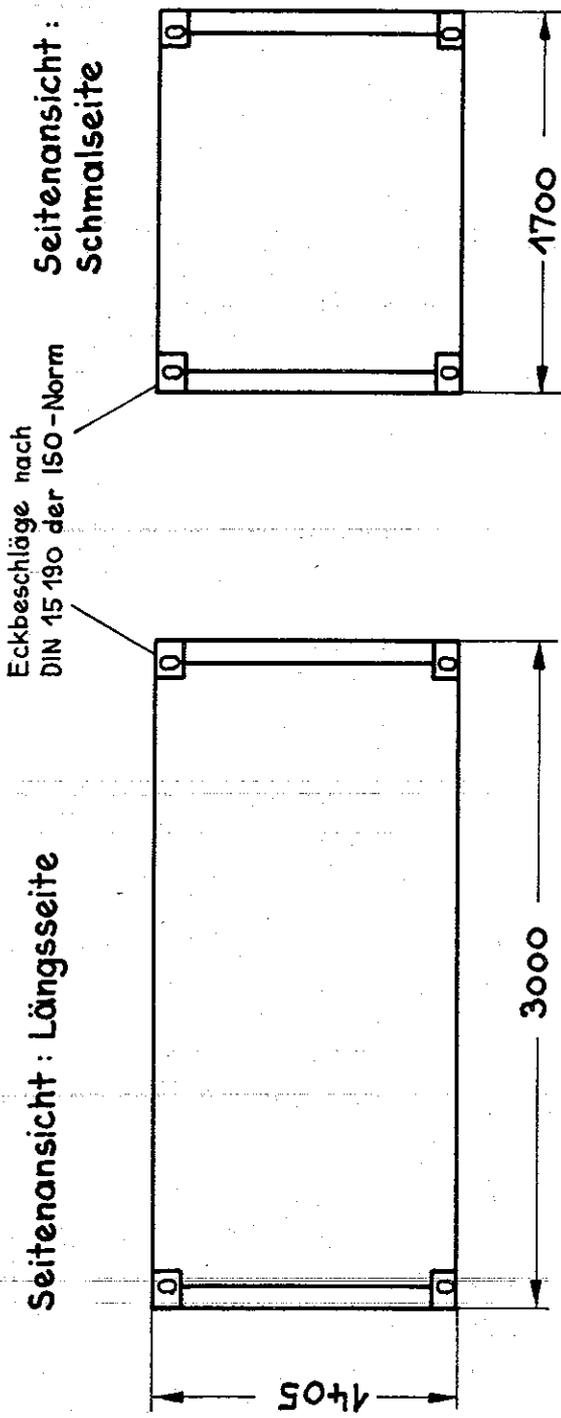


Fig. 6:

Container aus lackbeschichtetem
Stahlblech.
Nutzvolumen ca. 7 m³

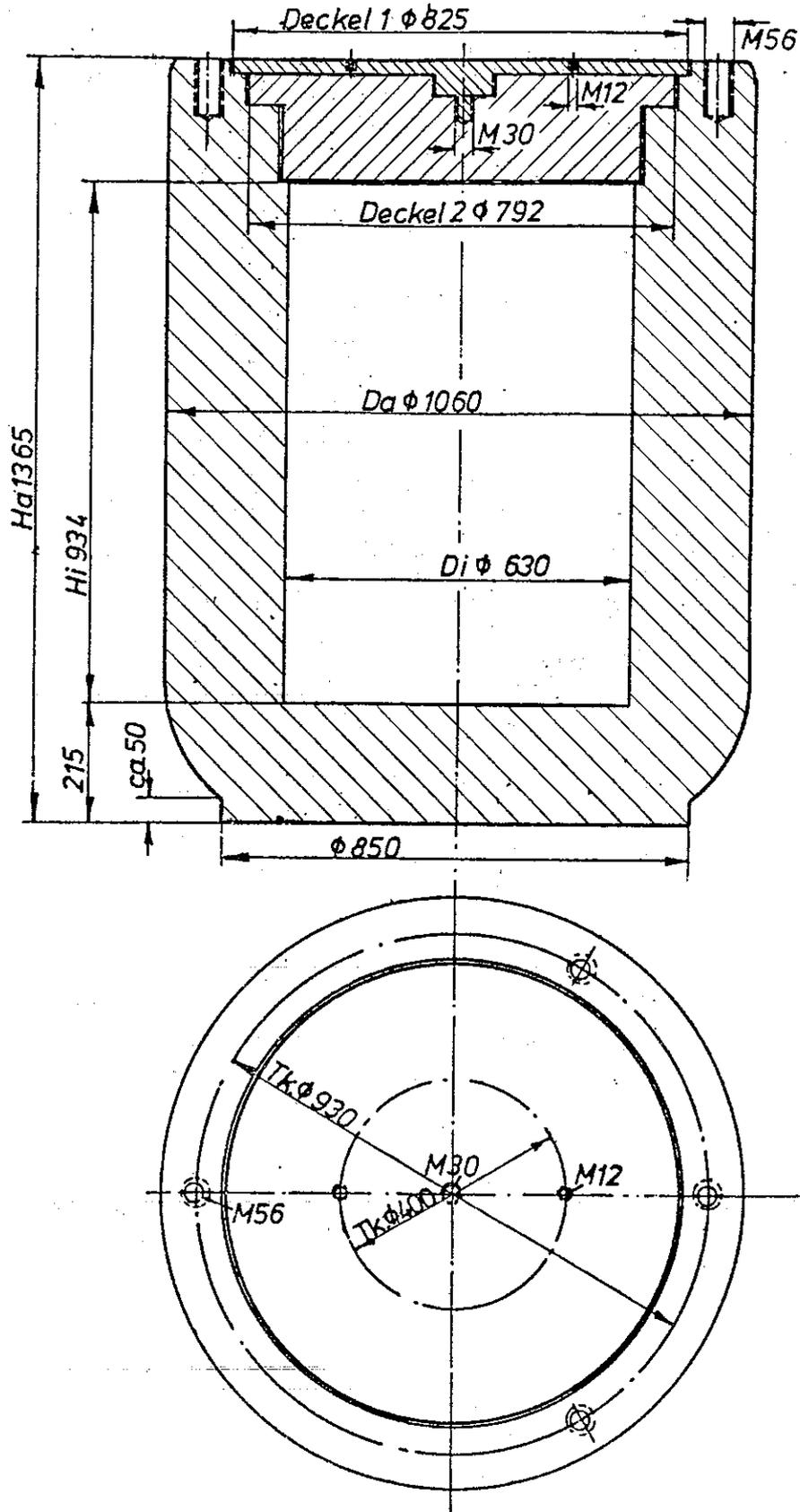


Fig. 7: Gußbehälter aus Sphäroguß GGG 40
für ein 200 l Einsatzfaß
Leergewicht: 7 000 Kg

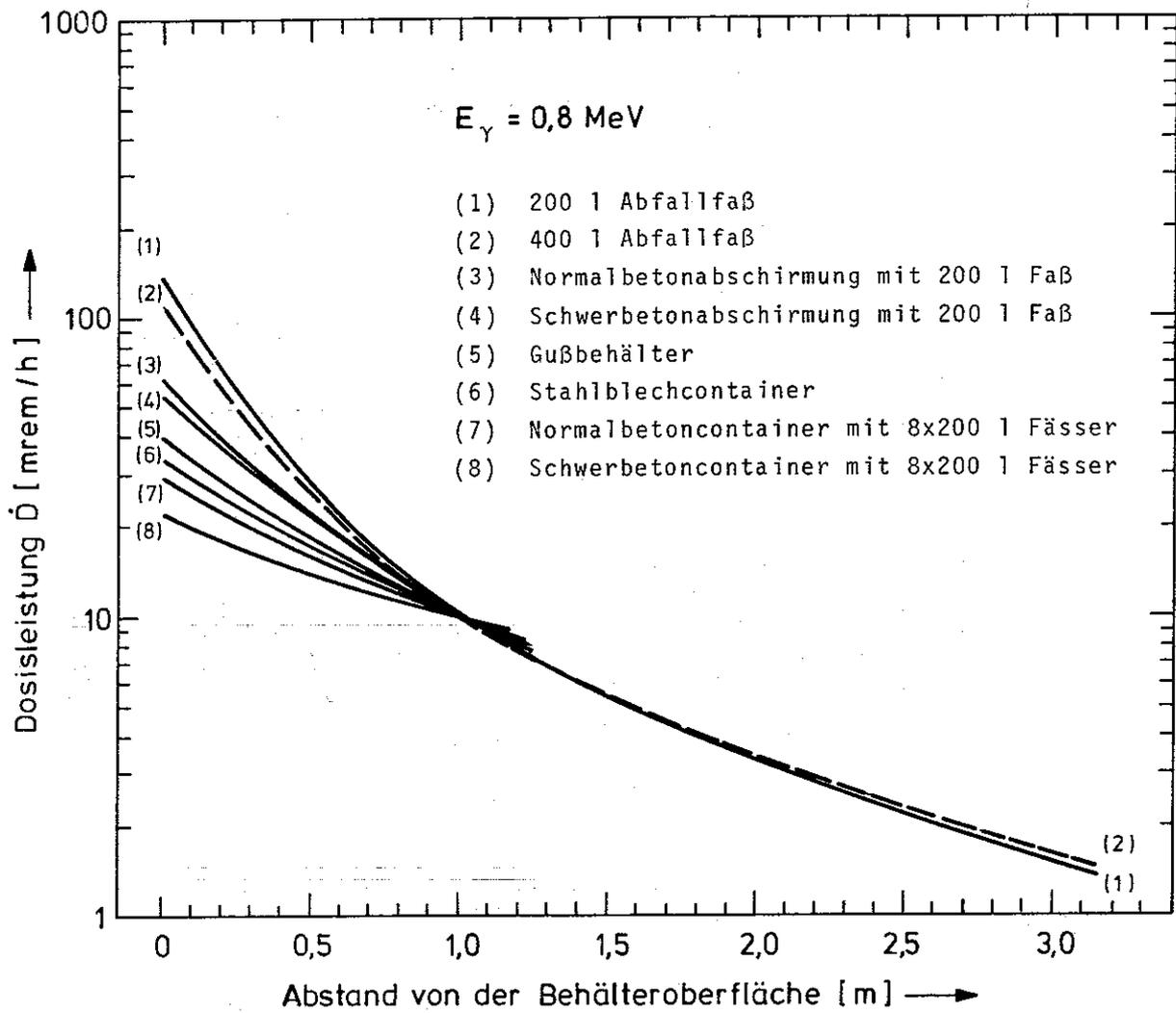


Fig. 8: Dosisleistung als Funktion des Abstandes von der Behälteroberfläche für verschiedene Verpackungsvarianten.

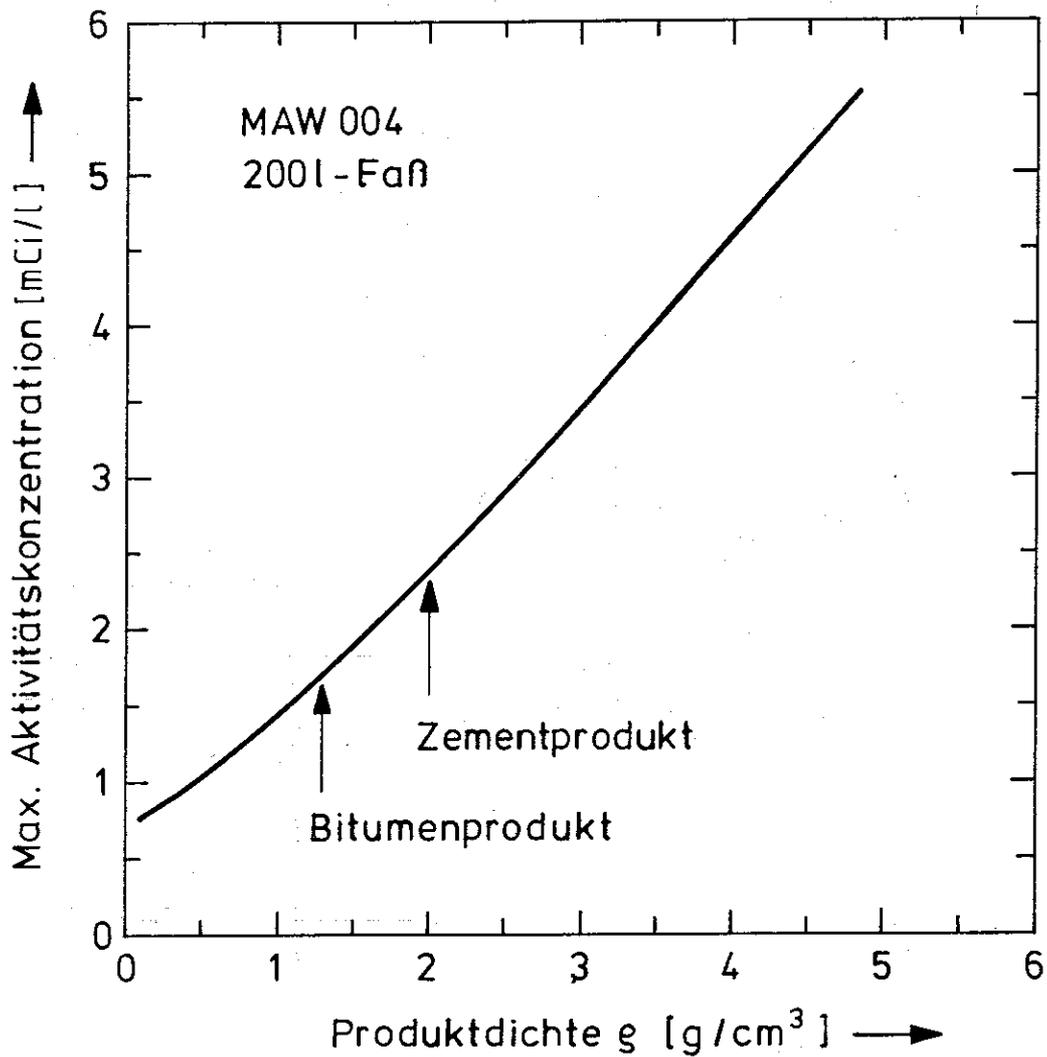


Fig. 9: Maximale Aktivitätskonzentration in einem 200 l Abfallfaß in Abhängigkeit von der mittleren Dichte des Abfallprodukts (Aktivitätszusammensetzung MAW-004).

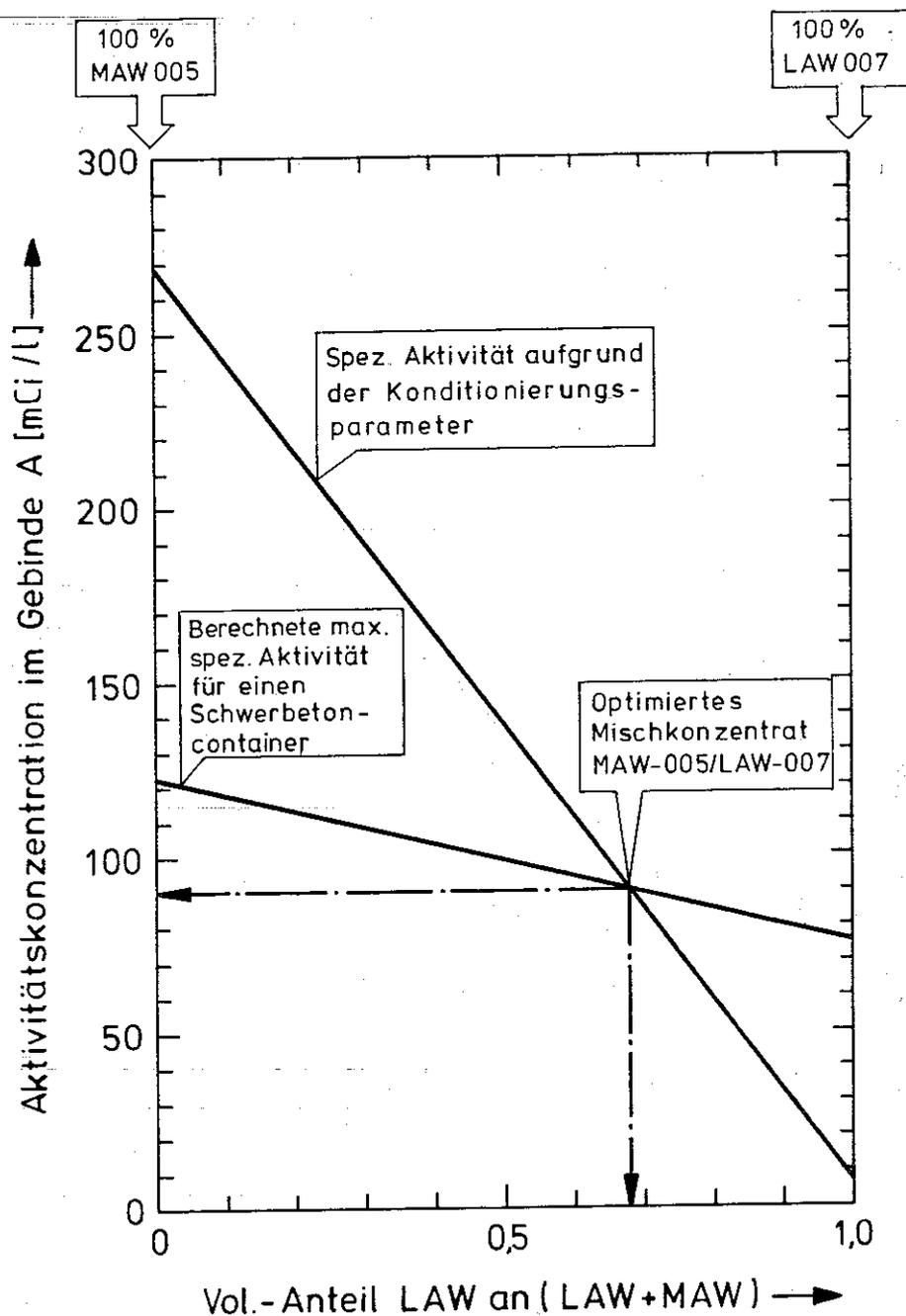


Fig. 10: Bestimmung des Volumen-Mischungsverhältnisses für ein Mischkonzentrat MAW-005/LAW-007 zur Optimierung der Gebindeausnutzung bei einem Schwerbetoncontainer mit 8 Stck. 200 l Einsatzfässern (Parameter $\dot{D}(1\text{ m}) = 10\text{ mrem/h}$).

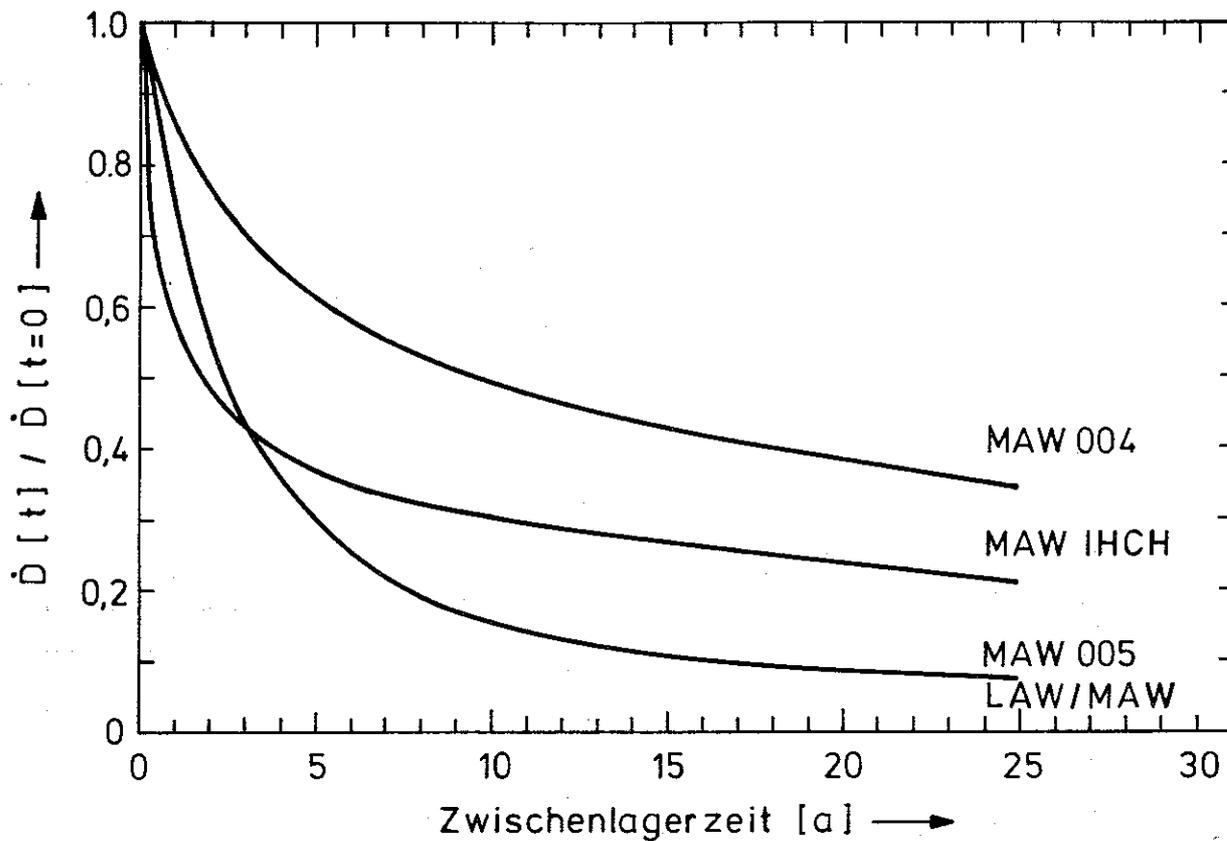


Fig. 11: Abklingen der Dosisleistung \dot{D} als Funktion der Zwischenlagerzeit t für verschiedene zementierte MAW - Lösungen.

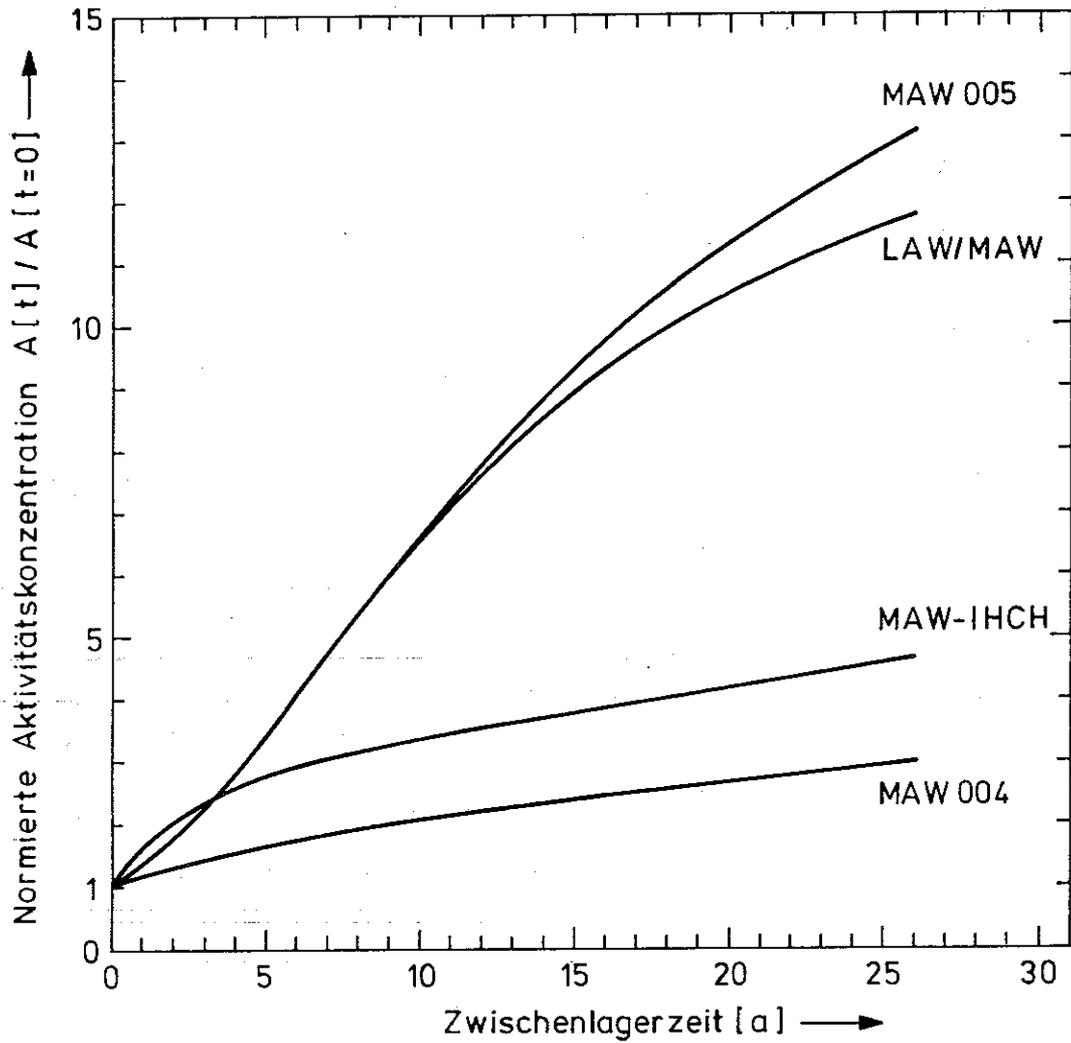


Fig. 12: Erhöhung der Aktivitätskonzentration als Funktion der Zwischenlagerzeit für verschiedene zementierte MAW-Konzentrate. Parameter $\dot{D}(1\text{ m}) = 10\text{ mrem/h}$ wird erst nach Beendigung der Zwischenlagerung erreicht.

Anhang A

Rechenausdruck des Programms FAS200

BERECHNUNG DER MAXIMAL ZULAESSIGEN PRODUKTAKTIVITAET FUER EIN
200 LITER ABFALLFASS
BEI EINHALTUNG EINER DOSISLEISTUNG VON 10 MREM/H IN 1 M ABSTAND
VON DER BEHAELTEROBERFLAECHE

EINGABEDATEN :

ENDPRODUKTVOLUMEN V(LITER) : 200.0000

NUKLID : AKTIVITAETSPROZENT
MN-054 : 10.0000
CO-060 : 70.0000
CS-134 : 20.0000
SUMME : 100.0000

A) 200L-ABFALLFASS MIT EINER ENDPRODUKTDICHTE VON 0.15 G/CM**3 :

BERECHNETE MAXIMAL ZULAESSIGE SPEZIFISCHE AKTIVITAET A(CI/LITER)
UND GESAMTAKTIVITAET AGES(CI) DES ENDPRODUKTS ALS FUNKTION DES
ABFALLALTERS :

T(A)	A(CI/L)	A(EQ/L)	AGES(CI)	AGES(EQ)
0	.7558E-04	.2796E 07	.1511E-01	.5593E 09
2	.1074E-03	.3974E 07	.2148E-01	.7948E 09
5	.1702E-03	.6300E 07	.3405E-01	.1260E 10
10	.3444E-03	.1274E 08	.6888E-01	.2548E 10
20	.1315E-02	.4867E 08	.2630E 00	.9734E 10

DOSISLEISTUNGSANTEILE AN DER GESAMTDOSISLEISTUNG IN PROZENT ZUM
ZEITPUNKT T=0 :

NUKLID : DOSISLEISTUNGSPROZENT
MN-054 : 4.0816
CO-060 : 79.8942
CS-134 : 16.0241

B) 200L-ABFALLFASS MIT EINER ENDPRODUKTDICHTE VON 1.50 G/CM**3 :

BERECHNETE MAXIMAL ZULAESSIGE SPEZIFISCHE AKTIVITAET A(CI/LITER)
UND GESAMTAKTIVITAET AGES(CI) DES ENDPRODUKTS ALS FUNKTION DES
ABFALLALTERS :

T(A)	A(CI/L)	A(EQ/L)	AGES(CI)	AGES(EQ)
0	.1532E-03	.5669E 07	.3064E-01	.1133E 10
2	.2159E-03	.7990E 07	.4319E-01	.1598E 10
5	.3399E-03	.1257E 08	.6798E-01	.2515E 10
10	.6838E-03	.2530E 08	.1367E 00	.5060E 10
20	.2604E-02	.9636E 08	.5208E 00	.1927E 11

DOSISLEISTUNGSANTEILE AN DER GESAMTDOSISLEISTUNG IN PROZENT ZUM ZEITPUNKT T=0 :

NUKLID : DOSISLEISTUNGSPROZENT
MN-054 : 3.8155
CO-060 : 81.8419
CS-134 : 14.3426

C) 200L-ABFALLFASS MIT EINER ENDPRODUKTDICHTE VON 2.00 G/CM**3 :

BERECHNETE MAXIMAL ZULAESSIGE SPEZIFISCHE AKTIVITAET A(CI/LITER)
UND GESAMTAKTIVITAET AGES(CI) DES ENDPRODUKTS ALS FUNKTION DES
ABFALLALTERS :

T(A)	A(CI/L)	A(BQ/L)	AGES(CI)	AGES(BQ)
0	.1920E-03	.7105E 07	.3840E-01	.1421E 10
2	.2703E-03	.1000E 08	.5406E-01	.2000E 10
5	.4250E-03	.1572E 08	.8500E-01	.3145E 10
10	.8543E-03	.3160E 08	.1708E 00	.6321E 10
20	.3252E-02	.1203E 09	.6505E 00	.2406E 11

DOSISLEISTUNGSANTEILE AN DER GESAMTDOSISLEISTUNG IN PROZENT ZUM ZEITPUNKT T=0 :

NUKLID : DOSISLEISTUNGSPROZENT
MN-054 : 3.7641
CO-060 : 82.1394
CS-134 : 14.0964

D) 200L-ABFALLFASS MIT EINER ENDPRODUKTDICHTE VON 3.00 G/CM**3 :

BERECHNETE MAXIMAL ZULAESSIGE SPEZIFISCHE AKTIVITAET A(CI/LITER)
UND GESAMTAKTIVITAET AGES(CI) DES ENDPRODUKTS ALS FUNKTION DES
ABFALLALTERS :

T(A)	A(CI/L)	A(BQ/L)	AGES(CI)	AGES(BQ)
0	.2757E-03	.1020E 08	.5514E-01	.2040E 10
2	.3875E-03	.1434E 08	.7751E-01	.2868E 10
5	.6087E-03	.2252E 08	.1217E 00	.4504E 10
10	.1222E-02	.4524E 08	.2445E 00	.9049E 10
20	.4654E-02	.1722E 09	.9308E 00	.3444E 11

DOSISLEISTUNGSANTEILE AN DER GESAMTDOSISLEISTUNG IN PROZENT ZUM ZEITPUNKT T=0 :

NUKLID : DOSISLEISTUNGSPROZENT
MN-054 : 3.6945
CO-060 : 82.4097
CS-134 : 13.8957

E) 200L-ABFALLFASS MIT EINER ENDPRODUKTDICHTE VON 4.00 G/CM**3 :

BERECHNETE MAXIMAL ZULAESSIGE SPEZIFISCHE AKTIVITAET A(CI/LITER)
UND GESAMTAKTIVITAET AGES(CI) DES ENDPRODUKTS ALS FUNKTION DES
ABFALLALTERS :

T(A)	A(CI/L)	A(EQ/L)	AGES(CI)	AGES(EQ)
0	.3599E-03	.1331E 08	.7199E-01	.2663E 10
2	.5060E-03	.1872E 08	.1012E 00	.3745E 10
5	.7949E-03	.2941E 08	.1589E 00	.5882E 10
10	.1596E-02	.5908E 08	.3193E 00	.1181E 11
20	.6077E-02	.2248E 09	.1215E 01	.4497E 11

DOSISLEISTUNGSANTEILE AN DER GESAMTDOSISLEISTUNG IN PROZENT ZUM
ZEITPUNKT T=0 :

NUKLID	DOSISLEISTUNGSPROZENT
MN-054	3.7077
CO-060	82.3974
CS-134	13.8948