



Fachlicher Schlussbericht

**Fachlicher Schlussbericht zum For-
schungsvorhaben „Automatisierte, rech-
nergestützte Verpackungsplanung zur
Reduzierung der Massen und Volumina
der Abfallgebinde für das Endlager
Konrad“**

BS-Projekt-Nr. 1511-01
BMBF Förderkennzeichen 15S9400

erstellt im Auftrag der
Bundesministerium für Bildung und For-
schung
53170 Bonn

durch die
Brenk Systemplanung GmbH
Heider-Hof-Weg 23
52080 Aachen

Hamburg, 25.02.2021

Anmerkung:

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 15S9400 gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieses Berichts liegt bei den Autoren.



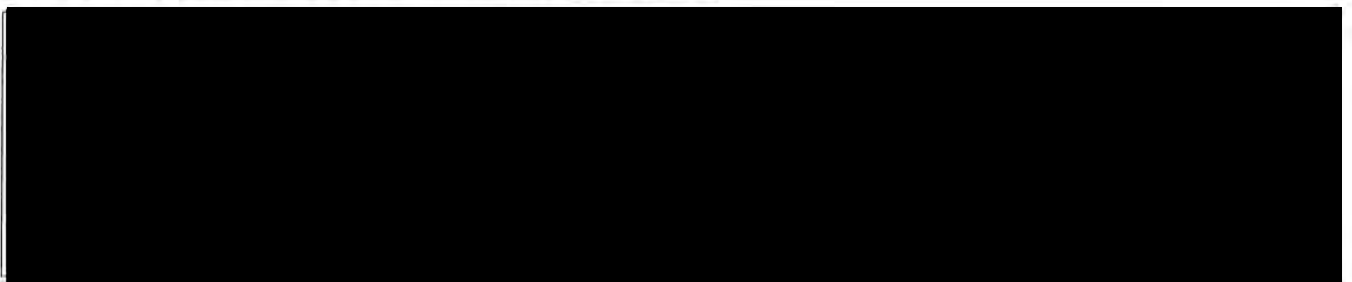
AUTOREN

Dieser Bericht wurde von folgenden Bearbeitern erstellt:

- Dr. P. Harding
- G. Hoppe
- J. Iloff
- Dr. Y. Shapiro
- Dr. J. Kaulard
- Dr. S. Thierfeldt

Es wird versichert, dass dieser Bericht nach bestem Wissen und Gewissen, unparteiisch und ohne Ergebnisweisung angefertigt worden ist.

ERSTELLUNG, PRÜFUNG UND FREIGABE



ZUSAMMENFASSUNG

In diesem Forschungsvorhaben (FV) wurden manuell ermittelte Lösungen von im Abfallmanagement von radioaktiven Abfällen vorkommenden Zuordnungsproblemen (z.B. Verpackungsplanungen) mit solchen verglichen, die mithilfe eines automatisierten Algorithmus berechnet wurden. Verglichen werden im Einzelnen die sich durch die Lösung ergebenden Behälter-, Endlagerungs- und Handhabungskosten, wobei nicht bei jeder Planung alle Kostenfelder vorliegen.

Die angewandten Algorithmen sind im Wesentlichen Lokale Suchheuristiken, die zur Lösungsfindung von klassischen Bedingungserfüllungsproblemen (z.B. Sudoku, Stundenplanung mit Raumbelegung, Maschinenbelegung, Routenplanung etc.) verwendet werden. Im Rahmen der Modellierung und Lösungsfindung wurden diese parametrisierbaren Algorithmen untersucht, insbesondere welche Algorithmen und welche Parameter besonders schnell zu Lösungen führen. In diesem Bericht werden diese Untersuchungen nicht dokumentiert.

Es wurde gezeigt, dass insbesondere bei großen und komplexen Zuordnungsproblemen (d. h., viele zuzuordnende Entitäten und viele Randbedingungen) bei Anwendung der automatisierten Algorithmen ein hohes Einsparpotential vorliegt. Die für die Modellierung notwendige Arbeitszeit ist dabei vergleichbar mit der manuellen Ermittlung einer Lösung. Nach der Modellierung können in nahezu unbegrenzter Zahl weitere Varianten ermittelt werden und neue, günstigere Lösungen berechnet werden.

Ein weiteres, sehr komplexes Zuordnungsproblem – die Neuordnung von Fässern in einem stark regulierten Abfalllager bei Minimierung der Ortsdosisleistung und Neuordnungsaufwandes – wurde gelöst, um zu zeigen, dass auch radiologisch aufwendige Problemstellungen bearbeitet werden können. Für dieses Zuordnungsproblem existierte aufgrund der Komplexität und daraus folgenden hohen Planungsaufwandes keine vorgeschlagene Neuordnung. In diesem Teilvorhaben zeigten sich die Vorteile der automatisierten Planung am deutlichsten, da viele verschiedene Neuordnungsrealisierungen – gemäß der Paretofunktion der Variablen Ortsdosisleistung und Neuordnungsaufwand – ohne Zusatzaufwand ermittelt und gegenübergestellt werden konnten.

Die Anwendung von Bedingungserfüllungsalgorithmen auf (kerntechnische) Zuordnungsprobleme wird daher für ein erfolgreiches Verfahren gehalten, welches in der Zukunft durch weitere Randbedingungen (Geometrie der Abfallstücke, Schnittreihenfolge etc.) noch weiter ergänzt und detailliert werden kann. Entscheidungen können so noch besser mit quantitativen Argumenten substantiiert werden.

SUMMARY

The goal of this research project was to compare manually generated solutions of assignment problems ubiquitous in the context of radioactive waste management (e.g., packaging planning) with computer generated ones derived with automated algorithms. The comparison is based on the cost associated with each of these solutions, such as container costs, final repository costs and manipulation costs, whereas not all problems possess entries for each cost field.

The algorithms applied consist mainly of local search heuristics, which are normally employed to identify solutions for classical constraint satisfaction problems (e.g., Sudoku, curriculum planning with rooms, machine assignment, vehicle routing problems). We also investigate to what extent these algorithms, which can be parametrized, converge on solutions more quickly, depending on the algorithm parameters. This branch of the investigation is not subject of this report.

We demonstrate that large and complex assignment problems (i.e, large number of entities and many constraints) especially benefit from the automated solving compared to the manually generated solutions. Significant cost savings were identified. The operating expense necessary to generate the manual and computer assisted solutions are comparable. After modelling the problem, variants of the problem may be solved nearly indefinitely and may lead to solutions that are even more beneficial.

An additional complex reassignment problem – identification of a new arrangement of radioactive waste drums in a strongly regulated storage facility with the goal of minimizing local dose rates and rearrangement costs – was solved in order to demonstrate that radiologically intricate problems are also amenable to be modelled and solved with local search heuristic algorithms. For the aforementioned problem, no manually derived solution was present due to time-consuming nature of such a calculation. The advantages of such an automated planning were most evident here, since many different rearrangement realizations with two Pareto variables “rearrangement costs” and “local dose rate” were identified and juxtaposed for comparison without additional expenses.

The application of local search heuristic algorithms to (nuclear) assignment problems is deemed to be an appropriate and successful method, which may in future be extended by geometric constraints, sequencing constraints. Decisions on assignments may thus be substantiated by quantitative arguments even better.

INHALTSVERZEICHNIS

Seite:

1	EINLEITUNG	1
1.1	Hintergrund.....	1
1.2	Verpackungsprobleme als Bedingungserfüllungsprobleme	1
1.3	Gliederung und Aufgabenstellung des Forschungsvorhabens (FV)	2
1.4	Zusammenarbeit mit anderen Stellen.....	2
1.5	Arbeitspakete	3
2	HINTERGRUND	3
2.1	Übersicht der in der Kerntechnik verwendeten Optimierungsalgorithmen zur Kosten- oder Anzahlminimierung.....	3
2.2	Optimierung der Verpackungsplanung bei konkreten kerntechnischen Abfallkampagnen.....	4
2.3	Rechnergestützte Verpackungsplanung in nicht-kerntechnischen Bereichen.....	5
2.4	Fortschritte auf dem Gebiet bei anderen Stellen während Durchführung des FV	6
2.5	Fazit.....	6
3	ARBEITSPAKET 1: ERSTELLUNG DER AUTOMATISIERTEN VERPACKUNGSPLANUNGEN UND VERGLEICH MIT MANUELLEN REFERENZPLANUNGEN.....	7
3.1	Teilprojekt 1: Abschätzung und Minimierung der Anzahl benötigter Container im Rahmen des Rückbaus eines Forschungsreaktors.....	7
3.1.1	Datenlage.....	7
3.1.2	Identifizierung der Einstellmöglichkeiten von Fässern in Container	8
3.1.3	Radiologische Eigenschaften des zu verpackenden Abfalls.....	8
3.1.4	Resthohlraumverfüllung.....	10
3.1.5	Die Referenzbeladung	11
3.1.6	Randbedingungen und Optimierungsziele.....	11
3.1.7	Mathematische Beschreibung	12
3.1.8	Minimale Anzahl der Container allein auf der Basis der Beladevarianten	14
3.1.9	Verpackungsplanung auf der Basis der minimalen Anzahl Container pro Fasstyp.....	15
3.1.10	Fazit	16
3.2	Teilprojekt 2: Abschätzung der Anzahl benötigter Container für die Verpackung von kernbrennstoffhaltigen Pellets unter Berücksichtigung komplexer logistischer Randbedingungen	17
3.2.1	Einleitung	17
3.2.2	Datenlage.....	17
3.2.3	Randbedingungen und Optimierungsziele.....	20

3.2.4	Die Referenzbeladung	23
3.2.5	Mathematische Beschreibung	23
3.2.6	Optimierte Verpackungsplanung der Pellets.....	25
3.2.7	Fazit	28
3.3	Teilprojekt 3: Minimierung der Anzahl Container bei einer Fassverpackungskampagne eines stillgelegten Kernkraftwerks.....	29
3.3.1	Einleitung und Aufgabenstellung.....	29
3.3.2	Datenlage.....	29
3.3.3	Randbedingungen.....	30
3.3.4	Vorarbeiten	30
3.3.5	Die Referenzbeladung	31
3.3.6	Mathematische Beschreibung	33
3.3.7	Minimierung der Behälterkosten.....	34
3.3.8	Fazit	35
4	ARBEITSPAKET 2: ERZIELTE ZEIT-, KOSTEN- UND VOLUMENEINSPARUNGEN MIT BEZUG AUF DIE REFERENZPLANUNGEN	35
4.1	Übersicht.....	35
4.2	Vorgehensweise zur Identifizierung der Bearbeitungskosten	36
4.3	Kostenbilanz Teilprojekt 1.....	36
4.3.1	Gesamtkosten Projektteilnehmer.....	36
4.3.2	Gesamtkosten Forschungsnehmer	36
4.3.3	Fazit	37
4.4	Kostenbilanz Teilprojekt 2.....	37
4.4.1	Gesamtkosten Projektteilnehmer.....	37
4.4.2	Gesamtkosten Forschungsnehmer	37
4.4.3	Fazit	38
4.5	Kostenbilanz Teilprojekt 3.....	38
4.5.1	Gesamtkosten Projektteilnehmer.....	38
4.5.2	Gesamtkosten Forschungsnehmer	38
4.5.3	Fazit	39
4.6	Gesamtfazit Arbeitspaket 2.....	39
4.6.1	Kostenbilanz: Kosten durch die und während der Verpackungsplanung	39
4.6.2	Wissenschaftlich-technische Bilanz	39
5	ARBEITSPAKET 3: IDENTIFIZIERUNG EINER KOMPLEXEN DOSISMINIMIERENDEN UMLAGERUNGSSTRATEGIE IN EINEM ABFALLLAGER.....	40
5.1	Einleitung.....	40
5.2	Problem- und Aufgabenbeschreibung	41

5.3	Datenlage	41
5.3.1	Auslegung des Lagers für radioaktive Abfälle	41
5.3.2	Stellplätze	41
5.3.3	Genehmigungsregeln für das Abfalllager	42
5.3.4	Radiologische und physikalische Charakterisierung der Abfalleinheiten	42
5.4	Ortsdosisleistungsmessungen über 4 Kammern und Vergleich mit MicroShield® Rechnungen zur Validierung eines approximierten Dosisleistungsmodells.....	45
5.4.1	Messungen an ausgewählten Aufpunkten.....	45
5.4.2	Das Knotenmodell als Approximation der aus einer Kammer resultierenden Ortsdosisleistung	46
5.4.3	Ergebnisse des Knotenmodells und Vergleich mit Messwerten	47
5.5	Ergebnisse der Dosisleistungsminimierung für die betrachteten 4 Kammern	50
5.5.1	Modellierung des Problems und Durchführung der Optimierung.....	50
5.5.2	Korrelation des approximativen Multiplikationsalgorithmus mit vergleichenden MicroShield® Rechnungen.....	51
5.5.3	Erzielte Einsparung der Ortsdosisleistungssummen.....	51
5.5.4	Analyse der vom Optimierungsalgorithmus gewählten Umlagerungsstrategie	52
5.5.5	Fazit der Optimierung über die Dosisminimierung der Kammern der Messpunkte P1 bis P4.....	54
5.6	Pareto Optimierung: Gleichzeitige Ortsdosisleistungs- und Arbeitszeitminimierung	54
5.7	Zusammenfassung und Fazit	55
6	GESAMTFAZIT	56
7	LITERATUR.....	58

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Seite:

Abbildung 3-1:	Häufigkeiten der Störfallsummenwerte pro Fass gegliedert nach APG	10
Abbildung 3-2:	Verteilung der bekannten Höhen der Pellets als Bruchteil der zur Verfügung stehenden Innenhöhe eines KC des Typs IV. Die farbige Fläche zeigt den jeweiligen Anteil der Pellets in diesem Bin, die Obergrenze der farbigen Fläche zeigt die Anzahl der Pellets, die mindestens eine Stapelung entsprechen der Bingrenzen zulassen.	18
Abbildung 3-3:	Verteilung der Massen der Pellets.....	18
Abbildung 3-4:	Verteilung der Aktivität der Radonemitter in den Pellets	19
Abbildung 3-5:	Verteilung der Masse des Isotops U-235 in den Pellets.....	20
Abbildung 3-6:	Beladung eines KC mit Pelletsäulen (beispielhafte Darstellung)	20
Abbildung 3-7:	Lagerstruktur, Einteilung in die Lagerreihen. Nachdem ein Bereich in einer Reihe geleert wurde, wird der nächste Bereich für diese Reihe zugänglich	23
Abbildung 5-1:	Darstellung der nicht Tritium Aktivität, aufgeschlüsselt nach Abfallart, bezogen auf einige Grenzwerte	43
Abbildung 5-2:	Ausschöpfung von Grenzwerten einer Radionuklidgruppe, in einzelnen Genehmigungsbereichen, nach Abfallart sortiert.....	45
Abbildung 5-3:	Ergebnisse der Ortsdosisleistungsmessungen an den Aufpunkten P1 bis P4 und Vergleich mit MicroShield®-Rechnungen	46
Abbildung 5-4:	Approximation der Ortsdosisleistung über der Abdeckplatte, mittig auf y-z, durch Unterteilung der Kammern in verschiedene Höhenkoten (links: unterste Kote, rechts: oberste Kote).....	47
Abbildung 5-5:	Vergleich der zum Zeitpunkt der Aufnahme der Fässer in das Lager gemessenen Dosisleistung mit der der Dosisleistung, die auf Basis der auf dieses Datum zurückgerechneten Aktivität ermittelt wurde (blaue Punkte). Die schwarzen „x“ korrespondieren mit Fässern die eine endliche Dosisleistung aufweisen (Abzissenwert), denen jedoch keine entsprechenden Aktivitäten zugewiesen wurden.	49
Abbildung 5-6:	Dosisleistung vor der Optimierung (blau) und nach der Optimierung (rot) für die Kammern der einzelnen Messpunkte P1 bis P4. Die jeweils ausgefüllten Balken stellen direkte Dosisleistungswerte der Optimierungsroutine dar, die leeren Balken die mit MicroShield® ermittelten Vergleichswerte, auf der Basis der durch die Optimierung berechnete Fasszuordnung.....	52
Abbildung 5-7:	Pareto-Plot einer Optimierung zweier unabhängigen Variablen: Umlagerungszeit (Arbeitszeit) und Ortsdosisleistungssumme; gestrichelte Linie: Ortsdosisleistungssumme der Referenzbelegung.....	55

TABELLENVERZEICHNIS

Seite:

Tabelle 3-1:	Anzahl der bei Betrieb und Abbau anfallenden Fässer nach Fasstypen (ohne Betonschutt)	7
Tabelle 3-2:	Beschreibung der Beladevarianten	8
Tabelle 3-3:	Innengeometrie der Container mit Angabe des für eine Verfüllung zur Verfügung stehenden Resthohlraumvolumens	11
Tabelle 3-4:	Abgeschätzte Anzahl der benötigten Container pro Beladevariante gemäß Referenzbeladung	11
Tabelle 3-5:	Zusammenfassung der optimierten Beladung und Vergleich zur Referenzbeladung	16
Tabelle 3-6:	Grenzwerte für Stoffe mit dem niedrigsten Rückholaufwand (keine Einbettung in eine Matrix und außerhalb heißer Zellen bearbeitbar) aus den „Safeguards for Nuclear Material in Conditioned waste“	22
Tabelle 3-7:	Ausnutzung der Optimierungsziele für eine Pellet Verpackungsplanung	27
Tabelle 3-8:	Ausschöpfung einiger ausgewählter Grenzwerte für eine Pellet Verpackungsplanung	28
Tabelle 3-9:	Zusammenfassung der radiologischen Daten der Fässer der Referenzverpackung	29
Tabelle 3-10:	Zur Verfügung stehenden Beladevarianten für die Verpackung von den Referenzfässern	30
Tabelle 3-11:	Aktivitätsbeschränkungen und Störfallsummenwert Konrad-Container Behälterkategorie I	31
Tabelle 3-12:	Zur Verfügung gestellte Referenzbeladung der 120 Fässer	32
Tabelle 3-13:	Auslastung Grenzwerte der Referenzbeladung	32
Tabelle 3-14:	Zusammenfassung der optimierten Verpackungsplanung	34
Tabelle 5-1:	Anzahl Fässer nach Abfallart	43
Tabelle 5-2:	Messpunkt P1: Modellierungsannahmen für die Berechnung der Dosisleistungen (DL) und Ergebnisse der MicroShield®-Berechnung	48
Tabelle 5-3:	Messpunkt P2: Modellierungsannahmen für die Berechnung der Dosisleistungen (DL) und Ergebnisse der MicroShield®-Berechnung	48
Tabelle 5-4:	Messpunkt P3: Modellierungsannahmen für die Berechnung der Dosisleistungen (DL) und Ergebnisse der MicroShield® Berechnung	48
Tabelle 5-5:	Messpunkt P4: Modellierungsannahmen für die Berechnung der Dosisleistungen (DL) und Ergebnisse der MicroShield® Berechnung	48



Tabelle 5-6:	Aufschlüsselung der Umverteilung der Massen und gamma-relevanten Aktivitäten mit Bezug auf die gegenwärtige Belegung, unterteilt nach Höhenkoten	53
--------------	--	----

1 EINLEITUNG

1.1 Hintergrund

Im Zuge des anstehenden Rückbaus aller Kernkraftwerke in Deutschland werden bei der Entsorgung erhebliche Massen radioaktiven Abfalls anfallen. Bei einem Druckwasserreaktor (DWR) sind ca. 3 % der Kontrollbereichsmasse radioaktiver Abfall. Davon fallen schätzungsweise 3000 Mg als metallischer radioaktiver Abfall an und ca. 600 Mg an mineralischem radioaktivem Abfall. Zusätzlich werden beim Rückbau eines DWR ca. 500 Mg Sekundärabfall produziert, die auch entsorgt werden müssen. Etwas höhere Massen ergeben sich aufgrund des größeren Umfangs des Kontrollbereichs bei einem Siedewasserreaktor.

Ein großer Teil dieser Abfälle, insbesondere aktivierte Anteile im Reaktordruckbehälter, ist stark heterogen und bedarf daher besonderer Planung im Hinblick auf die Auswahl von Abfallbehältern für die Verpackung. Bei einer weitgehenden Zerlegung in kleine Einheiten können die einzelnen Stücke ihrer Aktivität und Dosisleistung gemäß passenden Behältertypen (Abschirmung, Fassungsvermögen) optimal zugeordnet werden, was allerdings erhöhten Aufwand für die (meist fernhantiert durchgeführte und daher kostenintensive) Zerlegung kostet. Bei geringem Zerlegungsumfang ist der hierfür notwendige Aufwand deutlich geringer, dafür lassen sich die Einzelteile nur weit ungünstiger verschiedenen Behältertypen zuordnen, so dass Behältergrenzwerte schlechter ausgenutzt werden können und die Kosten für die Verpackungen erheblich anwachsen. Bei der Verpackung der Abfälle muss ferner darauf geachtet werden, dass allen zu erwartenden Transport-, Handhabungs- und End-bzw. Zwischenlagerungsanforderungen Genüge getan wird. Die bestmögliche Planung der Verpackung stellt also ein mehrdimensionales Optimierungsproblem dar.

1.2 Verpackungsprobleme als Bedingungserfüllungsprobleme

Überraschenderweise werden diese Optimierungsprobleme in der Kerntechnik auch gegenwärtig noch weitgehend manuell gelöst. In vielen anderen Technologiesektoren haben sich dagegen für diese Art von Probleme Algorithmen rund um eine Art der Problemlösung gruppiert, die unter dem Namen „Constraint Satisfaction Programming (CSP)“ (Bedingungserfüllungsprogrammierung) bekannt ist. Hierbei wird das unterliegende Problem mathematisch formuliert, die Bedingungen aufgesetzt und an einen Solver („Löser“) übergeben. Dieser durchsucht in strukturierter Weise den mathematischen Raum, der durch die Problemstellung aufgespannt wird, bis eine gültige Lösung gefunden wurde. Diese gültige Lösung kann bei weiterer Suche noch optimiert werden, indem der Solver nicht nur gültige, sondern auch besonders günstige Lösungen durchsucht.

Das übergeordnete Ziel des Forschungsvorhabens (FV) ist es, CSP-Algorithmen zur Kosten- und Volumensenkung bei der Verpackung und Lagerung radioaktiver Abfälle und optimale Parameter dieser Algorithmen zu identifizieren. Dies soll durch Anwendung der Algorithmen auf realistische, in kerntechnischen Anlagen vorhandene Verpackungsprobleme erfolgen. Im Vorfeld und mit fortschreitender Bearbeitung des Themas stellte sich heraus, dass die CSP-Methodik trotz guter Eignung für diese Arten von Problemstellung im kerntechnischen Umfeld Deutschlands bislang kaum angewendet wurde.

1.3 Gliederung und Aufgabenstellung des Forschungsvorhabens (FV)

Aufgrund der Komplexität und der Neuheit des Verfahrens wurde das Vorhaben in zwei Teilziele untergliedert:

- Das erste Teilziel ist die Identifizierung verbesserter Lösungen von Logistik- und Verpackungsproblemen für vorhandene, aber bereits gelöste Logistik- und Verpackungsprobleme („Referenzplanungen“), wobei sich der Qualitätszugewinn in reduzierten Kosten zeigt. Bei der Berechnung dieser verbesserten Realisierung sollen verschiedene Algorithmen und deren Parameter im Hinblick auf die größtmögliche Kostenersparnis (etwa benötigtes Behältervolumen und Handhabungsvorgänge) hin untersucht werden. Insbesondere liegt der Fokus darauf herauszufinden, bei welcher Art von Verpackungsproblemen das Einsparpotential am größten ist. Hierfür werden tatsächliche, in nuklearen Anlagen vorhandene Logistik- und Verpackungsprobleme und – zur Berechnung der Einsparungsmöglichkeiten – deren Referenzplanungen herangezogen.
- Im zweiten Teilziel sollen diese Algorithmen und deren optimale Parameter auf noch zu planende Logistik- und Verpackungsprobleme angewandt werden, wobei auch hier eine weitere Parameteroptimierung durchgeführt wird. Die zu lösenden Probleme unterscheiden sich im Hinblick zu denen des ersten Teilziels in der höheren Komplexität; so sollen die Reduktionssziele nicht nur aus eher einfach zu modellierende Behältervolumen oder Handhabungsvorgänge bestehenden, sondern auch aus komplexeren abgeleiteten Größen wie etwa Dosisleistung.

Der Schwerpunkt liegt bei jedem Teilziel nicht so sehr in der Modellierung des jeweiligen Problems, sondern in der Identifizierung passender Suchalgorithmen und Optimierung von deren Parametern für die Berechnung eines bereits sehr guten Ergebnisses in einer festen, möglichst kurzen Zeitspanne. Dokumentiert werden in diesem Bericht die „Business Cases“: Der kostenmäßige Vergleich der Referenzplanung mit der automatisiert erstellten Planung, ohne jedoch auf die Identifizierung der Suchalgorithmen und deren Parameter einzugehen.

1.4 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Das erste Teilziel (s.o.) besteht darin, manuell ermittelte Referenzverpackungen mit denen zu vergleichen, die automatisiert mit den beschriebenen Verfahren berechnet wurden.

Es wurde zu diesem Zweck Kontakt mit mehreren kerntechnischen Unternehmen und Einrichtungen aufgenommen. Die Unternehmen und Einrichtungen, die Referenzplanungen im Rahmen des FV zur Verfügung stellten, wurden so gewählt, um eine möglichst große

- örtliche Diversität,
- Bandbreite hinsichtlich der Problemstellung sowie
- Unterschiedlichkeit in den Unternehmenszielen (Forschung, öffentliche Hand, Kernkraftwerk, Lagerung, Verarbeitung)

zu erreichen.

Konkret bestanden die Projektteilnehmer, die im Rahmen des FV Daten zur Verfügung gestellt haben, aus folgenden Unternehmen und Einrichtungen (anonymisiert):

- eine Forschungsreaktoranlage,
- ein Konditionierungsbetrieb der öffentlichen Hand,

- ein Abfalllager der öffentlichen Hand,
- ein stillgelegtes Kernkraftwerk.

1.5 Arbeitspakete

Arbeitspaket 1:

Zur Erreichung des ersten Teilziels wurden Verpackungsplanungen echter, jedoch bereits durchgeführter oder geplanter Abfallkampagnen mithilfe von Lösungsalgorithmen von CSP-Problemen berechnet.

Die zu betrachtenden Abfallgebinde sowie die genauen Randbedingungen wurden mit dem jeweiligen Abfallverursacher abgestimmt. Anschließend wurden – auch mit dem Abfallverursacher – die verwendeten Abfalldaten (Nuklidspezifische Aktivität, Masse usw.) sowie die Kostenstruktur der Verpackung (z. B. Behälterkosten, Handhabungskosten, Schnittkosten) ermittelt.

Nach Erstellung eines CSP-Modells wurden Verpackungslösungen erzeugt. Die Validität dieser Lösungen wurden mit dem Abfallverursacher besprochen. Für den Fall, dass ungültige Lösungen erzeugt werden, wurden das Modell und/oder die Kostenstruktur angepasst.

Für jedes der Modelle wurden zum Abschluss der Validierung die vielversprechendsten CSP-Algorithmen identifiziert und anschließend deren Parameter optimiert.

Die Ergebnisse dieses Arbeitspakets wird in Kapitel 3 dokumentiert.

Arbeitspaket 2:

Nach dem Abschluss der Modellierung, der Validierung und der automatisierten Berechnung optimierter Verpackungslösungen wurden die berechneten Lösungen mit denen verglichen, die in der Vergangenheit manuell erstellt wurden. Die Diskussion der Kostenersparnis ist Gegenstand des Kapitels 0. Insbesondere werden die Zielkosten erfasst und unter möglichst gleichen Voraussetzungen miteinander verglichen. Es wurde dargestellt, unter welchen Voraussetzungen die höchsten Einsparungen möglich sind.

Arbeitspaket 3:

Es wurde im Sinne des Teilziels 2 ein sehr komplexes, mehrdimensionales Logistikproblem identifiziert, welches mithilfe der CSP-Algorithmen gelöst wurde. Dieses Verpackungsproblem verwendet z.T. die Ergebnisse aus Arbeitspaket 1. Zusammengefasst werden die Ergebnisse dieses Arbeitspakets sowie die Lösung im Kapitel 5.

2 HINTERGRUND

2.1 Übersicht der in der Kerntechnik verwendeten Optimierungsalgorithmen zur Kosten- oder Anzahlminimierung

Im kerntechnischen Bereich existieren so gut wie keine Publikationen zum Thema rechnergestützte Ermittlung kostenminimaler Verpackungslösungen. Am Institut für Industriebetriebslehre und Industrielle Produktion (IIP) des Karlsruher Institute of Technology (KIT) wurden Untersuchungen durchgeführt,

wie kerntechnische Rückbauprojekte kostenminimal gestaltet werden können [HÜB 16]. Zwar werden hier auch Algorithmen zur Kostenminimierung eingesetzt, der Fokus liegt jedoch sehr auf Projektterminplänen. Auf der KONTEC 2013 stellte Westinghouse ein integriertes Waste Management und Optimierungstool vor [AIG 13]. Hiermit sollen Abfallflüsse in einer Konditionierungsanlage simuliert und kostenoptimiert werden können. Jedoch wird auch hier kein Bezug auf die Generierung von konkreten Verpackungslösungen genommen.

Ein scheinbar ähnliches Ziel wie das vorliegende Projekt verfolgt die STEAG Energy Services GmbH: Hier sollen auf der Basis eines (nicht veröffentlichten) Algorithmus Behälter vorausgewählt werden, so dass bei einer Verpackung die verwendeten Behälter optimal ausgelastet sind [BOC 14]. Die Anwendung KOBEO der STEAG Energy Services GmbH sucht die Behälter so aus, dass die verwendete Anzahl (jedoch nicht deren Kosten oder Volumina) so gering wie möglich ist. Im starken Gegensatz zum Ziel des FV kann eine Zuordnung konkreter Abfallstücke zu den Behältern nicht erfolgen. Diese Anwendung eignet sich also primär zur Abschätzung geeigneter Behältertypen und deren Anzahl. Ein Anwendungsfall in der Praxis wurde nach Kenntnis der Autoren des vorliegenden Abschlussberichts nicht veröffentlicht. Möglich ist mit der Anwendung KOBEO eine Behältervorauswahl durch die Lösung einer Matrix mit Randbedingungen: Jeweils ein Spaltenvektor gibt die Grenzwerte eines Behältertyps an (z. B. Masse, Aktivität usw.), die Summen dieser mit Koeffizienten versehenen Spaltenvektoren ergeben einen Spaltenvektor, der die entsprechenden Abfallgesamteigenschaften (Masse, Aktivität, etc.) enthält. Dieses Gleichungssystem kann als Integer Linear Programm (ILP) aufgefasst und gelöst werden, wobei die Koeffizienten ganzzahlig sein müssen. Ein derartiger Ansatz geht allerdings stark vereinfachend davon aus, dass die Abfallstücke beliebig teilbar sind, außerdem ergeben die Koeffizienten ausschließlich die Anzahl der jeweiligen Behältertypen, ohne jedoch eine direkte Zuordnung der Abfallstücke zu einem bestimmten Behälter zu bestimmen.

Somit bleibt festzuhalten, dass über vergleichbare Untersuchungen und Algorithmen, wie sie im vorliegenden Bericht beschrieben sind, zuvor in der Literatur nicht berichtet wurde.

2.2 Optimierung der Verpackungsplanung bei konkreten kerntechnischen Abfallkampagnen

Es existiert eine Reihe von Vorträgen, die sich mit der Optimierung von Verpackungsplanungen beschäftigen. Die Energiewerke Nord GmbH hielt beispielsweise im Rahmen der Jahrestagung Kerntechnik 2017 den Vortrag „Optimierte Verpackung von radioaktivem Bauschutt in Konrad-Containern“ [KAR 17]. In diesem Vortrag ging es jedoch um die Volumenoptimierung, wobei die Optimierung der Auslastung durch andere endlagerrelevante Grenzwerte, etwa nuklidspezifische oder stoffliche, keine Rolle spielen. Zudem wurde die Verpackungsplanung ausschließlich manuell erstellt.

AREVA GmbH trug im Rahmen des TÜV SÜD Expertentreffs Strahlenschutz 2016 vor, wie ca. 2000 Steuerelementflügelsegmente optimal verpackt werden [MAY 16]: Hier werden laut Verfahrensbeschreibung – durch eine nicht benannte Verfahrensweise – Behälter und Container zunächst vorausgewählt. Der beschriebene Verpackungsalgorithmus sieht dann vor, virtuell und Stück für Stück die einzelnen zu verpackenden Komponenten in die Behälter einzustellen, bei Nichteinhaltung der Dosis oder der Aktivitätsgrenzwerte die verwendete Verpackung zu „verbessern“ oder die zusätzliche Abschirmung einzuplanen. Da dieses von den Autoren so genannte „Puzzlespiel“ nicht automatisiert abläuft, kann nur eine sehr begrenzte Anzahl von Möglichkeiten ausprobiert worden sein. Im Gegensatz dazu wurde im

Rahmen der im vorliegenden Bericht dargestellten Arbeiten eine Anwendung entwickelt, die tausende von Verpackungsrealisierungen pro Sekunde auf Machbarkeit und Gesamtkosten bewertet, wobei im Laufe weniger Minuten eine machbare und kostenminimale Verpackungsrealisierung ermittelt werden kann, wie in Abschnitt 3 im Detail dargestellt wird.

Die GNS Gesellschaft für Nuklear-Service mbH hat mehrere Beiträge zum Thema Verpackungsoptimierung veröffentlicht ([FRI 07], [FRI 09], [FRI 13]). Hierbei geht es jedoch nicht um mathematische Zuordnungsoptimierung, sondern um Schnitt- und Volumenoptimierung: Die Abfälle müssen so zerlegt werden, dass sie die Behälterinnenvolumina möglichst auslasten. Die Aktivitäts- oder Dosisauslastung spielt jedoch nur eine untergeordnete Rolle, da im Vorfeld eine Partitionierung des Problems durch eine Behältervorauswahl stattgefunden hat. Damit wird sichergestellt, dass unabhängig davon, welche Abfälle einer Aktivitätspartition in einen Behälter bestimmten Typs beladen wird, die Grenzwerte eingehalten werden.

Alle hier dargestellten Arbeiten und Verfahren behandeln damit Teilaspekte des vorliegenden FV.

2.3 Rechnergestützte Verpackungsplanung in nicht-kerntechnischen Bereichen

Außerhalb der Kerntechnik werden routinemäßig Algorithmen eingesetzt, um die Auslastung (virtueller) „Behälter“ zu optimieren, wobei hierunter alle Arten von Gegenständen oder Systemen zu verstehen sind, die eine begrenzte Menge von Einheiten fassen können: In Serverzentren besteht die Herausforderung, die durchzuführenden Dienste so auf vorhandene Server zu verteilen, dass kein Server überlastet ist, die Anzahl der verwendeten Server jedoch gleichzeitig minimal ist (cloud- oder load-balancing) [WIK 16]. Hier würde etwa mithilfe der im vorliegenden FV dargestellten Algorithmen eine dienst-scharfe Zuordnung zu den Servern berechnet werden können.

Ähnliche Fragestellungen ergeben sich beim Speichern von sehr großen Dateien auf Datenträgern mit begrenzter Kapazität: Hier stellt sich die Frage, wie die Dateien auf die Datenträger so gespeichert werden, dass möglichst wenig Datenträger notwendig sind und gleichzeitig keine Datei fragmentiert (auf mehrere Datenträger verteilt) abgelegt werden muss.

In der konventionellen Verpackungsindustrie ist es von großer Bedeutung für den Transport, möglichst viele Pakete auf einer Palette unterzubringen. Die Beantwortung der Frage, wie die Pakete am besten dafür angeordnet sein müssen, ist nicht trivial. Diesem Thema widmet sich beispielsweise der Lehrstuhl von Prof. Dr. Wäscher der Universität Magdeburg [SIL 14], [BOR 13]. Hier werden die Pakete als Rechtecke in 2 Dimensionen betrachtet. Ähnliche Fragestellungen ergeben sich bei der Beladung von Containern mit quaderförmigen Objekten. Auch hier ist die Berücksichtigung der diskreten Eigenschaften der Pakete von Bedeutung.

Für dreidimensionale Körper beliebiger Form hat das Fraunhofer Institut für Algorithmen und Wissenschaftliches Rechnen (SCAI) ein von der Automobilindustrie verwendetes Verpackungstool entwickelt, welches vorgegebene geometrische Objekte so auf einen vorgegebenen Behälter verteilt, dass das beanspruchte Volumen minimiert wird [FRA 16]. Allerdings müssen die Objekte geometrisch identisch sein. Der verwendete Algorithmus ist nicht bekannt, lässt sich aber mit Sicherheit nicht auf die im vorliegenden FV behandelten Aufgaben anwenden, da im Allgemeinen die Abfalleigenschaften der Abfälle nicht gleich sind.

Zusammengefasst lässt sich feststellen, dass im konventionellen (also nicht-kerntechnischen) Bereich die Verwendung von Algorithmen zur elementscharfen Zuordnung zu (virtuellen) Behältern gängig und gut untersucht ist.

2.4 Fortschritte auf dem Gebiet bei anderen Stellen während Durchführung des FV

Während der Durchführung des im vorliegenden Bericht beschriebenen FV wurde ein neues, am Institut für Industriebetriebslehre und Industrielle Forschung (IIP) mit Partnern aus der Industrie durchgeführtes Forschungshaben „Entwicklung eines benutzerfreundlichen kostenoptimierenden Planungswerkzeugs für kerntechnische Rückbauprojekte unter der Berücksichtigung von Stoffströmen zur Ressourcenplanung (NukPlaRStoR)“ bekannt. In diesem Projekt soll es auch um kostenoptimierte Behälterplanungen gehen.

Das Projekt wird unter der Nummer 15S9414A geführt. Es wurde erst kürzlich – im Juli 2019 - begonnen, die Vorstellung eines Prototyps soll im November 2020 im Rahmen der ICOND 2020 erfolgen. Quantitative Ergebnisse wurden im Halbjahresbericht II/2019 der GRS [GRS 19] nicht veröffentlicht. Weitere Fortschritte sind nicht bekannt. Zum Zeitpunkt der Berichtserstellung war der Halbjahresbericht für das 1. Halbjahr 2020 noch nicht zugänglich.

2.5 Fazit

Im kerntechnischen Bereich haben computerbasierte Optimierungsmethoden zur elementscharfen Zuordnung – mit Ausnahme der kostenminimalen Terminplanermittlung – bislang kaum Beachtung gefunden. Die wenigen Referenzen hinsichtlich Optimierung beziehen sich entweder auf eine mechanische Optimierung (etwa durch Schnittführung) oder auf eine Optimierung einer Behältervorauswahl durch ILP, bei der die diskreten Abfalleigenschaften nicht berücksichtigt werden können und somit keine konkrete Zuordnung der Abfälle zu Behältern möglich ist. Auf der anderen Seite werden in anderen konventionellen Bereichen – z. B. der Logistik, der Verpackungsindustrie und der Informationstechnologie – den im vorliegenden FV ähnliche, elementscharfe Verfahren angewandt, die weiterentwickelt werden. Das nunmehr zum Abschluss gekommene FV hat vor diesem Hintergrund untersucht, wie einige dieser bereits vorhandenen Methoden auf die Verpackung radioaktiver Abfälle aus dem Rückbau der Kernkraftwerke und anderer kerntechnischer Anlagen und auf die Endlagerung angewandt werden können, um mit Bezug auf manuelle Planungen reale Kosten und Volumina einzusparen.

3 ARBEITSPAKET 1: ERSTELLUNG DER AUTOMATISIERTEN VERPACKUNGSPLANUNGEN UND VERGLEICH MIT MANUELLEN REFERENZPLANUNGEN

3.1 Teilprojekt 1: Abschätzung und Minimierung der Anzahl benötigter Container im Rahmen des Rückbaus eines Forschungsreaktors

3.1.1 Datenlage

Für die Lagerung der beim Betrieb und beim Abbau einer Forschungsreaktoranlage und eines Heißen Labors angefallenen bzw. anfallenden radioaktiven Abfälle bis zum Abtransport in ein Endlager des Bundes soll eine neue Transportbereitstellungshalle gebaut werden. Die bislang erzeugten radioaktiven Abfälle bestehen überwiegend aus 200-l-, 280-l- und 400-l-Fässern und lagern in einer Bereitstellungshalle (BSH) auf dem Gelände der Forschungsanlage.

Die TBH erlaubt eine zweifache Stapelung von Konrad-Containern (KC)¹ Typ IV auf Typ III. Durch die Größe der Fläche ist die Anzahl der KC Typ III auf 45 begrenzt.

Die bisherigen Abfälle bestehen aus 379 Fässer mit Betriebsabfällen mit einer Gesamt-Abfallmasse von 143,5 Mg („Betrieb“), 255 weitere Fässer mit einer Gesamt-Abfallmasse von 101,0 Mg befinden sich am Standort der Wiederaufarbeitungsanlage Karlsruhe (WAK), wo radioaktive Abfälle aus dem Betrieb konditioniert und in Fässer verpackt wurden („Extern Konditioniert“), siehe Tabelle 3-1. Des Weiteren lagern in der BSH die Zellenboxen aus dem Abbau der Bleizellen mit einer Gesamtmasse von 3,2 Mg, für deren Lagerung ein zusätzlicher KC benötigt wird.

Aktuelle Abschätzungen zeigen, dass durch Stilllegung des Forschungsreaktors und Abbau der Forschungsreaktoranlage und des Heißen Labors voraussichtlich weitere 300,1 Mg radioaktiver Abfälle erzeugt werden („Abbau“). Etwa 1,0 Mg dieser Abfälle werden in 3 Gussbehälter überführt werden.

Daneben werden im Rahmen des Rückbaus voraussichtlich 495 200-l-Fässer an Betonschutt anfallen, entsprechend einem Volumen von ca. 99 m³. Dieser Betonschutt soll während der Verpackung als Resthohlraumvolumenverfüllung von Containern verwendet werden.

Tabelle 3-1: Anzahl der bei Betrieb und Abbau anfallenden Fässer nach Fasstypen (ohne Betonschutt)

Herkunft	Anzahl der Fässer nach Fasstypen			Abfallmasse [Mg]
	200 l - Fass	280 l - Fass	400 l - Fass	
Betrieb	317	27	35	ca. 143,5 + 3,2
Extern Konditioniert	255	-	-	ca. 101,0
Abbau	ca. 281	-	-	ca. 299,1
Summe	ca. 853	27	35	ca. 546,8

¹ Im Kapitel 3 geht es ausschließlich um Konrad-Container; die Bezeichnung „Container“ wird im Wesentlichen dann verwendet, wenn es um geometrische Sachverhalte geht.

3.1.2 Identifizierung der Einstellmöglichkeiten von Fässern in Container

Im Vorfeld, aber außerhalb des FV, wurden 10 Beladevarianten für das Einstellen von Fässern in Konrad-Container identifiziert (Tabelle 3-2). Eine Beladevariante besteht aus Obergrenzen der Anzahl von Fasstypen in einem Behältertyp. Die Obergrenzen wurden geometrisch ermittelt. Es wurden sowohl störfallfeste (sf) als auch nicht störfallfeste (nsf) Konrad-Container zugrunde gelegt.

Tabelle 3-2: Beschreibung der Beladevarianten

Beladevariante	Behältergrundtyp	Störfallfest	Anzahl Fasstyp		
			200 l - Fass	280 l - Fass	400 l - Fass
A	KC IV	✓	8	0	0
B	KC III	✗	15	0	0
C	KC IV	✗	4	1	2
D(a)	KC IV	✗	6	0	2
D(b)	KC IV	✗	6	2	0
D(c)	KC IV	✗	6	1	1
E	KC IV	✗	6	0	4
F	KC IV	✗	2	4	2
G	KC IV	✗	0	7	0
H	KC IV	✗	14	0	0
I	KC IV	✗	Verpackung von Bleizellen		

3.1.3 Radiologische Eigenschaften des zu verpackenden Abfalls

Im Vorfeld wurde – neben der geometrischen Limitierung der Container entsprechend ihrer Beladevarianten – der Störfallsummenwert der Endlagerungsbedingungen Konrad [BRE 14] als limitierendes Kriterium bei der Verpackungsplanung identifiziert. Gemäß den Endlagerungsbedingungen darf die Summe der Störfallsummenwerte aller in einem nicht-störfallfesten Container eingestellten Fässer den Wert von 0,1 nicht überschreiten². Der Summenwert des einzelnen Fasses hängt davon ab, welcher Abfallproduktgruppe (APG) das Fass zugeordnet wird. Grundsätzlich wird versucht, eine möglichst hohe APG zu erreichen, da eine hohe APG bei gleichem Summenwert höhere Aktivitäten pro Fass entspricht und somit bei gegebener Aktivität die Ausschöpfung der Summenwerte niedriger liegt als bei niedrigen APG. Bei Einstellen von Fässern mehrerer APG in ein KC muss der Störfallsummenwert des Containers auf der Basis der niedrigsten APG berechnet werden.

In Abbildung 3-1 werden die Häufigkeiten der Fässer pro Störfallsummenwertintervall aufgezeigt. Bei Fässern der APG 01 (Abbildung 3-1, oben links) variieren die Störfallwerte um 5 Größenordnungen zwischen 10^{-4} und 10^1 . Die hohe Bandbreite ermöglicht die Mischung von Fässern unterschiedlicher

² Streng genommen darf der Störfallsummenwert 1 nicht überschreiten, aber ab 0,1 ist gemäß Endlagerungsbedingungen eine separate Zustimmung erforderlich

Störfallsummenwerte in einem Container. Die gestrichelte rote Linie gibt in etwa an, wie hoch der einzelne Fass-Störfallsummenwert sein darf, so dass 10 willkürliche Fässer in einen nicht-störfallfesten Container eingestellt werden dürfen. Die durchgezogene Linie gibt an, wie hoch der Störfallwert eines einzelnen Fasses sein darf, um – ggf. als einziges Fass – in einen nicht-störfallfesten Container eingestellt werden zu können. Es wird deutlich, dass schon für Fässer dieser APG ein störfallfester Container notwendig ist, da die drei Fässer mit den höchsten Störfallsummenwerte (zwei im Störfallsummenwertintervall $[10^{-1}, 10^0]$, eins im Störfallsummenwertintervall $[10^0, 10^1]$) unmöglich in nicht-störfallfesten Containern eingestellt werden können, ohne den Grenzwert von 0,1 zu überschreiten. Aus diesem Grund sieht die im Vorfeld identifizierte Verpackungsplanung einen störfallfesten Container vor.

In Abbildung 3-1, rechts oben, werden 2 Häufigkeitsverteilungen dargestellt: Die blauen Balken stellen die Häufigkeiten der Fässer pro Störfallsummenwertintervall nach APG 02 dar, die roten Balken stellen die Häufigkeitsverteilung dieser Fässer für Störfallsummenwerte nach APG 01. Die erste Häufigkeitsverteilung (APG 02) erstreckt sich über 7 Größenordnungen. 2 Fässer haben einen Störfallsummenwert oberhalb von 0,1; diese würden ebenfalls in einen störfallfesten Container eingestellt werden müssen. Bei Kategorisierung der Fässer als APG 01 verschiebt sich die Häufigkeitsverteilung um ca. 2 Größenordnungen zu höheren Störfallsummenwerten. Bei Anwendung der APG 01 auf alle dieser Fässer würden hiervon 310 einen Störfallwert von über 0,1 aufweisen und müssten zur Einhaltung der Endlagerungsbedingungen in einen störfallfesten Container eingestellt werden.

Bei Mischung dieser APG 02 Fässer mit Fässern der APG 01 (oben links) in einem KC würden die „blaue“ Verteilung der APG 01 Fässer sowie die „rote“ Verteilung der APG 02 Fässer zur Anwendung kommen. Im Allgemeinen sollte daher auf eine Mischung verzichtet werden, da der Störfallsummenwert pro Container in der Regel höher sein wird als bei APG-reiner Verpackung. Im Einzelfall kann es jedoch nützlich sein, Fässer verschiedener APG in einem Container zu mischen: Betrachtet wir 13 Fässer der APG 01 sowie 17 Fässer der APG 02. Diese müssen in Container eingestellt werden, die je 10 Fässer aufnehmen können. Hier können je 10 Fässer APG-rein verpackt werden, die restlichen 10 müssten jedoch gemischt verpackt werden.

Bei den beiden unteren Quadranten der Abbildung sind für einzelne Fässer bei Anwendung ihrer eigenen APG keine störfallfesten Container notwendig. Die Störfallsummenwerte erstrecken sich über 5 bzw. 6 Größenordnungen.

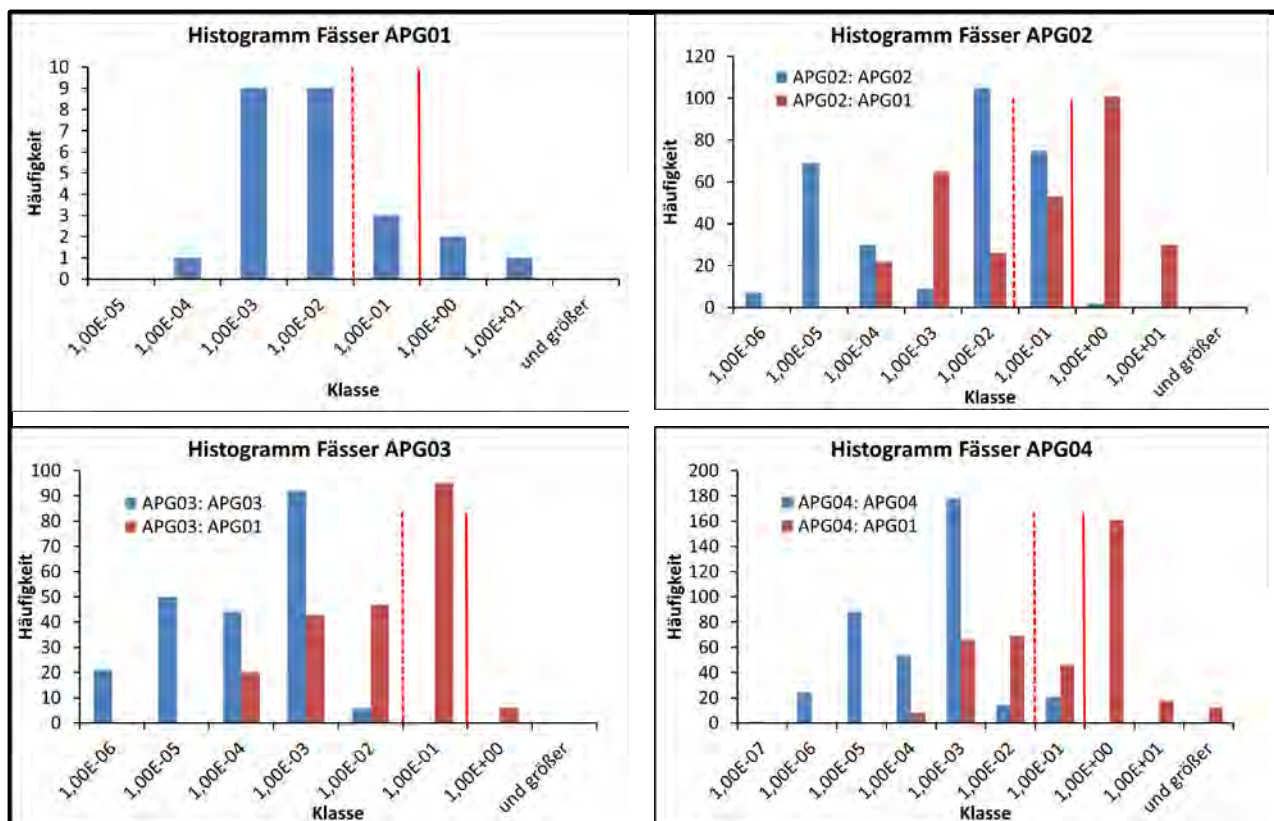


Abbildung 3-1: Häufigkeiten der Störfallsummenwerte pro Fass gegliedert nach APG

Anmerkung: Die gestrichelte Linie gibt den ungefähren Störfallsummengrenzwert pro Fass an, wenn die Fässer willkürlich Containern zugeordnet werden (Annahme: 10 Fässer pro Container). Die durchgezogene Linie gibt den Störfallsummengrenzwert von 0,1 an. Die roten Balken geben die Störfallsummenwerthäufigkeit an, wenn die nach APG 02/APG 03/APG 04 konditionierten Abfälle tatsächlich als APG 01 konditionierte Abfälle behandelt würden.

3.1.4 Resthohlraumverfüllung

Der benötigte Hohlraum für die Resthohlraumverfüllung wird in Tabelle 3-3 gezeigt. Die Innenvolumen Container des Typs KC IV und des Typs KC III betragen jeweils 7,81 m³ und 6,34 m³. Zur Verpackung des Bauschutts mit einem Volumen von ca. 99 m³ sind daher 13 KC Typ III oder 16 KC Typ IV (ohne Fasszuladung) notwendig. Bei Resthohlraumverfüllung muss wegen der endlichen Störfallsummenkonzentration des Bauschutts von 2,9E-3 (APG 02) pro m³ darauf geachtet werden, dass der Störfallsummenwert des Restvolumens zuzüglich das der Fässer den Grenzwert von 0,1 nicht überschreitet.

Tabelle 3-3: Innengeometrie der Container mit Angabe des für eine Verfüllung zur Verfügung stehenden Resthohlraumvolumens

Behälter	Anzahl	Länge [m]	Breite [m]	Höhe [m]	Durch-mes-ser [m]	Gesamtvolumen [m ³]
KC III		2,96	1,66	1,59	-	7,81
KC IV		2,96	1,66	1,29	-	6,34

3.1.5 Die Referenzbeladung

Auf der Basis der Beladevarianten sowie der radiologischen Eigenschaften wurde im Vorfeld ein Verpackungskonzept ermittelt.

Die Anzahl der Container (s. Tabelle 3-4) wurde in der Referenzplanung unter der Annahme berechnet, dass nur Fässer *einer* APG in einen nicht-störfallfesten Container eingestellt werden: Eine Mischung von Fässern verschiedener APG in einem nicht-störfallfesten Container wurde daher in der Referenzplanung nicht zugelassen.

Es wurde der Bedarf von insgesamt 78 KC ermittelt, davon 42 vom Typ IV und 36 vom Typ III (s. Tabelle 3-4). Nur einer dieser Container enthielt keine Fässer, sondern die zerlegten Bleizellen.

Tabelle 3-4: Abgeschätzte Anzahl der benötigten Container pro Beladevariante gemäß Referenzbeladung

APG	Variante	KC-Typ	Anzahl
01	A	IV sf	0,5
	B	III	1
	C	IV	1
02	A	IV sf	0,5
	D (a bis c)	IV	11
	B	III	19

APG	Variante	KC-Typ	Anzahl
03	E	IV	6
	F	IV	1
	G	IV	1
	H	IV	10
	I ¹⁾	IV	1
04	B	III	16
	H	IV	10
Summe:			78

¹⁾ Die Beladevariante I enthält ausschließlich die zerlegte heiße Zelle und ist daher nicht Gegenstand der Referenzplanung.

3.1.6 Randbedingungen und Optimierungsziele

3.1.6.1 Randbedingungen

Im Rahmen der automatisierten Verpackungsplanung, die als Bestandteil dieses FV durchgeführt wurde, waren die Anforderungen der Endlagerungsbedingungen [BRE 14] vollumfänglich einzuhalten.

Für die hier vorliegenden Fassabfälle wurde im Vorfeld, jedoch außerhalb des FV, der *Störfallsummenwert* als limitierende radiologische Größe bei der Verpackungsplanung identifiziert. Dieser muss unterhalb von 0,1 liegen, für störfallfeste Container darf er den Wert von 1 nicht überschreiten. Der Störfallsummenwert des Containers ermittelt sich zum einen aus den Summen der Störfallsummenwerte der Fässer, zum anderen aus dem mit Bauschutt verfüllten Resthohlraumvolumina. Hierbei gilt es zu beachten, dass unvollständig beladene Container (d. h. solche mit einer zu geringen Anzahl Fässer) mehr Bauschutt aufnehmen müssen, der Grenzwert muss für diesen Fall ebenfalls eingehalten werden. Der in der Verpackungsplanung verwendete Algorithmus unterstellt bei Bauschuttverfüllung stets eine komplette Verfüllung des verbliebenen Hohlraums (auch bei Fassunterladung).

Der Störfallsummenwert wird auf der Basis der niedrigsten APG aller im Container eingestellten Fässer ermittelt. Der Bauschutt ist der APG02 zugewiesen.

Des Weiteren dürfen zwingend die max. Anzahl Fässer pro Typ der Beladevarianten nicht überschritten werden (Fassüberladungen).

Als übergeordnete Anforderung darf die Masse von 20 Mg pro Container nicht überschritten werden.

3.1.6.2 Optimierungsziel

Das Optimierungsziel ist die Minimierung der Anzahl verwendeter Behälter. Ein Kostenvektor lag nicht vor.

3.1.7 Mathematische Beschreibung

Die mathematische Beschreibung ist unten aufgeführt. Es wird hier und in den Folgekapiteln die Einsteinsche Summenkonvention verwendet: Über doppelt auftretende Indizes innerhalb eines Produkts wird summiert.

Term oder Gleichung	Wert oder Bedeutung	Kommentar
$x_{i,j} = \begin{cases} 1 \\ 0 \end{cases}$	1 wenn Fass j dem Container i zugeordnet ist 0 sonst	
$a_{j,t} = \begin{cases} 1 \\ 0 \end{cases}$	1 wenn Fass j dem Fasstyp t entspricht, 0 sonst	
$y_i = \begin{cases} 1 \\ 0 \end{cases}$	1 wenn Container i nicht leer ist, 0 sonst	
$\sum_t a_{j,t} = 1 \forall j$		Jedes Fass ist einem Fasstyp zugeordnet
$x_{i,j} a_{j,t} \leq F_{i,t},$ $\forall t \in \{200l, 280l, 400l\}$	$F_{i,t}$: fasstyp- t -Kapazität des Containers i	
$\sum_i x_{i,j} = 1 \forall j$		Jedes Fass muss genau einem Container zugeordnet werden
$G_i = \{g_j x_{i,j} = 1 \forall j\} \forall i$	G_i : die Menge aller jeweiligen maximalen Abfallproduktgruppen der Fässer in dem Container i g_j : die maximale Abfallproduktgruppe des Fasses j	

Randbedingungen für ABK II störfallfeste Container:

$$x_{i,j}ssw_{j,II} \leq 1$$

$$\forall i \in \{m' + 1, \dots, m\}$$

Randbedingungen für nicht ABK II störfallfeste Container

Für Container, für die gilt: $|G_i| = 1$ und $G_i \neq \{2\}$

$$x_{i,j}ssw_{j,g_j} \leq 0,1 \forall i \in \{1, \dots, m'\}$$

Für Container, für die gilt $|G_i| = 1$ und $G_i = \{2\}$

$$(V_i - x_{i,j}v_j)b_{ssw} + x_{i,j}ssw_{j,02} \leq 0,1$$

$$\forall i \in \{1, \dots, m'\}$$

Für Container, für die gilt $|G_i| > 1$ und $k = \min(G_i) \forall i \in \{1, \dots, m'\}, k = 2$

$ssw_{j,II}$: Störfallsummenwert der ABK II des Fasses j

ssw_{j,g_j} : Störfallsummenwert der maximalen APG g_j (ABK I) des Fasses j

V_i : Innenvolumen des Containers i

v_j : Außenvolumen des Fasses j

b_{ssw} : Störfallsummenkonzentration für Bauschutt (APG 02)

$ssw_{j,02}$: APG02 Störfallsummenwert des Fasses j

Anzahl nicht-störfallfeste Container (Konstante): m' (Index der nsf Container: 1, 2, ... m')

Anzahl störfallfeste Container (Konstante): $m - m'$ (Index der sf Container: $m' + 1, \dots, m$)

Summe der Störfallsummenwerte der Abfallbehälterklasse II aller in störfallfesten Container i eingestellten Fässer darf 1 nicht überschreiten

Nicht störfallfester Container enthält Fässer nur einer (maximalen) APG, die nicht 02 ist

Summe der Störfallsummenwerte aller dem Container i zugeordneten Fässer darf 0,1 nicht überschreiten

Nicht störfallfester Container enthält Fässer nur einer (maximalen) APG, die gleich 02 ist

Der APG 02 Störfallsummenwert aller dem Container i zugeordneten Fässer inkl. des Störfallsummenwerts des mit Bauschutt gefüllten Restvolumens darf 0,1 nicht überschreiten

Nicht störfallfester Container enthält Fässer mehrerer

$$(V_i - x_{i,j}v_j)b_{ssw} + \sum_{j=1}^n x_{i,j}ssw_{j,02} \leq 0,1$$

Für Container, für die gilt $|G_i| > 1$ und $k = \min(G_i) \forall i \in \{1, \dots, m'\}, k \neq 2$

$$x_{i,j}ssw_{j,k} \leq 0,1$$

Optimierungsziele

$$\text{Minimiere } B = \sum_{i=1}^m y_i = \sum_{i=1}^{m'} nsf_i + \sum_{i=m'+1}^m sf_i$$

$ssw_{j,02}$: Störfallsummenwert der APG 02 des Fasses j

nsf_i : ABK II nicht störfallfester Container $i, i \in \{1, \dots, m'\}$

sf_i : ABK II störfallfester Container $i, i \in \{m' + 1, m\}$

APG, deren minimale APG die 02 ist

Der APG02 Störfallsummenwert aller dem Container i zugeordneten Fässer inkl. des Störfallsummenwerts des mit Bauschutt gefüllten Restvolumens darf 0,1 nicht überschreiten

Nicht störfallfester Container enthält Fässer mehrerer APG, deren minimale APG nicht die 02 ist

Summe der Störfallsummenwerte aller dem Container i zugeordneten Fässer darf 0,1 nicht überschreiten

B : Die Anzahl aller nicht leeren Container

3.1.8 Minimale Anzahl der Container allein auf der Basis der Beladevarianten

Zur Bestimmung der minimalen Anzahl der möglichen Container für dieses Verpackungsproblem ausschließlich auf der Basis von Fasstypen, muss zunächst folgende Ungleichung gelöst werden:

$$\begin{pmatrix} 8 & 15 & 4 & 6 & 6 & 6 & 6 & 2 & 0 & 14 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 2 & 1 & 0 & 4 & 7 & 0 \\ 0 & 0 & 2 & 2 & 0 & 1 & 4 & 2 & 0 & 0 \end{pmatrix} \vec{f} \geq \begin{pmatrix} 853 \\ 27 \\ 35 \end{pmatrix},$$

$$\min(\sum \vec{f}).$$

Hierbei entspricht die Matrix $(F^T)_{i,t}$ (vgl. Tabelle 3-2), die rechte Seite stellt die zu verpackenden Fässer pro Fasstyp dar. Die Formulierung der Ungleichung als größer oder gleich ($\geq$) ist notwendig um zu verhindern, dass zu wenig Kapazität pro Fasstyp vorhanden ist. Der Vektor $\vec{f}$ besteht aus ganzzahligen Koeffizienten, die die Anzahl der Container pro Beladevariante beschreibt.

Die obige Gleichung kann mit gängigen Integer Linear-Programming (ILP)-Solvem gelöst werden. Die minimale Anzahl Container basierend auf den Fasstypen wurde mithilfe des ILP-Solvers aus Octave identifiziert [GLP 12].

Für beliebige Werte der Einträge in $\vec{f}$ ist das Minimum $\sum \vec{x} = 67$. Die Koeffizienten dafür sind:

$$1, 53, 0, 0, 0, 0, 7, 4, 2, 0$$

Die Beladevarianten werden stark von den KC Typ III dominiert (zweiter Eintrag). Die neue Bereitstellungshalle lässt jedoch lediglich ein Maximum von 45 Containern für jeweils den Typ III und den Typ IV zu (vgl. Abschnitt 3.1.1).

Für bis zu 45 Container des Typs KC III (dargestellt durch die zweite Spalte der obigen Matrix) gemäß den Randbedingungen in Abschnitt 3.1.6 ist $\min(\sum \vec{f}) = 68$, die Koeffizienten $\vec{x}$ sind:

$$(1, 45, 0, 0, 0, 0, 6, 6, 1, 9)$$

Hieraus ergibt sich eine Überkapazität von nur 9 Fässern, wovon jeweils 4 von den Typen 200-l und 280-l sind und einer vom Typ 400-l.

Im nächsten Schritt geht es darum zu prüfen, ob für diese Beladetypen eine gültige Verpackungslösung möglich ist, d.h., ob es möglich ist, die Fässer diesen KC so zuzuordnen, dass der Störfallsummengrenzwert für keinen Container überschritten wird. Das hängt zum einen davon ab, ob die in Abbildung 3-1 gezeigten Fässer prinzipiell so gemischt werden können, dass keine Störfallsummenwerte überschritten werden. Zum anderen hängt es davon ab, ob – falls so eine Mischung existiert – diese vom Algorithmus gefunden wird.

3.1.9 Verpackungsplanung auf der Basis der minimalen Anzahl Container pro Fasstyp

Das Verpackungsproblem wurde als Bedingungserfüllungsproblem modelliert und nach der minimalen Anzahl nicht-leerer Behälter gelöst. Nach wenigen Minuten Rechenzeit wurden ein optimales Ergebnis³ erzielt (Tabelle 3-5).

³ Im Allgemeinen liefert ein Ergebnis des Berechnungsalgorithmus keine Aussage über Optimalität oder sogar Distanz zum optimalen Ergebnis. In diesem Fall ist das Ergebnis optimal, da es eine gültige Lösung mit dem minimierten Behältervektor $\vec{x}$ ergibt.

Tabelle 3-5: Zusammenfassung der optimierten Beladung und Vergleich zur Referenzbeladung

Beladevariante	200l	280l	400l	Anzahl Container für Referenzverpackung	Anzahl Container für optimierte Verpackung
Variante A (sf)	8	0	0	1	1
Variante B	15	0	0	36	45
Variante C	4	1	2	1	0
Variante D(a)	6	0	2	1	0
Variante D(b)	6	2	0	5	0
Variante D(c)	6	1	1	5	0
Variante E	6	0	4	6	6
Variante F	2	4	2	1	6
Variante G	0	7	0	1	1
Variante H	14	0	0	20	9
Anzahl bestehender Fässer	853	27	35		
Fasskapazität Referenzverpackung	936	27	35		
Fasskapazität optimierte Verpackung	857	31	36		
Summe verwendeter Container				77	68
Summe benötigtes Endlagervolumen				541 m ³	497 m ³

Das hohe Einsparpotential gegenüber der Referenzbeladung ergibt sich maßgeblich aus der Mischung Fässer verschiedener APG in einem Container, trotz des daraus sich ergebenden höheren Störfallsummenwerts.

3.1.10 Fazit

Für eine hohe Anzahl von Fassabfällen (ca. 1400 Fässer, wovon der Inhalt von ca. 500 Fässer zur Resthohlraumverfüllung mit Bauschutt verwendet werden soll) wurde mithilfe eines Bedingungserfüllungslösers eine endlagergerechte Verpackungsplanung erstellt. Es konnte gezeigt werden, dass unter den gegebenen Bedingungen mit Bezug auf die Referenzplanung 9 Behälter eingespart werden können, was ca. 50 m³ Endlagervolumen entspricht.

Für eine realistische Verpackungskampagne ist eine derartige Verpackungsplanung allerdings nicht realistisch, da hier eine Verpackungsumgebung unterstellt wird, in der entweder

- alle Fässer gleich gut zugänglich sind, aber nur ein Container offen ist, oder
- nur ein Fass gleichzeitig zugänglich ist, jedoch alle Container geöffnet sind.

In der Realität wird sowohl eine endliche Untermenge der Fässer zugänglich sein als auch eine geringe Anzahl an Behältern gleichzeitig beladen werden können. Die genauen Randbedingungen werden im Rahmen der Rückbauplanung spezifiziert. Mit solchen Randbedingungen kann der Bedingungserfüllungslöser ebenfalls umgehen (vgl. Abschnitt 3.2).

3.2 Teilprojekt 2: Abschätzung der Anzahl benötigter Container für die Verpackung von kernbrennstoffhaltigen Pellets unter Berücksichtigung komplexer logistischer Randbedingungen

3.2.1 Einleitung

Bei einer Konditionierungsanlage sollen einige hundert Granulatpresslinge (Pellets) aus den Fässern, in denen sie derzeit gelagert sind, in Container für die Endlagerung im Endlager Konrad umgeladen werden.

Dies wird durch eine Reihe von Umständen erschwert, welche das Problem zur Lösung mittels Bedingungserfüllungsalgorithmen prädestinieren.

Zum einen limitieren die geometrischen Eigenschaften der Pellets eine willkürliche Zuordnung zu Containern, da die Höhenverteilung der Pellets nicht jede Ganzzahl Pellets in einem Container zulässt. In dieser Weise ist diese Verpackungsplanung von Pellets noch variabler als die Verpackungsplanung von Fässern (vgl. Abschnitt 3.1), bei der eine feste Anzahl Fässer eines Typs in einen Container eingestellt werden durfte.

Zum anderen begrenzen radiologische Eigenschaften, im Wesentlichen die Aktivität der Radonemitter und die Transportgrenzwerte nach ADR, die Verpackungsmöglichkeiten.

Abschließend sind die Fässer gegenwärtig in Reihen und Sektionen gelagert; während der Verpackung der Pellets erzeugt die Handhabung bestimmter Fässer „weiter hinten“ in einer Reihe vor der Handhabung eines weiter vorne gelegenen Fasses einen endlichen logistischen Aufwand; die Summe aller Aufwände sollte nach Möglichkeit minimiert werden.

3.2.2 Datenlage

3.2.2.1 Anzahl

Der Datensatz besteht aus 816 Pellets, die in 468 Fässern verpackt sind. In jedem Fass befinden sich bis zu drei Pellets.

3.2.2.2 Volumen

Die Pellets sollen ausschließlich in KC des Typs IV verpackt werden.

Das verfügbare Innenvolumen der Konrad-Container (KC) dieses Typs beschränkt die maximale Anzahl von Pellets pro KC. Die Nutzung der Grundfläche dieses Typs KC ist durch die 14 Pelletsäulen (vgl. Abschnitt 3.2.3.1) vorgegeben.

In Abbildung 3-2 ist die Verteilung der bekannten realen Höhen der Pellets dargestellt. Da durch die Höhe der Pellets eine Einschränkung zu erwarten ist, wurden die in Abbildung 3-2 dargestellten Bins so gewählt, dass sie ganzzahligen Bruchteilen der verfügbaren Innenhöhe entsprechen. Die Abbildung zeigt, dass der größte Teil der Pellets in Säulen von zwischen 2 und 4 Lagen gestapelt werden kann. Zusammen mit der Randbedingung, dass 14 Säulen in einen KC eingestellt werden können, ergibt sich aus den Volumenbeschränkungen allein eine zu erwartende Beladung von ca. 28 (zwei Pellets pro Säule) bis 42 (drei Pellets pro Säule) Pellets pro KC.

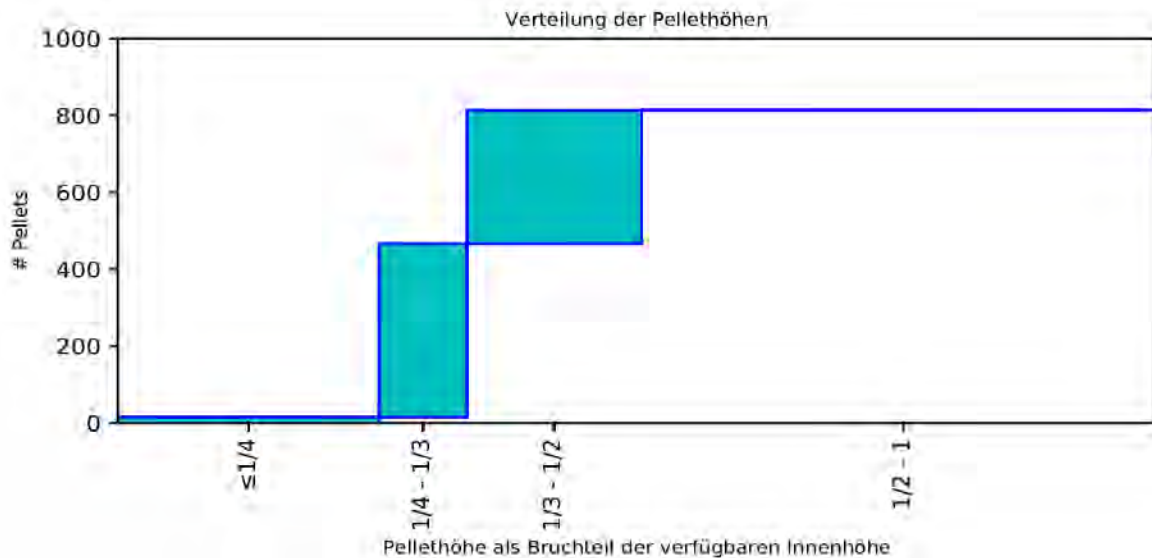


Abbildung 3-2: Verteilung der bekannten Höhen der Pellets als Bruchteil der zur Verfügung stehenden Innenhöhe eines KC des Typs IV. Die farbige Fläche zeigt den jeweiligen Anteil der Pellets in diesem Bin, die Obergrenze der farbigen Fläche zeigt die Anzahl der Pellets, die mindestens eine Stapelung entsprechen der Bingrenzen zulassen.

3.2.2.3 Masse

In Abbildung 3-3 ist zunächst die Verteilung der Pelletmassen abgebildet. Die Masse eines Pellets beträgt im Mittel ca. 143 kg. Die maximale Masse für einen KC beträgt 20 Mg, daher ergibt sich aus der Masse keine unmittelbare Beschränkung der Beladung eines KC.

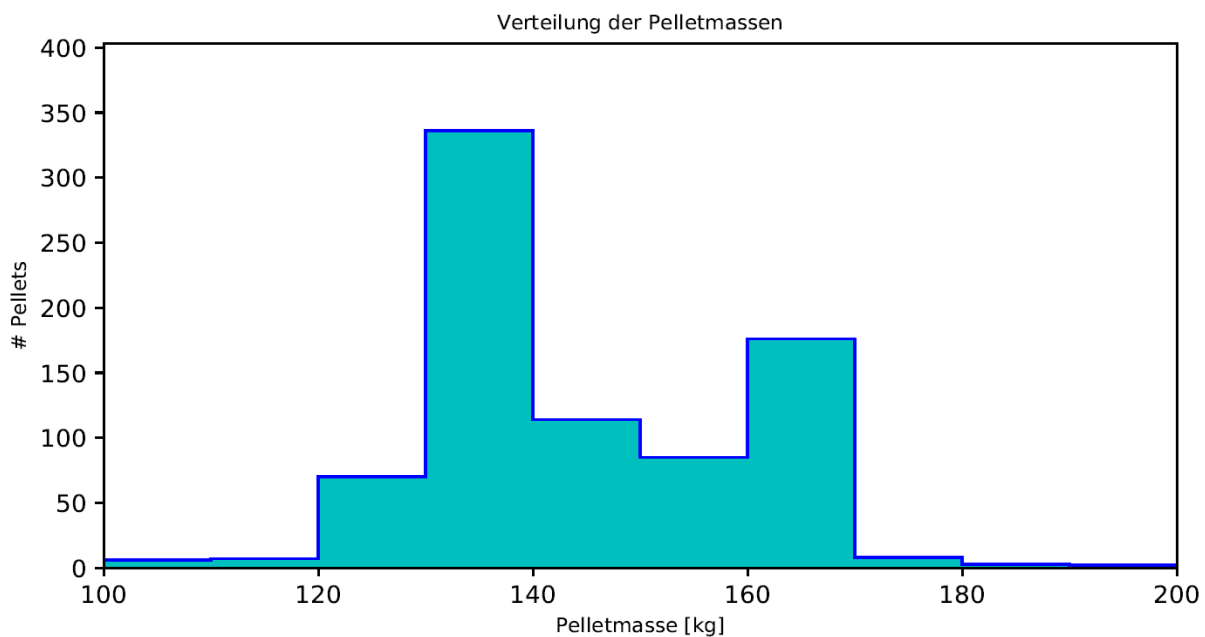


Abbildung 3-3: Verteilung der Massen der Pellets

3.2.2.4 Aktivität der Radonemitter

In Abbildung 3-4 ist die Verteilung der Aktivität der Radon-220-Emitter (Ra-224, Ra-228, Ac-228, Th-228 und Th-232) dargestellt. Für diese Größe gibt es einen Grenzwert für KCs in der Standardausführung (1,0 MBq) und einen Grenzwert für speziell ertüchtigte KCs (50,0 MBq).

In dieser Abbildung (und den folgenden Abbildungen) wurden die Bins als ganz- oder halbzahlige Vielfache der maximalen Anzahl von Säulen in einem KC (14 Säulen) gewählt. Bei angenommenen 2 Pellets pro Säule in nicht ertüchtigten KC (d.h., insgesamt 28 Pellets pro KC) könnten die 140 Pellets mit den niedrigsten Radonaktivitäten (die ersten drei blauen Balken) in einen KC eingestellt werden, ohne dass diese Pellets speziell gemischt werden müssten. Im Gegensatz dazu könnten alle Pellets in ertüchtigte KC eingestellt werden, selbst bei der Annahme von 3 Pellets pro Säule ($3 \times 14 = 42$).

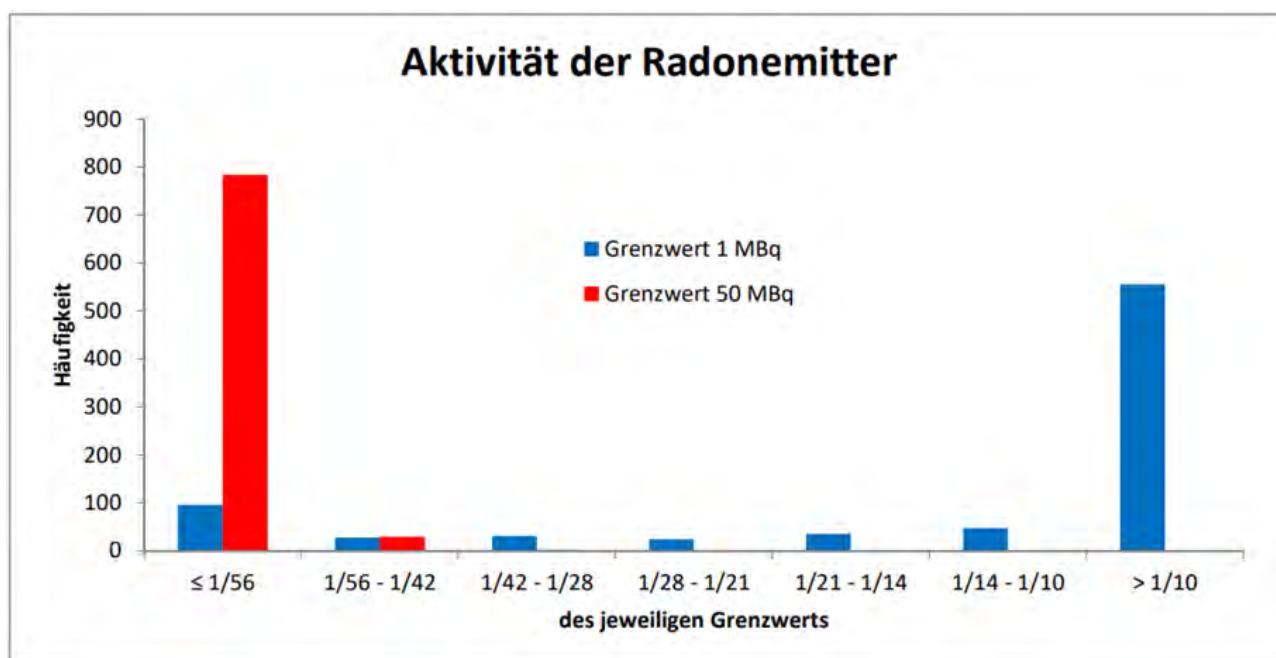


Abbildung 3-4: Verteilung der Aktivität der Radonemitter in den Pellets

Es wird unmittelbar klar, dass allein unter dem Gesichtspunkt der Radonemissionen nur wenige KCs ohne die Zusatzmaßnahmen, welche den höheren Grenzwert erlauben, gepackt werden könnten. Mehr als die Hälfte der Pellets erlaubt nur unter Nutzung der Zusatzmaßnahmen eine effiziente Verpackung. Für die Beladung der KCs mit Zusatzmaßnahmen ergeben sich keine stärkeren Einschränkungen als aus den Volumenbeschränkungen (vgl. Abschnitt 3.2.2.2) ohnehin erfolgen.

3.2.2.5 U-235-Masse

In Abbildung 3-5 ist die Verteilung der Masse des Isotops U-235 in Anteilen des Grenzwerts von 45 g/KC [ADR 15] angegeben. Die Bins wurden als ganz- und halbzahlige Vielfache von 14 bzw. der jeweiligen Bruchteile des Grenzwerts gewählt.

Es zeigt sich, dass die meisten Pellets keine (signifikanten) Einschränkungen an die Beladung der KCs zeigen. Diese Randbedingung muss daher nicht implementiert werden.

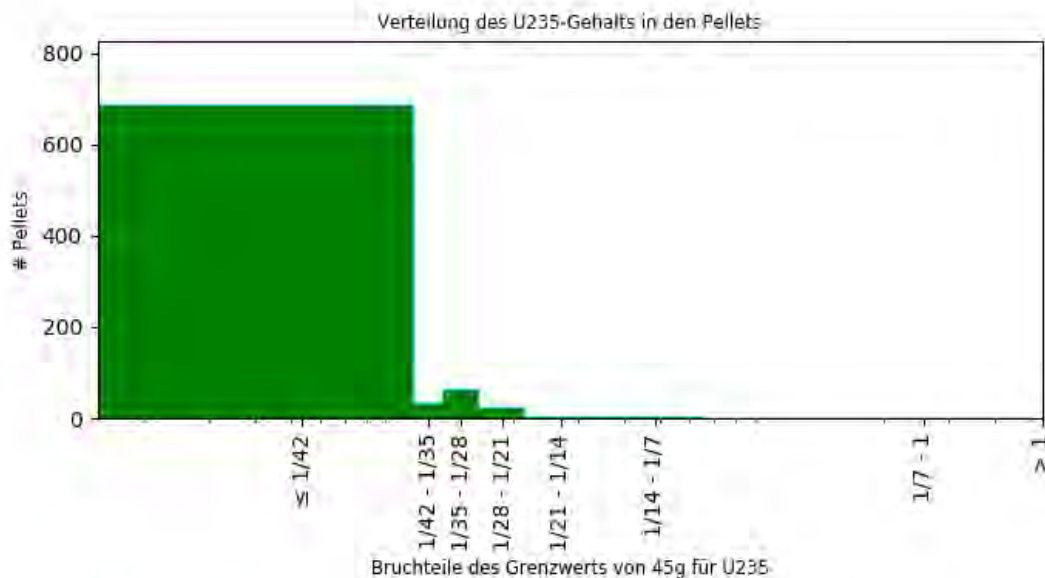


Abbildung 3-5: Verteilung der Masse des Isotops U-235 in den Pellets

Die Werte für die Masse von U-235 dominieren die Masse der spaltbaren Nuklide (U-233, U-235, Pu-239 und Pu-241) sowie die Abschätzung für hochangereichertes Uran.

3.2.3 Randbedingungen und Optimierungsziele

Die Pellets sollen aus den Fässern entnommen und, wie in Abbildung 3-6 gezeigt, stapelweise in die Container eingestellt werden.



Abbildung 3-6: Beladung eines KC mit Pelletsäulen (beispielhafte Darstellung)

3.2.3.1 Physikalische Randbedingungen

Die Grundfläche eines KC des Typs IV erlaubt die Unterbringung von 14 Säulen, welche jeweils aus mehreren Pellets bestehen können. In ihrer Höhe sind die Säulen durch die Bauart des KC Typ-IV auf 1190 mm beschränkt.

3.2.3.2 Endlagerungsbedingungen

Aus den Endlagerungsbedingungen des Endlagers Konrad [BRE 14] ergeben sich neben einem Maximalgewicht von 20 Mg eine Reihe von Anforderungen an den Nuklidgehalt der einzelnen KCs.

Der Störfallsummenwert ist auf 0,1 begrenzt. Er berechnet sich aus der Summe der Quotienten aus Nuklidaktivitäten und der Grenzwerte aus Tabelle 3 und 4 der Endlagerbedingungen [BRE 14].

Die maximal zulässige thermische Beeinflussung des Wirtsgesteins führt zu einer oberen Schranke an die Wärmeleistung eines einzelnen KC und damit an die zulässige Aktivität. Die Grenzwerte werden in Tabelle 5 und 6 der Endlagerbedingungen [BRE 14] aufgelistet.

Schließlich legen die die Endlagerungsbedingungen [BRE 14] Obergrenzen für die Masse bzw. Aktivität von spaltbaren Nukliden fest, um die Kritikalitätssicherheit zu gewährleisten.

Weitere Grenzwerte aus den Endlagerungsbedingungen für die Ortsdosisleistung an der Oberfläche des KC sowie in 1 m und 2 m Abstand, sowie Grenzwerte für die Oberflächenaktivitätskonzentration werden nicht in den Berechnungen berücksichtigt.

3.2.3.3 Transportrecht

Der Transport der fertig gepackten KCs muss entsprechend der Vorgaben des „European Agreement concerning the International Carriage of Dangerous Goods by Road (ADR)“ [ADR 15] verschiedene Grenzwerte für die Aktivität und die spezifische Aktivität einhalten.

Die KC sollen als Industriever sandstücke IP-2, welche den Anforderungen für Stoffe geringer spezifischer Aktivität (LSA-II-Stoffe) genügen, versandt werden.

Für die *Grenzwerte für die spezifische Aktivität* werden die A_2 -Werte gemäß Kapitel 2.2.7. und Unterkapitel der [ADR 15] herangezogen. Deren Einhaltung wird wie zuvor aus der Summe der Quotienten aus spezifischer Aktivität und dem zugehörigen Grenzwert ermittelt.

Weitere *Aktivitätsgrenzwerte* für 25 Nuklide werden aus der Tabelle 1.10.3.1.3 der ADR abgeleitet.

Aus den Bestimmungen in Kapitel 2.2.7.2.3.5 ergeben sich Grenzwerte für die *maximale Masse spaltbarer Stoffe* pro Gebinde bzw. pro Transportfahrzeug.

Auch hier bestehen Dosisleistungsbegrenzungen, die in den Berechnungen jedoch keine Berücksichtigung finden.

3.2.3.4 Safeguards for Nuclear Material

Aus den Bestimmungen der Safeguards ergeben sich *maximale Massenkonzentrationen* für spaltbare Nuklide. Die Pellets werden in die niedrigste Kategorie („overpacked, compacted or treated in any manner presenting a moderate additional recovery effort“) eingeordnet, da keine Angaben zum Einschluss der Radionuklide in eine Matrix vorliegen.

Tabelle 3-6: Grenzwerte für Stoffe mit dem niedrigsten Rückholaufwand (keine Einbettung in eine Matrix und außerhalb heißer Zellen bearbeitbar) aus den „Safeguards for Nuclear Material in Conditioned waste“

Nuklid	maximale Massenkonzentration [kg/t]
Pu oder U-233	0,003
U-235 in HEU	0,003
U-235 in LEU	0,01
NU	1,0
DU oder Th	2,0

3.2.3.5 Anzahl Container mit erhöhter Radon Aktivität

Grundsätzlich beträgt der Aktivitätsgrenzwert für Radonemitter 1 MBq pro Container. Durch spezielle Ertüchtigungen (etwa durch Einsatz eines Aktivkohlefilters) erhöht sich dieser Grenzwert auf 50 MBq. Die Anzahl Container, die so einer Ertüchtigung bedürfen, sollte jedoch so gering wie möglich sein.

3.2.3.6 Organisatorische Randbedingungen

Neben den in vorigen Abschnitten dargestellten Randbedingungen ergeben sich auch aus den räumlichen Gegebenheiten und dem Beladeprozess Einschränkungen, die durch eine gültige Beladeplanung erfüllt werden müssen. Diese Bedingungen können hier nicht vollständig dargestellt werden, da ansonsten die Anonymität des Projektteilnehmers nicht gewährleistet werden kann. Der verwendete Algorithmus berücksichtigt jedoch diese Bedingungen in vollem Umfang.

Die Pellets sind in Fässern verpackt, wobei ein Fass zwischen ein und drei Pellets enthält. Der Verladeprozess bezieht sich für den größten Teil auf Fässer als Einheiten, es können also nicht einzelne Pellets entnommen und der Rest des Fasses zurückgestellt werden.

3.2.3.7 Handhabungsbeschränkungen

Die Fässer sind an zwei Orten („Lager“ und „Zelle“) in Reihen gestapelt (Abbildung 3-7). Auf jede der insgesamt drei Reihen (zwei im „Lager“, eine in der „Zelle“) kann unabhängig von den anderen beiden zugegriffen werden. Die Reihen sind in sich jedoch in Sektionen unterteilt (farbig markiert), die beim Zugriff berücksichtigt werden sollten. So kann nur jeweils auf die Sektion mit dem höchsten Index innerhalb einer Reihe zugegriffen werden.

Fässer, die den gleichen Index innerhalb einer Reihe besitzen, können ohne Handhabungsbeschränkungen ausgelagert und deren Pellets verpackt werden. Erst sobald alle Fässer des gleichen Index einer Reihe ausgelagert (und deren Pellets verpackt) wurden, können die Fässer des nächsthöheren Index ausgelagert und deren Inhalte verpackt werden.

Falls eine Verpackungsrealisierung Pellets eines noch nicht verfügbaren Fasses einem Container zuordnet (etwa zuerst ein „gelbes“, oder ein „rotes“ falls noch nicht alle orangefarbenen Fässer einer Reihe verpackt wurden) dann entsteht ein Mehraufwand.

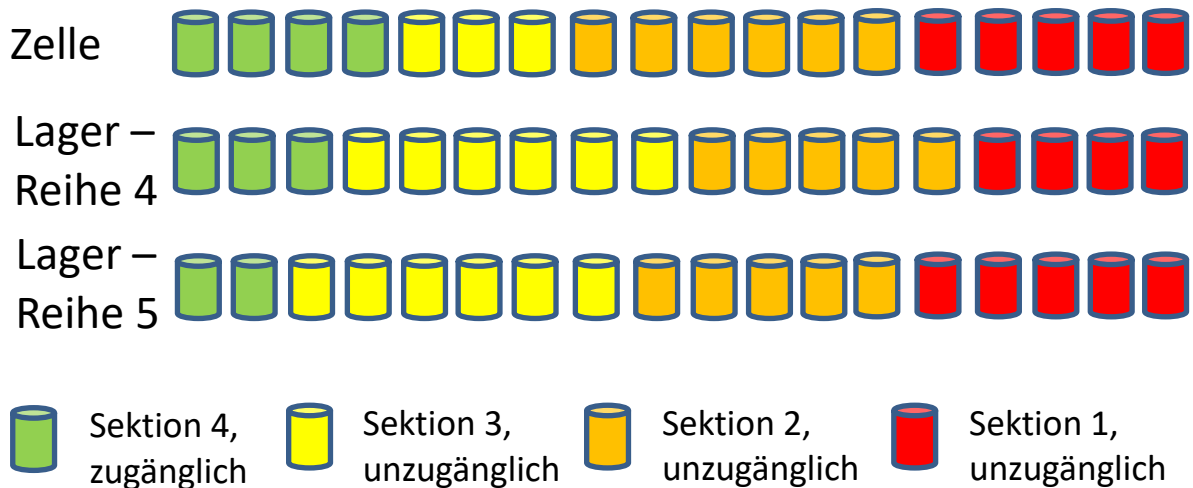


Abbildung 3-7: Lagerstruktur, Einteilung in die Lagerreihen. Nachdem ein Bereich in einer Reihe geleert wurde, wird der nächste Bereich für diese Reihe zugänglich

3.2.4 Die Referenzbeladung

Im Rahmen der manuell erstellten Referenzbeladung wurde keine pelletscharfe Beladeplanung durchgeführt, sondern es wurde die obere und untere Grenze der Anzahl der zu verwendenden Container abgeschätzt. Diese Abschätzung beruht ausschließlich auf den Pellethöhen (vgl. Abschnitt 3.2.2.2); weder die Anzahl der Ersatzmaßnahmen für Radongehalte über dem Grenzwert noch die Grenzwerte aus dem Transportrecht noch die Lagersituation wurde bei der Erstellung der Referenzplanung berücksichtigt.

Die untere Abschätzung ergibt sich aus der Beladung von 3 Pellets pro Säule, d.h., 816 Pellets / 3 Pellets pro Säule / 14 Säulen pro Container = 20 Container. Analog dazu ergibt die obere Abschätzung bei nur 2 Pellets pro Säule 29 Container.

3.2.5 Mathematische Beschreibung

Die Problembeschreibung als lineares Programm ist unten aufgeführt.

Term oder Gleichung	Wert oder Bedeutung	Kommentar
$f_{(r,a),j} = \begin{cases} 1 \\ 0 \end{cases}$	=1, wenn Pellet j dem Fass der Reihe r und Sektion a zugeordnet ist =0, sonst	(feste Zuordnung)
$\sum_{(r,a)} f_{(r,a),j} = 1 \forall j$		Jedes Pellet muss genau einer Reihe und Sektion zugeordnet werden
$s_{i,j} = \begin{cases} 1 \\ 0 \end{cases}$	=1, wenn Pellet j der Säule i zugeordnet ist =0 sonst	

$$\sum_i s_{i,j} = 1 \forall j$$

$$c_{k,i} = \begin{cases} 1 \\ 0 \end{cases}$$

$$y_k = \begin{cases} 1 \\ 0 \end{cases}$$

$$p_{k,j} = c_{k,i} s_{i,j} = \begin{cases} 1 \\ 0 \end{cases}$$

Randbedingungen auf Säulen:

$$s_{i,j} h_j < 1190 \text{ mm } \forall i$$

Randbedingungen auf Containern

$$p_{k,j} \text{ssw}_j \leq 0,1 \forall k$$

$$p_{k,j} m_{U235;j} \leq 45 \text{ g } \forall k$$

$$\frac{p_{k,j} A_j}{p_{k,j} m_j} \leq 10^{-4} A_{2;k} / \text{g } \forall k$$

$$p_{k,j} R_j \leq 50 \text{ MBq } \forall k$$

Optimierungsziele

$$\{(a_{l;1}, a_{l;2}) \mid$$

$$f_{(r,a_1),j}(s^T)_{i_1,j} = 1,$$

$$f_{(r,a_2),j}(s^T)_{i_2,j} = 1,$$

$$i_1 < i_2,$$

Jedes Pellet j muss genau einer Säule i zugeordnet werden

=1, wenn Säule i dem Container k zugeordnet ist

=0 sonst

=1 wenn Container k nicht leer

=0 sonst

=1 wenn Pellet j dem Container k zugeordnet ist

=0 sonst

h_j : Höhe des Pellets j

ssw_j : Störfallsummenwert des Pellets j

$m_{U235;j}$: U-235 Masse des Pellets j

A_j : Aktivität des Pellets j

m_j : Masse des Pellets j

$A_{2;k}$: A₂ Wert für das Nuklidgemisch im Container k gemäß ADR

R_j : Aktivität der Radonemitter in Pellet j

(feste Zuordnung:

$$i \text{ div } 14 = k$$

$$i \text{ div } 14 \neq k)$$

Störfallsummenwert in einem Container nicht über 0,1

U-235 Masse in einem Container nicht über 45 g

Mittlere spez. Aktivität in einem Container muss geringer sein als $10^{-4} A_2$ für das Nuklidgemisch des Containers

Aktivität der Radonemitter in einem Container nicht größer als 50 MBq

Für den Fall, dass das Fass 2 in einer „späteren“ Säule verpackt wird als ein Fass 1, die Sektion $a_{l;2}$ von Fass 2 aber geringer ist als die von Fass 1 $a_{l;1}$, so ist das Tupel

$a_1 > a_2,$ $\forall r \}$		$(a_{l;1}, a_{l;2})$: Element der verletzenden Menge
$p_{k,j}R_j - 1 \text{ MBq} = \Delta R_k \forall k,$ $\Delta R_k > 0$ Minimierung von	Radonüberschuss ohne Grenzwertverletzung	
$w_1 \sum_l 1 +$ $w_2 \sum_k \Delta R_k +$ $w_3 \sum_k y_k$	w_1 : Pönalisierungsfaktor Einlagerungsreihenfolgenverletzung w_2 : Pönalisierung für Überschreitung des weichen Radonemittergrenzwerts w_3 : Containerkosten	Siehe Abschnitt 3.2.6.1

3.2.6 Optimierte Verpackungsplanung der Pellets

3.2.6.1 Quantifizierung der Randbedingungen und Optimierungsziele

Das Verpackungsproblem wurde mit den logistischen Optimierungszielen als Bedingungserfüllungsproblem modelliert und gelöst. Hierbei wurden als Randbedingungen gesetzt:

• Container-Maximalmasse	20 Mg
• Masse U-235-Äquivalente pro Container	45 g
• Sonstige spaltbare Stoffe	1/mg
• Radon-Emitter (Grenzwert mit Zusatzmaßnahmen)	50 MBq
• Säulenhöhe	1190 mm
• Störfallsummengrenzwert (SSW)	0,1
• A ₂ -Wert pro Container	1e4

Als Optimierungsziele werden folgende Vorgaben gemacht (s.u.). Hierbei gilt es nicht, die genannten Werte auf jeden Fall zu unterschreiten, sondern in Summe den niedrigsten Wert zu erreichen:

- | | |
|---|--|
| • Containerkosten ⁴ in B\$ pro verwendetem Container | • 5.000.000.000 |
| • Radonemitter (Grenzwert ohne Zusatzmaßnahmen) | Pönalisierung: 1 B\$ für jedes Bq oberhalb des Grenzwerts ohne Zusatzmaßnahmen |

⁴) Die Kosten sind in der arbiträren Kosteneinheit „B\$“ ausgedrückt. Alle Kosten sind jedoch in derselben Einheit angegeben und direkt gegeneinander verrechenbar.

- *Anmerkung: Dieses Optimierungsziel in Verbindung mit dem Grenzwert von 50 MBq pro Container führt dazu, dass eine möglichst geringe Anzahl Container den Grenzwert ohne Zusatzmaßnahmen überschreitet*
- Einlagerungsreihenfolgeverletzung, in 100.000.000 B\$ pro Pellet

Anmerkung: Die Beschränkungen der Einlagerungsreihenfolge (Handhabungsbeschränkungen) sind in Kapitel 3.2.3.7 und Abbildung 3-7 beschrieben.

Um eine gute Konvergenz des Lösungsalgorithmus zu erreichen, wurden Verletzungen der Handhabungsbeschränkungen zweier Pellets, die – nicht notwendigerweise unmittelbar – nacheinander verpackt werden und bei dem der zweite Pellet eine niedrigere Sektionszahl aufwies als der erste, mit einer Konstanten pönalisiert.

Gegeben seien 4 Pellets (P_1 bis P_4) aus Fässern einer Reihe gem. Abbildung 3-7, wobei jedes der Fässer aus der fortlaufenden Sektion stammt.

P_1 : grün

P_2 : gelb

P_3 : orange

P_4 : rot

Die Verpackungsreihenfolge [P_3, P_2, P_4, P_1] weist drei Verletzungen auf: (P_3, P_2), (P_3, P_1) und (P_4, P_1). Die Pönalisierung $(1 + 1 + 1) \times 100.000.000 \text{ B\$} = 300.000.000 \text{ B\$}$.

Diese Rechenvorschrift ist als obere Aufwandsabschätzung des Handhabungsaufwands zu verstehen: Zum einen berücksichtigt sie nicht, dass bereits „aus der Reihe“ entnommene Pellets (hier: P_3) dazu führen, dass Pellets einer niedrigeren Sektion ebenfalls gehandhabt werden müssen; für diese entfällt der Handhabungsaufwand (für P_1). Zum anderen wird kein Kredit von der Tatsache genommen, dass mehrere nebeneinander stehende Säulen in einem Container gleichzeitig zugänglich sind.

3.2.6.2 Darstellung der Verpackungsplanungen

Es wurden mehrere Durchläufe mit geringfügig geänderten Verhältnissen der Containerkosten zu den Kosten für die Verletzung der Einlagerungsreihenfolge gerechnet. In Tabelle 3-7 wird beispielhaft die aggregierten Ergebnisse für eine Verpackungsplanung mit 20 Containern gezeigt.

Tabelle 3-7: Ausnutzung der Optimierungsziele für eine Pellet Verpackungsplanung

Randbedingung	Anzahl der Verletzungen	Wichtung einer Verletzung in B\$ (s.o.)	Anteil an der Gesamtwertung
Bq Radon-Emitteraktivität oberhalb des Grenzwerts ohne Zusatzmaßnahmen	189.628.568	1	0,00
Anzahl benötigter Container	21	5.000.000.000	0,87
Einlagerungsreihenfolgeverletzung	156	100.000.000	0,13

Diese Tabelle zeigt, dass für das identifizierte Kostenminimum eine endliche Anzahl Container Radon Zusatzmaßnahmen benötigen.

Für den Fall, dass Einlagerungsreihenfolgenverletzungen nicht pönalisiert würden (d.h., Wichtungsfaktor 0), würde eine geringere Anzahl von Containern gebraucht. Die tatsächliche Reihenfolge von Pellets wäre in dem Fall realistisch jedoch nicht handhabbar, denn hintereinander eingelagerte Pellets würden scheinbar willkürlich aus Fässern völlig unterschiedlicher Sektionen entnommen. Im Falle eines deutlich höheren Wichtungsfaktors für die Reihenfolge (oder bei Containerkosten von 0 B\$, d.h. Wichtungsfaktor von 0 für Container) würden mehr Container verwendet werden – das Kosten – od. Verletzungsminimum würde dichter bei einer Realisierung sein, bei der die Pellets strikt aus unmittelbar angrenzenden Sektionen stammen würden; die Anzahl der benötigter Container wäre dann höher, da gelegentlich bei geometrisch noch nicht vollständig gefüllten Containern die radiologischen Eigenschaften schon ausgeschöpft wären, und weitere Container für die Verpackung herangezogen werden müssten. Das Mischungspotential wäre nicht ganz ausgeschöpft.

Die hier identifizierten Wichtungsfaktoren führen zu augenscheinlich ausgeglichenen Lösungen: Noch gerade tragbare Reihenfolgenverletzungen bei hoch ausgeschöpften Containern.

Zur Quantifizierung der benötigten Ersatzmaßnahmen für Container mit ein Radoninventar oberhalb von 1 MBq wird in Tabelle 3-8 die Ausschöpfung aller Grenzwerte gezeigt. Hier wird deutlich, dass für diese Kostenrealisierung das identifizierte Kostenminimum *alle* KC mit Zusatzmaßnahmen ausgerüstet werden müssen.

Tabelle 3-8: Ausschöpfung einiger ausgewählter Grenzwerte für eine Pellet Verpackungsplanung

KC-Nr.	#Pellets (max. 42)	Masse [kg] (max. 20 Mg)	U235 [g] (max. 45 g)	Spaltbare Stoffe [g]	A ₂ / g (max. 1E-4)	SSW	Radon- Emitter [Bq]
1	40	5.585	24	0,04	2,67E-08	0,03	1,16E+07
2	42	5.834	25	0,04	2,77E-08	0,03	1,25E+07
3	41	5.595	24	0,04	3,05E-08	0,03	1,16E+07
4	40	5.327	31	0,04	3,61E-08	0,03	1,69E+07
5	38	5.130	35	0,04	4,76E-08	0,03	1,44E+07
6	40	5.553	42	0,04	4,28E-08	0,03	9,35E+06
7	36	5.350	20	0,04	2,25E-08	0,01	3,69E+06
8	39	5.846	12	0,04	1,90E-08	0,02	2,63E+06
9	39	5.853	8	0,04	2,60E-08	0,01	1,71E+06
10	33	4.987	9	0,03	2,73E-08	0,02	4,60E+06
11	39	5.681	13	0,04	1,44E-07	0,03	1,17E+07
12	36	5.287	11	0,04	2,66E-07	0,05	2,30E+07
13	35	4.861	15	0,04	9,68E-08	0,06	8,91E+06
14	36	5.077	13	0,04	1,50E-08	0,04	5,47E+06
15	33	4.956	12	0,03	1,14E-08	0,03	3,83E+06
16	31	4.271	15	0,03	1,39E-08	0,03	4,78E+06
17	40	5.479	41	0,04	1,97E-08	0,02	1,94E+07
18	38	5.355	42	0,04	2,07E-08	0,03	2,01E+07
19	34	4.732	32	0,03	5,54E-08	0,02	1,26E+07
20	34	4.806	21	0,03	7,28E-08	0,02	4,51E+06
21	39	5.934	16	0,04	1,99E-08	0,03	7,25E+06

Durch Änderung der Kostenfunktion (vgl. voriger Abschnitt) kann es auch gelingen, einen weiteren Container einzusparen, wenn auch zulasten der Einlagerungsreihenfolgenverletzungen.

3.2.7 Fazit

Für eine mittlere Anzahl von Pellets (ca. 800) wurde unter Berücksichtigung von Transport-, Geometrie- und Endlagerungsrandbedingungen eine Verpackungsplanung identifiziert, die zudem sowohl eine geringe Anzahl Container benötigt als auch durch die Lagerung vorgegebene logistische Sequenzierungseinschränkungen berücksichtigt. Diese automatisiert erstellte Verpackungsplanung ergab ein Erfordernis von 21 Containern. Es wurde eine Verpackungsrealisierung identifiziert, die dazu noch die Anzahl der Sequenzierungsverletzungen möglichst gering hält. Durch Änderung von Wichtungsfaktoren vor dem Optimierungsläufen kann die Balance zwischen Containereinsparung und Sequenzierungsverletzungen vorgegeben werden; so kann z.B. zulasten von Reihenfolgenverletzungen noch ein Container eingespart werden, oder zulasten der Anzahl der Containeranzahl Reihenfolgenverletzungen verringert werden.

Eine im Vorfeld erfolgte manuellen Abschätzung für die obere und untere Anzahl der benötigten Container basierte ausschließlich überschlägig auf der Höhen der Pellets; Transportgrenzwerte und Endlagerungsbedingungen wurden bei der Abschätzung nicht berücksichtigt. Die Reihenfolge der einzustellenden Pellets wurde bei der Abschätzung ebenso außen vor gelassen. Daher stellen die so ermittelten Containeranzahlen (Unter- und Obergrenzen) jeweils optimistische Abschätzungen dar.

Werden dennoch die Anzahlen der manuell abgeschätzten Container (20 bis 30) mit denen verglichen, die aus der vollautomatisierten Verpackungsplanung hervorgehen (21), so sind die letzteren deutlich am unteren Ende der Bandbreite der manuellen Abschätzung.

3.3 Teilprojekt 3: Minimierung der Anzahl Container bei einer Fassverpackungskampagne eines stillgelegten Kernkraftwerks

3.3.1 Einleitung und Aufgabenstellung

Im Ringraum eines stillgelegten Kernkraftwerks befinden sich 521 Fässer, die endlagergerecht verpackt werden sollen. Die entstehenden Gebinde sollen in ein Zwischenlager eingelagert werden. Durch die Notwendigkeit, sowohl die Endlagerungsbedingungen Konrad [BRE 14] als auch die Annahmebedingungen des Zwischenlagers [GNS 11] einzuhalten, ergeben sich dabei eine Vielzahl an Randbedingungen.

Aufgabenstellung ist es, die vorhandenen Fässer so zu verpacken, dass die Behälterkosten unter Einhaltung der End- und Zwischenlagerungsbedingungen minimiert werden.

3.3.2 Datenlage

Bei der Referenzverpackung handelt es sich um 120 Fässer verschiedener Abfallproduktgruppen (APG). Einige relevante radiologische Daten sind in Tabelle 3-9 zusammengefasst.

Die größte Anzahl der Fässer ist der APG 01 zugeordnet. Die Störfallsummenwerte (ssw) auch der höheren APG sind angegeben, dürfen aber gemäß Endlagerungsbedingungen nicht verwendet werden. Die ssw der APG 01 sind so niedrig, dass erwartet werden kann, dass diese in nicht-störfallfeste (nsf) Container verpackt werden können.

Die ssw der Fässer der APG 02 sind ebenfalls niedrig. Die Kernbrennstoffmasse dieser Fässer ist deutlich höher als bei den APG 01 Fässern.

Abschließend sollen zwei APG 06 Fässer verpackt werden. Durch die niedrigen ssw, auch der niedrigeren APG 01 und 02, können diese wahrscheinlich gemischt verpackt werden.

Tabelle 3-9: Zusammenfassung der radiologischen Daten der Fässer der Referenzverpackung

APG	Anzahl Fässer	Co-60 + Cs-137+ [Bq]	Gesamt-alpha [Bq]	Kernbrennstoffmasse [g]	Störfallsummenwert APG 01	Störfallsummenwert APG 02	Störfallsummenwert APG 06
01	72	7,24E+08	1,93E+07	4,95E-01	2,15E-01	5,88E-03	3,00E-04
02	46	2,43E+10	1,19E+08	8,26E+00	5,69E+00	1,52E-01	6,80E-03
06	2	1,96E+05	1,43E+01	2,82E-08	5,52E-05	1,42E-05	1,30E-05
Summe	120	2,50E+10	1,38E+08	8,75E+00	5,91E+00	1,58E-01	7,11E-03

3.3.3 Randbedingungen

3.3.3.1 Beladevarianten

Zur Verpackung stehen 3 Beladevarianten zur Verfügung (vgl. Tabelle 3-10). Sie unterscheiden sich im Behältergrundtyp, der Störfallfestigkeit, der Anzahl der möglichen Fässer, die sie aufnehmen können, sowie in den Kosten (in virtuellen Kosteneinheiten B\$).

Tabelle 3-10: Zur Verfügung stehenden Beladevarianten für die Verpackung von den Referenzfässern

Beladevariante	Behältergrundtyp	Störfallfestigkeit	Anzahl Fässer	Kosten [B\$]
A	KC Typ III	sf	12	4600
B	KC Typ IV	nsf	14	1000
C	KC Typ V	nsf	24	1400

3.3.3.2 Zwischenlager

Die Annahmebedingungen des Zwischenlagers Ahaus [GNS 11] mit den neuen Aktivitätsgrenzwerten ab 2017 müssen für alle Container eingehalten werden. Diese unterscheiden sich für Container der APG 01 von denen für Container mit allen anderen APGs. Die APG des Containers wird von der kleinsten APG aller im Container eingestellten Fässer bestimmt. Alle Beladevarianten in Tabelle 3-11 beziehen sich auf die Behälterkategorie I gemäß Annahmebedingungen.

3.3.3.3 Endlagerungsbedingungen

Zusätzlich zu den Annahmebedingungen des Zwischenlagers Ahaus müssen die Endlagerungsbedingungen Konrad [BRE 14] eingehalten werden. Diese werden nicht hier nicht noch einmal aufgeführt.

Wie in Abschnitt 3.3.4 dargestellt, ist hier lediglich der Störfallsummenwert relevant. Für störfallfeste Container darf die Summe aller Störfallsummenwerte nicht größer sein als 1, bei nicht störfallfesten nicht oberhalb 0,1.

3.3.3.4 Kernbrennstoffmasse

Eine weitere Randbedingung betrifft ausschließlich Container mit Abfällen, die APG 01 zugeordnet sind: Hier darf die Kernbrennstoffmasse den Wert von 1 g nicht überschreiten. Diese Randbedingungen resultiert aus der Anforderung der sicheren Unterschreitung der Begrenzung der Aktivitätswerte für spaltbare Stoffe, die aus der Analyse zur Kritikalitätssicherheit resultieren, für das Endlager Konrad [BRE 14].

3.3.4 Vorarbeiten

Im Vorfeld wurde identifiziert, welche der o.g. Randbedingungen relevant sind. Hierzu wurden jeweils 24 Fässer einem Container zugeordnet (dies entspricht der maximalen Anzahl an Fässer in einem Container) und diese bzgl. der jeweiligen Größe in absteigender Reihenfolge sortiert und auf Einhaltung des Grenzwertes geprüft.

Folgende Grenzwerte erweisen sich als relevant:

- Störfallsummenwert (nsf: <0,1; sf: <1)

- Aktivitätsgrenzwert für Co-60 und Cs-137,
- Masse des Kernbrennstoffs.

Tabelle 3-11: Aktivitätsbeschränkungen und Störfallsummenwert Konrad-Container Behälterkategorie I

Index	Radionuklid/ Radionuklidgruppe	Aktivitätsbeschränkung Behälterkategorie I [Bq]			
		APG02 bis APG06		APG01	
		Maximum	Mittel	Maximum	Mittel
I.1	$\Sigma(\text{Co-60, Cs-137})$	$8,0 \cdot 10^{+10}$	$4,0 \cdot 10^{+10}$	$2,7 \cdot 10^{+10}$	$1,3 \cdot 10^{+10}$
I.2	H-3	$9,0 \cdot 10^{+9}$	$4,6 \cdot 10^{+8}$	$4,5 \cdot 10^{+9}$	$2,3 \cdot 10^{+8}$
I.3	C-14 (allgemein)	$4,0 \cdot 10^{+10}$	$2,0 \cdot 10^{+10}$	$2,3 \cdot 10^{+10}$	$1,1 \cdot 10^{+10}$
I.4	C-14 (bei Inoen austauscherharzen)	$1,0 \cdot 10^{+10}$	$7,2 \cdot 10^{+8}$	$5,0 \cdot 10^{+9}$	$3,6 \cdot 10^{+8}$
I.5	Sr-90	$2,0 \cdot 10^{+10}$	$1,0 \cdot 10^{+10}$	$5,0 \cdot 10^{+9}$	$3,0 \cdot 10^{+9}$
I.6	Ag-108m	$4,0 \cdot 10^{+8}$	$2,0 \cdot 10^{+8}$	$2,0 \cdot 10^{+8}$	$1,0 \cdot 10^{+8}$
I.7	$\Sigma(\text{Fe-55, Ni-63})$	$6,5 \cdot 10^{+11}$	$6,5 \cdot 10^{+11}$	$2,0 \cdot 10^{+11}$	$1,0 \cdot 10^{+11}$
I.8	$\Sigma(\text{I-129, Cl-36})$	$4,0 \cdot 10^{+7}$	$2,0 \cdot 10^{+7}$	$4,0 \cdot 10^{+6}$	$2,0 \cdot 10^{+6}$
I.9	$\Sigma(\beta/\gamma\text{-sonst})$	$1,4 \cdot 10^{+11}$	$4,6 \cdot 10^{+10}$	$5,0 \cdot 10^{+10}$	$1,7 \cdot 10^{+10}$
I.10	$\Sigma(\alpha)$	$2,6 \cdot 10^{+9}$	$2,6 \cdot 10^{+8}$	$1,3 \cdot 10^{+9}$	$1,3 \cdot 10^{+8}$
I.11	Gesamtaktivität	$9,8 \cdot 10^{+11}$	-	$3,2 \cdot 10^{+11}$	-
I.12	Störfallsummenwert (SSW)	0,1 (1 bei Störfallfest)		0,1	

3.3.5 Die Referenzbeladung

Die Referenzbeladung wird in Tabelle 3-12 gezeigt. Die Angaben in fester Schrift stellen die über alle APG aggregierten Werte pro Container dar. Der Containername wird aus der Beladevariante und einer laufenden Nummer zusammengesetzt. Es werden 5 Container der Beladevariante C gemäß Tabelle 3-10 verwendet. Drei Container werden ausschließlich mit Fässern der APG 01 beladen, Fässer der APG 02 und 06 werden in die anderen beiden Container eingestellt. Damit sind alle Container mit 24 Fässern voll beladen.

Wie der Vergleich mit den in Tabelle 3-11 gezeigten Grenzwerten sowie mit den Endlagerungsbedingungen zeigt, werden die Grenzwerte jeweils nicht hoch ausgeschöpft. Die Ausschöpfung wird in Tabelle 3-13 dargestellt. Während die Ausschöpfung der Störfallsummenwerte bei ca. 73% liegt, ist die Ausschöpfung der anderen Grenzwerte deutlich niedriger.

Tabelle 3-12: Zur Verfügung gestellte Referenzbeladung der 120 Fässer

Container / APG	Co-60 + Cs-137+ [Bq]	Gesamt-Al- pha [Bq]	Kernbrenn- stoffmasse [g]	Störfallsum- menwert APG 01	Störfallsum- menwert APG 02	Störfallsum- menwert APG 06
Variante C-0	1,23E+10	6,63E+07	4,78E+00	2,89E+00	7,71E-02	3,44E-03
02	1,23E+10	6,63E+07	4,78E+00	2,89E+00	7,71E-02	3,44E-03
Variante C-1	1,20E+10	5,25E+07	3,47E+00	2,80E+00	7,51E-02	3,37E-03
02	1,20E+10	5,25E+07	3,47E+00	2,80E+00	7,51E-02	3,36E-03
06	1,96E+05	1,43E+01	2,82E-08	5,52E-05	1,42E-05	1,30E-05
Variante C-2	2,21E+08	5,57E+06	2,49E-02	6,95E-02	1,94E-03	1,17E-04
01	2,21E+08	5,57E+06	2,49E-02	6,95E-02	1,94E-03	1,17E-04
Variante C-3	2,56E+08	4,49E+06	2,00E-02	6,87E-02	1,90E-03	9,16E-05
01	2,56E+08	4,49E+06	2,00E-02	6,87E-02	1,90E-03	9,16E-05
Variante C-4	2,47E+08	9,26E+06	4,50E-01	7,68E-02	2,04E-03	9,13E-05
01	2,47E+08	9,26E+06	4,50E-01	7,68E-02	2,04E-03	9,13E-05
Summe	2,50E+10	1,38E+08	8,75E+00	5,91E+00	1,58E-01	7,11E-03

Tabelle 3-13: Auslastung Grenzwerte der Referenzbeladung

Container Name	Auslastung [%]			
	Co60 + Cs137 (Mittel)	Gesamtalpha (Mittel)	Masse KB	Störfallsummenwert
Variante C-0	31	26	--	77
Variante C-1	30	20	--	75
Variante C-2	2	4	2	70
Variante C-3	2	3	2	69
Variante C-4	2	7	45	77

Da mit der Referenzbeladung 5 Container der Beladevariante C verwendet wurden, betragen die Behälterkosten gemäß Tabelle 3-10 insgesamt 5 x 1400 B\$ = 7000 B\$.

3.3.6 Mathematische Beschreibung

Term oder Gleichung	Wert oder Bedeutung	Kommentar
$x_{i,j} = \begin{cases} 1 \\ 0 \end{cases}$	1 wenn Fass j dem Container i zugeordnet ist 0 sonst	
$\sum_{j=1}^n x_{i,j} a_j \leq F_i$	F_i : Kapazität des Containers i;	
$y_i = \begin{cases} 1 \\ 0 \end{cases}$	1 wenn Container i nicht leer ist, 0 sonst	
$\sum_i x_{i,j} = 1 \quad \forall j$		Jedes Fass muss genau ei- nem Container zugeordnet werden
$G_i = \{g_j x_{i,j} = 1 \quad \forall j\} \quad \forall i$	G_i : die Menge aller jeweiligen maximalen Abfallproduktgrup- pen der Fässer in dem Contai- ner i g_j : die maximale Abfallprodukt- gruppe des Fasses j	
Randbedingungen für störfall- feste Container:		
$\sum_{j=1}^n x_{i,j} \text{ssw}_{j,06} \leq 1,0 \quad \forall i$	$\text{ssw}_{j,06}$: APG 06 Störfallsum- menwert des Fasses j	Summe der Störfallsum- menwerte Abfallbehälter- klasse II aller in störfall- feste Container i einge- stellte Fässer darf 1 nicht überschreiten
Randbedingungen für nicht störfallfeste Container		
$\sum_{j=1}^n x_{i,j} \text{ssw}_{j,k} \leq 0,1$		Summe der Störfallsum- menwerte aller dem Con- tainer i zugeordneten Fäs- ser darf 0,1 nicht über- schreiten
$k = \min(G_i) \quad \forall i$		
Optimierungsziele		
Minimiere $B = \sum_{i=1}^m a_i y_i$		

3.3.7 Minimierung der Behälterkosten

Das Verpackungsproblem wurde als CSP modelliert und nach Behälterkosten minimiert. Die Rechenläufe dauerten jeweils 30 min. Die Zusammenfassung der erreichten optimierten Lösung ist in Tabelle 3-14 dargestellt.

Es ergeben sich sieben Container, 4 der Variante B und 3 der Variante C. Die Auslastung der Grenzwerte ist mit Ausnahme des Störfallsummenwertes eher niedrig. Dieser weist zum Teil sehr hohe, aber auch sehr niedrige Auslastungen aus. Zur Erzielung dieser Ergebnisse wurden Fässer verschiedener APG zum Teil gemischt (letzte Spalte der Tabelle). Die Summe aller Behälterkosten ergibt 8200 B\$.

Tabelle 3-14: Zusammenfassung der optimierten Verpackungsplanung

Container Name	Auslastung [%]				Verteilung Anzahl Fässer nach APG
	Co60 + Cs137 (Mittel)	Gesamtal-pha (Mittel)	Masse KB	Störfall-summenwert	
Variante B-4	2	4	3	65	APG 01: 13 APG 06: 1
Variante B-5	2	5	44	65	APG 01: 14
Variante B-6	2	5	6	94	APG 01: 12 APG 02: 2
Variante B-7	0	1	1	14	APG 01: 14
Variante C-9 (Unterbeladung: 8 Fässer)	46	18	--	100	APG 02: 16
Variante C-10	15	24	--	50	APG 02: 24
Variante C-11	2	9	7	71	APG 01: 19 APG 02: 4 APG 06: 1

Mit dem vorgegebenen Kostenvektor im Zusammenhang mit der Optimierung hat die automatisierte Berechnung einen Verlust von 1200 BS mit Bezug auf die Referenzplanung erzielt.

Die Gründe, weshalb die Optimierung hinsichtlich der Behälterkosten ein schlechteres Ergebnis mit Bezug auf die Referenzplanung erzielt hat, liegt im Wesentlichen daran, dass die Möglichkeit, APG-gemischt zu verpacken, zu einer so viel höheren Anzahl von Verpackungsmöglichkeiten führt, dass der Solver die APG-reinen Verpackungsmöglichkeiten – von der die Referenzplanung eine war - in der erlaubten Rechenzeit nicht identifiziert.

Die hier dargestellten Fässer wurden aus einer Obermenge so ausgewählt, dass eine APG-reine Verpackung – mit Ausnahme der beiden APG 06 Fässer – möglich war. Für die Verpackungsplanungen anderer Untermengen gleicher Fassanzahl halten wir es für möglich, dass der entweder der manuelle Aufwand zur Erzielung einer ähnlich guten Lösung sehr hoch wird, oder aber dass die Behälterkosten steigen.

3.3.8 Fazit

Für eine geringe Anzahl Fässer (120 Stk.) wurde eine Verpackungsplanung erstellt, die Endlagerungs- und Zwischenlagerungsbedingungen einhalten muss. Die Verpackungsplanung wird mit dem Ziel erstellt, möglichst geringe Containerkosten zu verursachen.

Für die Referenzplanung wurden die 120 Fässer aus einer größeren Menge Fässer (521 Stk.) so gewählt, dass 5 Container hinsichtlich aller Grenzwerte möglichst hoch ausgelastet sind. Diese manuelle Verpackungsplanung ergab Kosten in einer gedachten Kosteneinheit B\$ von 7000.

Die Verpackungsplanung, die mit dem automatisierten Verfahren erzeugt wurde, ergab Containerkosten von 8200 B\$, 17% mehr als die Referenzplanung. Das automatisierte Verfahren konnte das mit der Referenzplanung ermittelte Minimum nicht finden.

Der Qualitätsunterschied der beiden Verfahren würde realitätsnäher ermittelt werden, wenn die Verpackungsplanung sämtlich zu verpackende Fässer berücksichtigt.

4 ARBEITSPAKET 2: ERZIELTE ZEIT-, KOSTEN- UND VOLUMENEINSPARUNGEN MIT BEZUG AUF DIE REFERENZPLANUNGEN

4.1 Übersicht

Im Arbeitspaket 2 steht die Ermittlung des Einsparpotentials im Vordergrund, welches durch die Anwendung des im Rahmen dieses FV entwickelten Optimierungsverfahrens erzielt werden kann. Verglichen werden hierbei die folgenden Kosten:

- Wesentliche Kosten, die *während des Prozesses* der Verpackungsplanung entstanden sind.
- Da es sich bei der ursprünglichen Planung (Referenzplanung) praktisch in allen hier dargestellten Fällen um eine manuell bzw. mit geringer Softwareunterstützung (z. B. Excel) erstellte Planung handelt, fallen für die Erstellung der Planung vorwiegend *Personalkosten* an. Für den Vergleich mit den automatisiert erstellten Lösungen werden hier die Datenaufbereitungs-, Modellierungs-, Rechen- und Auswertekosten (ebenfalls ausschließlich Personalkosten) gegengerechnet.
- Wesentliche Kosten, die *durch* die Verpackungsplanung entstanden sind.
- Als wichtigste Kostenposition sind hier die *Behälterkosten* zu nennen. Bei der Durchführung der Verpackung anfallende *Handhabungskosten* (etwa die Präzedenzoptimierung in Teilprojekt 2) fließen ebenfalls mit ein. Als letzte relevante Kostenart sind die *Endlagerkosten* zu nennen, die nach Volumen abgerechnet werden.

Sonstige Kosten, zum Beispiel Kosten für die für die notwendigen behördlichen Zustimmungen und dergleichen werden hier nicht betrachtet, da sie in beiden Varianten grundsätzlich anfallen würden, sich etwaige Unterschiede aber im Rahmen des FV nicht quantifizieren lassen.

Hinsichtlich der Endlagerkosten könnte man sich auf den Standpunkt stellen, dass diese zumindest für Energieversorgungsunternehmen durch das Entsorgungsübergangsgesetz in Verbindung mit dem Entsorgungsfondsgesetz bereits abgegolten sind. Dennoch ist ein insgesamt geringeres Endlagervolumen für das Endlager Konrad gegebenenfalls nicht als betriebswirtschaftlicher, aber als volkswirtschaftlicher

Kostenvorteil anzusehen. Geringere Behältervolumina schonen jedoch auch die zur Verfügung stehenden Zwischenlagerkapazitäten.

4.2 Vorgehensweise zur Identifizierung der Bearbeitungskosten

Bei der Ermittlung der Bearbeitungskosten wurden die teilnehmenden Unternehmen und Einrichtungen nach den Zeiten oder Kosten befragt, die zur Erstellung der Verpackungsplanungen aufgewendet wurden. Die Angaben zu den Zeitaufwänden basieren daher ausschließlich auf freiwilligen Angaben.

Teilweise konnten die genauen Zeitaufwände durch die teilnehmenden Unternehmen und Einrichtungen nicht übermittelt werden, weil diese dort nicht explizit bzw. separat verbucht worden waren. In diesen Fällen wird die Kostenangabe qualifiziert.

Beim Forschungsnehmer beschränken sich die dargestellten Zeitaufwände auf die reine Modellierung und Optimierung des konkreten Teilprojektes.

4.3 Kostenbilanz Teilprojekt 1

4.3.1 Gesamtkosten Projektteilnehmer

Auf Nachfrage teilte der Projektteilnehmer die Bearbeitungskosten für die Erstellung des Konzeptberichts mit, wobei sich zeigt, dass die Verpackungsplanung einen substantiellen, aber nicht weiter quantifizierbaren Teil ausmacht. Die Kosten für die Erstellung des Konzeptberichts wurde zwischen 20.000 € und 30.000 € abgeschätzt.

Für die Behälter wurden keine Kosten angegeben, sodass der Vergleich allein aufgrund der Anzahl der Behälter erfolgen kann. Die Referenzplanung sah für die Abfälle 77 Behälter vor.

Das benötigte Endlagervolumen beträgt 541 m³ (Gebindevolumen).

4.3.2 Gesamtkosten Forschungsnehmer

Seitens des Forschungsnehmers wurden (exklusive der Dokumentation und der Parameteroptimierung) ca. 4 Personen-Wochen Arbeit aufgewendet. Diese Arbeiten beinhalteten:

- Studium der übergebenen Unterlagen, insbesondere des Konzeptberichts zur Verpackungsplanung
- Rücksprache mit Projektteilnehmer
- Einlesen der bereits digitalisierten Dateien
- Modellierung des unterliegenden Verpackungsproblems
- Anpassung der Randbedingungen
 - o Die Referenzplanung sah eine Mischung von Fässern verschiedener APG nicht vor; in der Modellierung wurde das jedoch berücksichtigt.
- Durchführung und Auswertung der Rechendurchläufe

Im Ergebnis der Optimierung der Verpackung konnten gegenüber der Referenzvariante 9 Behälter eingespart werden. Es konnte ebenfalls gezeigt werden, dass die automatisierte Verpackungsplanung nicht nur die Fässer in weniger, aber dafür größere Behälter, mit einem ähnlichen Gebindegesamtvolumen eingestellt verpackt hat, sondern dass das Gebindevolumen insgesamt mit 497 m³ deutlich geringer war.

4.3.3 Fazit

Die Kostenbilanz ist deutlich positiv zu Gunsten des im vorliegenden FV entwickelten Optimierungsalgorithmus. Zwar war die Bearbeitungszeit in etwa vergleichbar, die Behälterbilanz liegt mit 9 Behältern zugunsten des Forschungsnehmers. Es wird darauf hingewiesen, dass hier nicht nur eine hohe Anzahl der Behälter eingespart wurde, sondern ebenfalls ca. 50 m³ Endlagervolumen (vgl. Tabelle 3-5). Durch die geringere Zahl der Behälter (Konrad-Container) gegenüber der Referenzplanung kann ein mittlerer sechsstelliger Betrag eingespart werden, durch das eingesparte Endlagervolumen zusätzlich ein Betrag in Millionenhöhe.

4.4 Kostenbilanz Teilprojekt 2

4.4.1 Gesamtkosten Projektteilnehmer

Die Aufwände für die Erstellung der Verpackungsplanung wurden etwa einer Personen-Woche abgeschätzt. Der Projektteilnehmer wies darauf hin, der Aufwand auch doppelt so hoch hätte sein können.

Für die Referenzverpackungsplanung wurden zwischen 20 und 30 Behälter abgeschätzt (jeweils Unter- und Obergrenze).

Hinsichtlich der Anzahl derjenigen Behälter, die wegen der Radonemitteraktivität eine Ersatzmaßnahme benötigen, existierte keine Abschätzung. Für die Anzahl der Reihenfolgenverletzungen wurde ebenso keine Abschätzung abgegeben.

4.4.2 Gesamtkosten Forschungsnehmer

Für die Bearbeitung wurden ca. 3 Personen-Monate aufgewendet.

Ein Großteil dieser Arbeit bestand im Anlegen einer Nukliddatenbank, welche umfangreiche physikalische Eigenschaften (insbesondere A₂-Werte gemäß ADR) beinhaltete und welches die A₂-Berechnung zum Zeitpunkt des Einlesens der Pelletdatei deutlich vereinfachte. Der Aufbau einer solchen Nukliddatei ist ein typisches Beispiel für vorbereitende Arbeiten, die abhängig von der konkreten Optimierungsaufgabe unterschiedlich umfangreich sein können.

Der zweitgrößte Beitrag zur Bearbeitungszeit entstand durch die 2-malige Korrektur der Pellet-Datenbestände, wodurch jedes Mal die Einleseroutine, die für die Übernahme der Datensätze in die Applikation benötigt wird und projektspezifisch ist, sowie die Modellierung angepasst werden musste.

Obwohl der Projektteilnehmer im Vorfeld alle Randbedingungen schriftlich fixiert hatte, ergaben sich hierzu im Rahmen der Projektdurchführung erheblicher Rück- und Nachfragebedarf.

Abschließend traten durch die Modellierungskomplexität mit der Optimierungsbibliothek mehrere Implementierungsschwierigkeiten auf, für die Workarounds gefunden werden mussten.

Die mithilfe des Bedingungserfüllungslösers ermittelte Behälteranzahl variiert – je nach Wichtung der einzelnen Optimierungsziele - zwischen 20 und 21 Behältern. Die erzielten Verpackungsplanungen zeigen, dass alle Behälter eine Ersatzmaßnahme zur Einhaltung des Radon-Emissionsgrenzwerts (vgl. Abschnitt 3.2.3.5) benötigen.

Die Anzahl der ungewichteten Reihenfolgenverletzung beträgt 156, d.h., höchstens 156-mal musste ein nachgelagertes Pellet vorgezogen werden. Dieser Handhabungsmehraufwand hält sich in Bezug auf die Anzahl der Pellets (ca. 800) noch in Grenzen. Die Anzahl der Reihenfolgenverletzungen können bei Verwendung anderer Wichtungsfaktoren reduziert werden.

4.4.3 Fazit

Durch das Nichtvorliegen einer vollständigen Verpackungsplanung (d. h. einer Verpackungsplanung, in welcher der Nachweis der Einhaltung aller Grenzwerte korrekt geführt ist) seitens des Projektteilnehmers kann kein abschließendes Fazit gezogen werden, da der für eine solche vollständige Verpackungsplanung notwendige Aufwand erheblich größer gewesen wäre als die vom Projektteilnehmer angegebenen 30 Personen-Std.

Bei Entfall der Implementierung der Nukliddatenbank sowie der mehrmaligen Implementierung der Einlese- und Modellierungsroutine wäre die Zeitbilanz nach Einschätzung des Forschungsnehmers noch immer zu Ungunsten des Forschungsnehmers gegangen, jedoch mit einem Unterschied von höchstens ca. zwei Personen-Wochen. Einem fachkundigen Bearbeiter würde es also in diesem Fall gelingen, eine gültige Verpackungsplanung 2 Wochen schneller zu erstellen als die Implementierung und Auswertung einer automatisierten Lösung. Hierbei wird angenommen, dass die Anzahl der Container gleich bleibt bei 20.

Der Projektteilnehmer wies darauf hin, dass die finalen Daten noch gar nicht vorhanden seien und dass daher die Planung erneut durchgeführt werden müsse. In diesem Fall benötigt der Projektteilnehmer wiederum 30 Planungsstunden, die automatisierte Planung läuft dagegen innerhalb weniger Minuten.

Das Kostenfazit für dieses Teilvorhaben ist damit mit 2 Arbeitswochen zulasten des Forschungsnehmers. Festzuhalten bleibt jedoch die erheblich größere Flexibilität im Falle der Anwendung des Optimierungsalgorithmus, falls eine erneute Lösung unter geänderten Randbedingungen gefunden werden muss.

4.5 Kostenbilanz Teilprojekt 3

4.5.1 Gesamtkosten Projektteilnehmer

Für die Konzepterarbeitung und Beladeplanung der 120 Fässer wurden seitens des Projektteilnehmers ca. 2 Personen-Wochen aufgewendet. Dieser wies darauf hin, dass durch die begrenzte Fassauswahl, die strenge Partitionierung und den niedrigen Störfallsummenwerten die Planung relativ einfach war. Für weitere 401 Fässer, die nicht Gegenstand der Planung waren, wäre ein deutlich höherer Aufwand zusätzlicher Aufwand entstanden.

Die Behälterkosten für die Referenzplanung betrugen 7000 B\$.

4.5.2 Gesamtkosten Forschungsnehmer

Für die Bearbeitung wurden ca. 5 Personen-Wochen aufgewendet. Davon wurden 2 Personen-Wochen für die Datenvorverarbeitung und 1 Personen-Woche für Abstimmungen im Zusammenhang mit der Korrektur der übergebenen Datensätze verwendet.

Insgesamt wurden daher 2 – 3 Personen-Wochen für die Erstellung der optimierten Verpackungsplanung aufgewendet. Diese Zeit beinhaltet folgende Arbeitsschritte:

- Manuelle Vorverarbeitung der Daten
- Implementierung einer spezifischen Einleseroutine
- Modellierung des Verpackungsproblems
- Auswertung und Ausgabe der Daten

Die potentiellen Behälterkosten für die automatisiert erstellte Verpackungsplanung werden mit 8200 B\$ beziffert.

4.5.3 Fazit

Bei ungefähr gleicher Bearbeitungszeit betrug die Kostenbilanz der reinen Behälterkosten (8200 B\$ - 7000 B\$) = 1200 B\$ zulasten des Forschungsnehmers. Die Bilanz der Behälter beträgt 2 Container zulasten des Forschungsnehmers.

Der Projektteilnehmer wies jedoch darauf hin, dass der Aufwand für die Planung der noch verbleibenden Fässer deutlich höher sein kann. In diesem Fall wäre die Verwendung einer bestehenden automatisierten Verpackungsplanung vermutlich deutlich kostenpositiv zugunsten der Anwendung des Algorithmus zur Optimierung der Verpackung. Für diese liegt jedoch keine Referenzverpackung vor.

4.6 Gesamtfazit Arbeitspaket 2

4.6.1 Kostenbilanz: Kosten durch die und während der Verpackungsplanung

Betrachtet man alle 3 dargestellten Teilprojekte gemeinsam (Abschnitte 4.3 bis 4.5), so ist insgesamt die Bearbeitungszeitbilanz gerundet 1 Monat zulasten des Forschungsnehmers. Diese Bilanz ist bereits bereinigt um Mehrfacharbeiten, die aufgrund von Datenkorrekturen seitens der Projektteilnehmer notwendig waren, sowie um den Aufbau der Nukliddatenbank (vgl. Abschnitt 4.4 ff.) Diese Arbeiten könnten zwar auch in einem kommerziellen anfallen, würden aber gleichermaßen auch bei der manuellen Planung anfallen.

Die Behälterbilanz ist dagegen insgesamt um 7 Behälter positiv, d. h. bei Anwendung der Bedingungserfüllungsalgorithmen auf die Verpackungsplanungen aller drei Teilvorhaben hätten bis zu 7 Endlagerbehälter eingespart werden können. Es wird darauf hingewiesen, dass sich nicht nur die Anzahl der verwendeten Behälter reduziert hat, sondern hiermit einhergehend ebenfalls das verbrauchte Endlager-volumen.

Insgesamt fällt die Kostenbilanz deutlich positiv für die Anwendung des Algorithmus zur Optimierung der Verpackung aus.

Anmerkung: Zusätzlich zu den hier angegebenen Aufwänden würden bei kommerzieller Durchführung ggf. einige Kostenbeiträge für übergeordnete Aspekte hinzukommen, etwa Reisekosten, Dokumentationsaufwände und Parameteroptimierungen der eingesetzten Algorithmen. Für Bereitstellung einer Applikation würden Aufwände für Tests und Codemanagement anfallen.

4.6.2 Wissenschaftlich-technische Bilanz

Es wurde gezeigt, dass die Anwendung der Algorithmen zur Optimierung der Verpackung insbesondere dort erfolgreich ist, wo einerseits eine hohe Anzahl von Abfallgebinden (oder einzelnen Abfallstücken)

und andererseits komplexe Randbedingungen vorliegen (Teilprojekt 1). Bei ähnlich komplexen Randbedingungen, aber einer deutlich geringeren Anzahl von Abfallgebinden oder Abfallstücken (Teilprojekt 3) konnten die Vorteile des BedingungsLösungsalgorithmus nicht ausgespielt werden. Hier wurde in der manuellen Planung die Anzahl und APG der Fässer aus einer Gesamtfassmenge so gewählt, dass eine APG-reine Verpackung möglich war und somit die mathematisch geringste Anzahl der möglichen Container realisiert werden konnte.

Im Teilprojekt 2 - Verpackung von Granulatpellets in Container – lag die Anzahl der zu verpackenden Einheiten etwa beim Mittelwert der Anzahlen der beiden anderen Teilprojekte. Hier wurde eine Anzahl Container ermittelt, welche sich am unteren Ende einer optimistischen Abschätzung im Rahmen der Referenzbeladung befindet.

Abschließend kann vereinfachend zusammengefasst werden, dass je komplexer und größer das Verpackungsproblem ist, desto höher das mögliche Einsparpotential durch das automatisierte Verfahren ist.

5 ARBEITSPAKET 3: IDENTIFIZIERUNG EINER KOMPLEXEN DOSISMINIMIERENDEN UMLAGERUNGSSTRATEGIE IN EINEM ABFALLLAGER

5.1 Einleitung

In diesem Abschnitt wird dargestellt, dass sich der im Rahmen dieses FV entwickelte Optimierungsalgorithmus nicht nur für die Optimierung der Verpackung einer vorgegebenen Menge von Abfalleinheiten, sondern auch für die Optimierung der Umlagerung von Abfallgebinden in einem Abfalllager nutzen lässt. Auch dies ist eine im kerntechnischen Bereich relevante Aufgabe, da Abfalllager in vielen Fällen sequentiell während der Betriebszeit gefüllt wurden, später aber reorganisiert werden sollten, um durch günstigere Aufstellung der Behälter eine bessere Selbstabschirmung und somit geringere Dosisleistung an den Gebäudeaußenseiten zu erhalten oder um auf Behälter für die Endkonditionierung oder Abgabe ans Endlager besser selektiv zugreifen zu können. Diese Umorganisation der Aufstellung kann in der Regel unter Nutzung eher kleiner Rangierflächen erfolgen und muss dabei berücksichtigen, dass die Dosis für das Personal hierbei minimal bleibt.

Hierzu wird im Folgenden ein konkretes Abfalllager beschrieben, das aus verschiedenen Kammern und Zellen unterschiedlicher Größe besteht und dessen Abfälle dem mittelaktiven Bereich zuzuordnen sind. Sämtliche Daten wurden von dem Projektteilnehmer zusammengestellt und zur Nutzung im Rahmen des FV übergeben.

In diesem Abfalllager sind ca. 1500 Einheiten von radioaktiven Abfällen gelagert, die sich aus Fässern und anderen Einzelgegenständen (z. B. Proben) zusammensetzen.

Für das gesamte Lager, für jede Zelle sowie für alle Kammern ergeben sich aus der Genehmigung insgesamt 111 einzelne Auflagen und Nebenbestimmungen (im Folgenden als Genehmigungsregeln bezeichnet). Diese beschränken die Aktivität bestimmter Nuklidgruppen oder einzelner Nuklide, limitieren die Kernbrennstoffmasse oder schränken die Einlagerung von Abfällen bestimmter Abfallarten ein.

Durch die z. T. hohe Aktivität gammaemittierender Nuklide ist die Ortsdosisleistung auch an Aufpunkten oberhalb der die Kammern abdeckenden Abschirmriegel erheblich.

Im Rahmen dieses Arbeitspakets AP 3 sollen Planungen erstellt werden, die die Fässer und Abfallgebinde so zu den Positionen zuordnen, dass sowohl

- alle Genehmigungsregeln eingehalten werden,
- die Summe der Dosisleistungen an vorgegebenen Aufpunkten minimiert ist und
- die Anzahl der Umlagerungen mit Bezug auf die gegenwärtige Lagerbelegung minimiert wird.

Im vorliegenden Kapitel wird die Vorgehensweise dazu dokumentiert und die Ergebnisse dargestellt.

5.2 Problem- und Aufgabenbeschreibung

Außerhalb des Abfalllagers ist die Dosisleistung noch deutlich messbar, insbesondere in Richtung des Anlagenzauns, der sich in unmittelbarer Nähe des Lagers befindet. Die Dosis einer Einzelperson an dem Zaun kann für einige Lagerbelegungen einen substantiellen Teil des impliziten Grenzwertes von 0,4 mSv/a gemäß § 80 StrlSchG [STG 20] in Verbindung mit § 99 StrlSchV [STV 20] ausmachen.

Separate Messungen ergaben, dass die Dosisleistung nicht in erster Linie auf die durch die Wände penetrierende Direktstrahlung zurückzuführen ist: Messungen direkt an der Außenwand, in der Höhe der Fässer, ergaben Werte von unterhalb 1 $\mu\text{Sv/h}$, woraus am Anlagenzaun weit geringere Ortsdosisleistungen folgen. Messungen an der Außenwand, jedoch deutlich oberhalb der Abdeckungen, ergaben weit höhere Werte der Dosisleistung. Die relativ hohe Dosis am Zaun resultiert vielmehr vom Skyshine, worunter die Streustrahlung der oberhalb der durch die Abdeckplatten hindurch geschwächten, von den Fassabfällen entstehende Gamma-Strahlung zu verstehen ist. Hier soll untersucht werden, ob eine Neuordnung der gestapelten Fässer so erfolgen kann, dass zum einen die Dosisleistung im Lager selbst (und damit auch außerhalb) durch erhöhte Ausnutzung der Selbst- und Fremddabsorption unter Einhaltung aller Genehmigungsregeln reduziert werden kann

Die für so eine Neuordnung notwendige Fassumlagerungskampagne kann jedoch nicht willkürlich erfolgen; die zur Erzielung der neuen Fassanordnung benötigte Arbeitszeit und die hiermit verbundene Dosis für das Personal des Abfalllagers in Betracht gezogen werden. Der Fassbelegungsunterschied zwischen dem gegenwärtigen Zustand und einem dosisoptimierten Endzustand (unter Berücksichtigung der Genehmigungsregeln) darf daher nicht willkürlich hoch sein.

5.3 Datenlage

5.3.1 Auslegung des Lagers für radioaktive Abfälle

Das Lager ist baulich in verschiedene Zellen unterteilt, die wiederum Kammern beherbergen. In diesen Kammern sind Fassabfälle in 1 bis 3 Ebenen gestapelt; die maximale Stapelhöhe hängt von der Kammer ab.

Jede Kammer weist unterschiedliche Ausmaße, verschiedene Höhen bis zur Abdeckplatte und verschiedene Dicken der Abdeckplatte auf.

5.3.2 Stellplätze

Es stehen über 2000 Fasspositionen zur Verfügung, von denen ca. 1500 mit Fassabfällen besetzt sind. Dabei verfügt jede Kammer über eine unterschiedliche Anzahl von Stellplätzen.

5.3.3 Genehmigungsregeln für das Abfalllager

Bei der Einlagerung sind gemäß der Genehmigung eine hohe Anzahl verschiedener massen- oder aktivitätsspezifische Grenzwerte zu berücksichtigen. Sie richten sich nach dem Ort der Einlagerung, der Art der Abfälle (Abfallspezifikationsgruppe) und den relevanten Nuklidgruppen. Es gibt Regeln, welche auf dem Lager-, Zellen- und Kammerniveau gültig sind. Der Abfall wird nach Struktur (fest, flüssig, staub-/gasförmig oder Schwebstofffilter) und nach seiner Brandlast (brennbar, nicht brennbar) unterschieden, wobei manche Regeln mehrere oder alle Gruppen gemeinsam betreffen. Für die auf Zell- oder Kammerniveau gültigen Regeln werden nur drei Nuklidgruppen (Tritium, alle übrigen Nuklide außer Tritium und das U 235-Äquivalent) unterschieden, übergeordnet kommen auf dem Lagerniveau noch Regeln für natürliches Uran, U 235, U 233, Pu 239, Pu 241, abgereichertes Uran und Thorium hinzu.

5.3.4 Radiologische und physikalische Charakterisierung der Abfalleinheiten

5.3.4.1 Kategorien der Abfalleinheiten

Die Qualität und Vollständigkeit der radiologischen und physischen Daten der Abfalleinheiten ist sehr heterogen. Insbesondere die Angaben zu Altabfällen können unvollständig sein.

Um den Abgleich mit den Genehmigungsregeln vornehmen zu können, sind pro Abfalleinheit folgende Stammdaten hinterlegt:

- ID des Abfallfluss-, Verfolgungs- und Produktkontroll-Systema (AVK)
- Behälterkennzeichnung
- Lagerort (Zelle und Kammer)
- Messdatum der Dosisleistung
- Abfallmasse
- Abfallbindemasse
- Abfallart (gemäß Endlagerungsbedingungen [BRE 14])
- Abfalleigenschaft (fest, flüssig)
- Brennbar (ja, nein)
- Behältertyp gemäß AVK

Außerdem sind folgende radiologischen Eigenschaften vorhanden:

- Nuklid ID (mehrere pro Abfalleinheit)
- Aktivität pro Nuklid in Bq
- Typ
- Berechnungsdatum der Aktivität

Eine massenbezogene Aufschlüsselung der verschiedenen spaltbaren Nuklide pro Abfalleinheit ist vorhanden. Ebenso sind Ortsdosisleistungswerte in Kontakt und in 1 m Entfernung von der Behälteroberfläche verfügbar.

Zur Berechnung der Nuklidgruppenaktivität oder –masse müssen anhand der Nuklidgruppentabelle, einer *many-to-one*-Zuordnung von Nuklid-IDs zu einer Nuklidgruppe, die verfügbaren Aktivitäten oder Massen für jeweils eine Nuklidgruppe summiert werden.

5.3.4.2 Abfalleinheiten nach Abfallart

Die Fässer werden von der Abfallart „fest, nicht brennbar“ dominiert, vgl. Tabelle 5-1.

Tabelle 5-1: Anzahl Fässer nach Abfallart

Abfallart	Anzahl Fässer
fest, brennbar	80
fest, nicht brennbar	1332
flüssig, nicht brennbar	2
Staub und Gas	0
Schwebstofffilter	66

5.3.4.3 Radiologische Eigenschaften der Abfalleinheiten

In diesem Abschnitt werden beispielhaft die radiologischen Abfalleigenschaften der Abfalleinheiten als Histogramm dargestellt. Als Datenbasis dient eine vom Projektteilnehmer übergebene Tabelle.

Abbildung 5-1 zeigt beispielhaft die Verteilung der Nicht-Tritium-Aktivität der Abfalleinheiten, aufgeschlüsselt nach Abfallart. Die Aktivitäten werden – im Verhältnis zur Anzahl der Fässer mit dieser Abfallart – von festen, nicht brennbaren Abfällen dominiert, insbesondere bei höheren Aktivitäten.

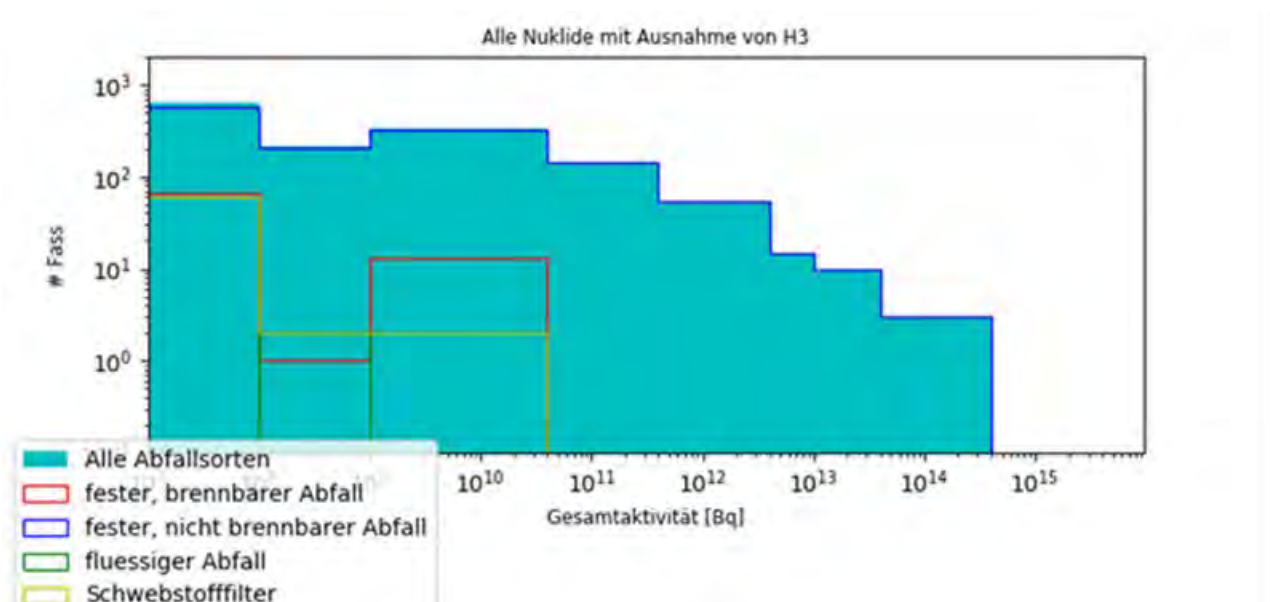


Abbildung 5-1: Darstellung der nicht Tritium Aktivität, aufgeschlüsselt nach Abfallart, bezogen auf einige Grenzwerte

5.3.4.4 Ausschöpfung der Grenzwerte der Genehmigungsregeln für eine konkrete Lagerbelegung

Im Zusammenhang mit den radiologischen und physikalischen Angaben der im Lager eingestellten Abfalleinheiten wurden zudem Ortsangaben der Abfalleinheiten übermittelt. Mit diesen Daten war es möglich, die Ausschöpfung der Grenzwerte in einzelnen Genehmigungsbereichen zu berechnen und sie mit den eigenen Rechnungen des Genehmigungsinhabers zu vergleichen.

Abbildung 5-2 zeigt beispielhaft die Ausschöpfung einer Nuklidgruppe in verschiedenen Genehmigungsbereichen, sortiert nach Abfallart. Während in einigen Genehmigungsbereichen und für einige Abfallarten dieser betrachteten Nuklidgruppe noch erhebliche Kapazitätsreserven vorhanden sind, ist für einige Abfallarten (insbesondere: „fest, nicht brennbar“) in anderen Genehmigungsbereichen kaum Reserve übrig.

Im Allgemeinen ist es daher nicht trivial, eine Umlagerung der Fässer unter Berücksichtigung aller Randbedingungen aus der Genehmigungslage vorzunehmen.

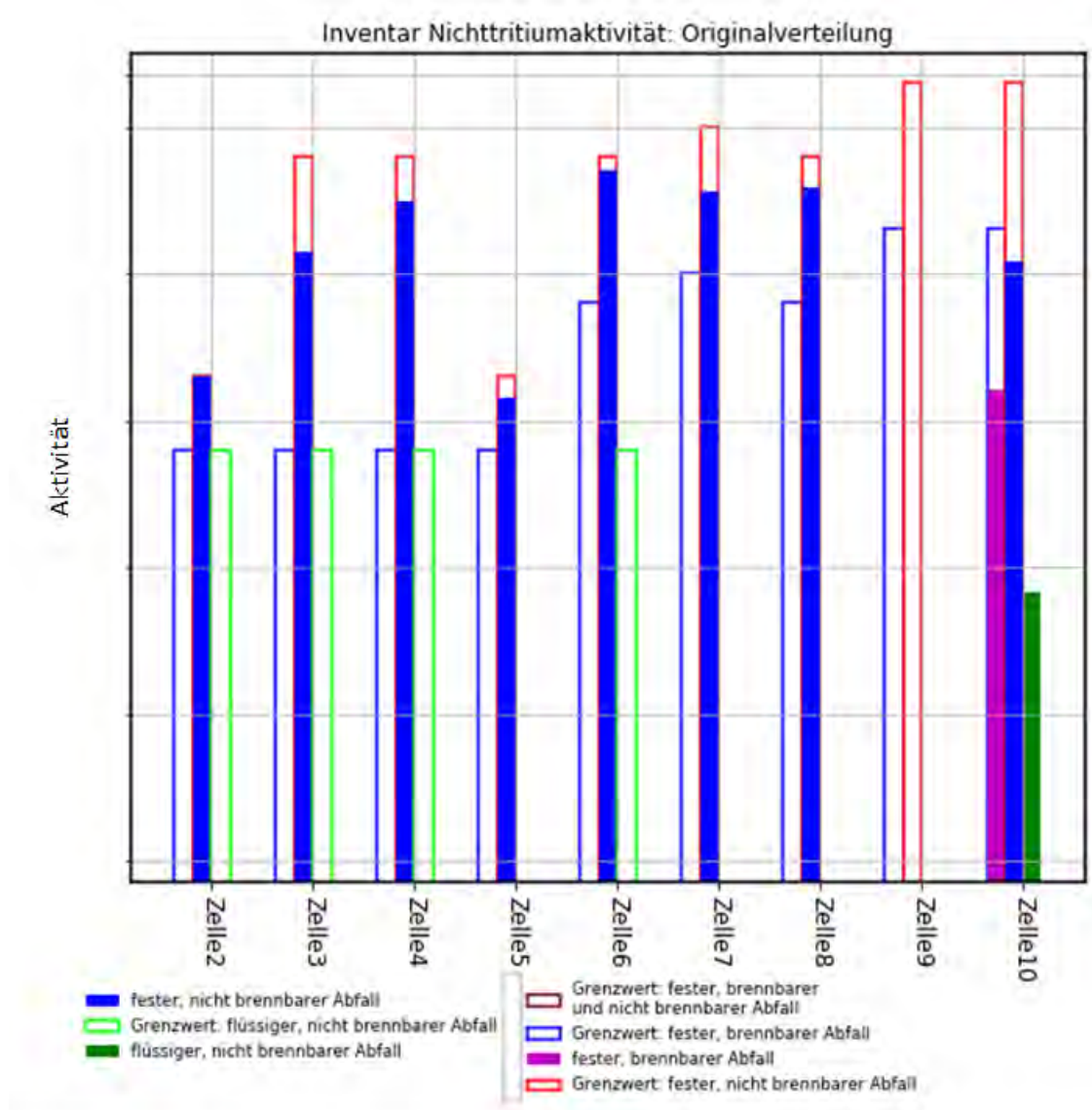


Abbildung 5-2: Ausschöpfung von Grenzwerten einer Radionuklidgruppe, in einzelnen Genehmigungsbereichen, nach Abfallart sortiert

5.4 Ortsdosisleistungsmessungen über 4 Kammern und Vergleich mit MicroShield® Rechnungen zur Validierung eines approximierten Dosisleistungsmodells

5.4.1 Messungen an ausgewählten Aufpunkten

Bevor die - potentiell aufwendige - Modellierung bzgl. der Fassumlagerung bei gleichzeitiger Minimierung der Ortsdosisleistungen über den Abdeckplatten mittels des Bedingungserfüllungslösers begonnen wurde, wurden zur Validierung eines Approximationsalgorithmus für die Berechnung der Ortsdosisleistung im Lager Ortsdosisleistungsmessungen an einigen Aufpunkten oberhalb der Abschirmriegeln

durchgeführt. Dieser Approximationsalgorithmus soll später in den Bedingungserfüllungslöser integriert werden.

Zunächst wurde zu diesem Zweck die Dosisleistung über einigen Abschirmriegeln untersucht. Wenn eine nur schlechte Korrelation zwischen den Messwerten und den aus der in der betreffenden Kammer eingelagerten Aktivität rechnerisch ermittelten Werten über den Approximationsalgorithmus der Dosisleistung besteht, kann auch die Optimierung keinen Mehrwert liefern.

Die Aufpunkte, an denen die Ortsdosisleistung gemessen wurden, wurden unter Berücksichtigung einer geringen Personendosis gewählt. An diesen so gewählten Aufpunkten P1 bis P4 über Abschirmriegeln im Abfalllager wurden in den Eckbereichen Ortsdosisleistungen genommen. Die Messwerte sind in Abbildung 5-3 dargestellt; auf die berechneten Werte wird später eingegangen. Der bei weitem höchste Messwert wurde auf P1 ermittelt; hier wurden Ortsdosisleistungen von bis zu 120 $\mu\text{Sv/h}$ ermittelt. Auf anderen Messpunkten betrugen die Messwerte zwischen ca. 20 und 40 $\mu\text{Sv/h}$.

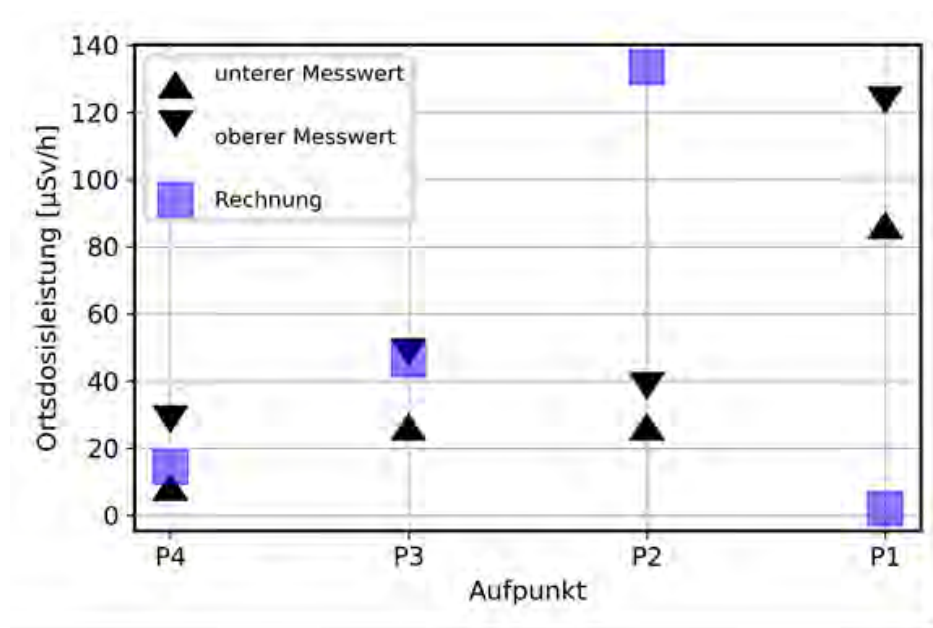


Abbildung 5-3: Ergebnisse der Ortsdosisleistungsmessungen an den Aufpunkten P1 bis P4 und Vergleich mit MicroShield®-Rechnungen

5.4.2 Das Knotenmodell als Approximation der aus einer Kammer resultierenden Ortsdosisleistung

Für die Modellierung wurden die Eigenschaften aller Abfalleinheiten in einer Stapelhöhe aggregiert; die Strahlenquellen (d.h., alle Fässer einer Höhenkote) besteht dann aus einem Quader, mit einer Länge und Breite der Kammer, und mit einer Höhe, die der eines Fasses (Annahme: 1 m) entspricht. Diese Approximation ist in Abbildung 5-4 dargestellt. Hier stellt x die Höhe dar, die Fässer einer Höhenkote spannen die y-z Ebene auf. Die Dosisleistung am Aufpunkt oberhalb des Abschirmriegels ergibt sich aus der Summe der Dosisleistung über alle drei einzelne Höhenkoten.

Des Weiteren wurde angenommen, dass sich zwischen der Oberkante der obersten Fasslage (Höhenkote) und der Unterkante der Abdeckplatte eine 1 m mächtige Luftschicht befindet. Die Dicke der Abdeckplatte wurde vom Projektteilnehmer zur Verfügung gestellt. Die Dichte der Abdeckplatte wird mit $2,6 \text{ g/cm}^3$ abgeschätzt.

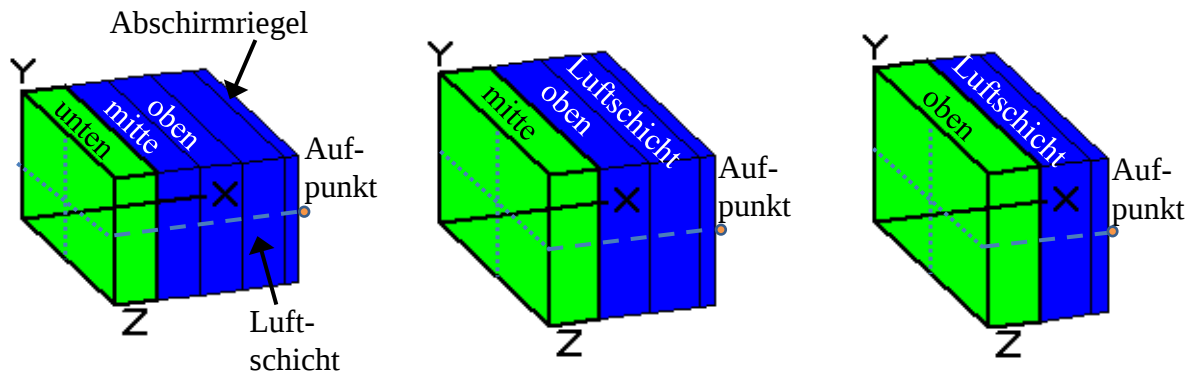


Abbildung 5-4: Approximation der Ortsdosisleistung über der Abdeckplatte, mittig auf y-z, durch Unterteilung der Kammern in verschiedene Höhenkoten (links: unterste Kote, rechts: oberste Kote)

5.4.3 Ergebnisse des Kotenmodells und Vergleich mit Messwerten

Durch eine nicht vollständige Datenlage bei den Altabfällen konnte nicht jedem Fass eine plausible Masse zugeordnet werden; bei fehlendem Wert oder bei unplausibel niedrigem Wert ($\leq 0,1 \text{ kg}$) wurde die Masse automatisch auf 200 kg korrigiert.

Der Aufpunkt der Modellierung wurde in Kontakt zur Abdeckplatte gewählt. Die Ergebnisse der berechneten Ortsdosisleistung variieren kaum mit Bezug auf eine Änderung der Positionierung des Aufpunktes.

Aus einer Technischen Notiz, die der Projektteilnehmer zur Verfügung gestellt hatte, wurde die Länge und Breite der unter dem Messpunkt liegenden Kammer entnommen. Hieraus wurde das Volumen einer Höhenkote in dieser Kammer mit ca. 9 m^3 abgeschätzt. Die pro Höhenkote aggregierten Eigenschaften, wie das Aktivitätsinventar von Co-60 und das Cs-137+, sowie die durch jede Höhenkote entstehende Dosisleistung sind in Tabelle 5-2 aufgeführt⁵. In dieser Kammer können die Fässer nur doppelt gestapelt werden, eine mittlere Höhenkote entfällt daher.

Der Stichtag der Aktivitätsermittlung sowie der Fasszuordnung ist der 31.01.2019.

⁵⁾ Die in diesen Tabellen angegebenen Dichten basierten auf ersten Abschätzungen der Kammergrößen; nachlaufende Dokumente bestätigten im Wesentlichen diese Werte, können aber geringfügig abweichen.

Tabelle 5-2: Messpunkt P1: Modellierungsannahmen für die Berechnung der Dosisleistungen (DL) und Ergebnisse der MicroShield®-Berechnung.

Höhenkote	Masse [kg]	Co-60 [Bq]	Cs-137+ [Bq]	Dichte [Mg/m³]	DL [mR/hr]	DL [µSv/h]
oben	3400,00	0,00E+00	3,20E+09	1,62E-01	3,50E-03	3,50E-02
unten	3533,37	2,12E+10	0,00E+00	1,68E-01	2,00E-01	2,00E+00
				Summe:	2,04E-01	2,04E+00

Die Geometrien für die Messpunkte P2 und P3 (Tabelle 5-3, Tabelle 5-4) sind identisch.

Tabelle 5-3: Messpunkt P2: Modellierungsannahmen für die Berechnung der Dosisleistungen (DL) und Ergebnisse der MicroShield®-Berechnung

	Masse [kg]	Co-60 [Bq]	Cs-134 [Bq]	Cs-137+ [Bq]	Eu-154 [Bq]	Dichte [Mg/m³]	DL [mR/hr]	DL [µSv/h]
oben	4720	2,37E+07	0,00E+00	0,00E+00	1,45E+06	2,62E-01	7,50E-04	7,50E-03
mitte	4109	2,89E+11	0,00E+00	5,58E+10	8,90E+05	2,28E-01	1,50E+00	1,50E+01
unten	3290	1,08E+13	2,14E+09	3,82E+11	1,24E+10	1,83E-01	1,19E+01	1,19E+02
						Summe:	13,35	1,34E+02

Tabelle 5-4: Messpunkt P3: Modellierungsannahmen für die Berechnung der Dosisleistungen (DL) und Ergebnisse der MicroShield® Berechnung

	Masse [kg]	Co-60 [Bq]	Cs-137+ [Bq]	Eu-154 [Bq]	Dichte [Mg/m³]	DL [mR/hr]	DL [µSv/h]
oben	4803	1,89E+10	3,83E+11	3,04E+10	2,67E-01	2,47E+00	2,47E+01
mitte	2439	1,02E+11	1,45E+11	1,11E+08	1,35E-01	8,90E-01	8,90E+00
unten	2702	8,80E+11	5,21E+11	4,29E+09	1,16E-01	1,28E+00	1,28E+01
					Summe:	4,64E+00	4,64E+01

Die Geometrie der Kammer des Messpunktes P4 weicht geringfügig von der in P2 und P3 ab. Die Annahmen und Ergebnisse sind in Tabelle 5-5 aufgeführt.

Tabelle 5-5: Messpunkt P4: Modellierungsannahmen für die Berechnung der Dosisleistungen (DL) und Ergebnisse der MicroShield® Berechnung

	Masse [kg]	Co-60 [Bq]	Cs-137+ [Bq]	Dichte [Mg/m³]	DL [mR/hr]	DL [µSv/h]
oben	7345	4,36E+09	0,00E+00	3,06E-01	2,30E-01	2,30E+00
mitte	3500	6,89E+11	2,29E+11	1,46E-01	1,19E+00	1,19E+01
unten	3431	1,63E+10	1,42E+11	1,43E-01	1,57E-02	1,57E-01
					1,44E+00	1,44E+01

Die Ergebnisse der Vergleichsrechnungen sind ebenfalls in Abbildung 5-3 dargestellt. Der Vergleich der Messpunkte P4 und P3 ist zufriedenstellend. Das Messergebnis für P2 wird deutlich überschätzt; die Höhe des Rechenergebnisses wird maßgeblich von der hohen Co-60-Aktivität bestimmt. Das Messergebnis von P1 wird deutlich unterschätzt; die Messung ist erstaunlich hoch in Anbetracht der sehr niedrigen Aktivitäten der gamma-emittierenden Nuklide in der zugehörigen Kammer.

Nach Durchsicht der Datenlage der Kammer bei P1 wurde festgestellt, dass – neben der fast durchweg fehlenden Massenangabe – die Abfälle fast ausnahmslos über 40 Jahre alt sind und damals eine eher hohe Dosisleistung aufwiesen. Zur berechneten Dosisleistung tragen nur zwei Fässer bei; eines mit Co-60-Aktivität, das andere mit Cs-137+-Aktivität; beides sind Fässer eher jüngeren Datums. Die Vermutung ist, dass die Aktivitätsbestimmung bei Fässern in dieser Kammer von eher geringer Qualität ist.

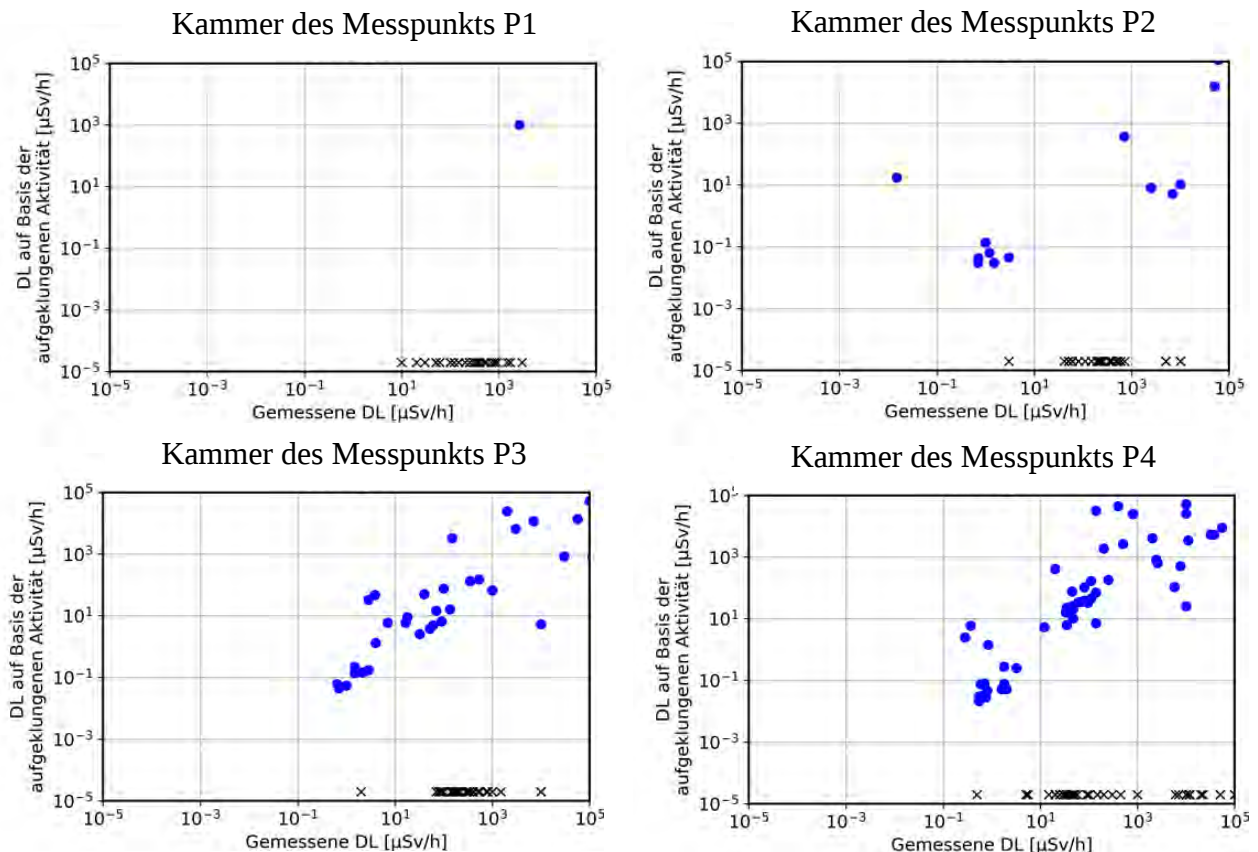


Abbildung 5-5: Vergleich der zum Zeitpunkt der Aufnahme der Fässer in das Lager gemessenen Dosisleistung mit der der Dosisleistung, die auf Basis der auf dieses Datum zurückgerechneten Aktivität ermittelt wurde (blaue Punkte). Die schwarzen „x“ korrespondieren mit Fässern die eine endliche Dosisleistung aufweisen (Abzissenwert), denen jedoch keine entsprechenden Aktivitäten zugewiesen wurden.

Um diesem Sachverhalt nachzugehen, wurden die gamma-relevanten Aktivitäten aller Fässer im Lager (Stichtag Aktivitätsermittlung und Fasszuordnung: 31.07.2019)⁶ auf den Zeitpunkt zurückgerechnet, an dem die Dosisleistungsmessungen vorgenommen worden waren. Mit diesen Aktivitäten wurden dann mit Punkt-Kern-Integrationen (mit dem Programm MicroShield®) unter Berücksichtigung der Fassgeometrie die Ortsdosisleistung im Kontakt ermittelt. Die berechneten Werte werden dann gegen die Messwerte aufgetragen. Für die Kammern der Messpunkte sind diese Plots in Abbildung 5-5 gezeigt. Die schwarzen „x“ stellen Fässer dar, die zwar über DL-Messwerte verfügen, aber für die keine entsprechenden Aktivitätswerte hinterlegt sind.

Die hohe Korrelation der Dosisleistungsmesswerte zu den berechneten Dosisleistungswerte der Fässer der Kammern der Messpunkte P3 und P4 ist eindeutig. Von den ca. 40 Fässern der Kammer P1 weist dagegen nur eines einen berechneten Wert auf (d.h., von allen Fässern der Kammer P1 hatte nur eines eine gamma-relevante Aktivität). Für den Fall P2 ist der Punkt bei der berechneten Dosisleistung von ca. 10 $\mu\text{Sv/h}$ deutlich höher als der korrespondierende Messwert. Dies kann dazu führen, dass die berechnete Kammer Dosisleistung bei P2 eher höher ist als der Wert der Ortsdosisleistungsmessung.

Die Übereinstimmung zwischen Messwerten und berechneten Werte in Abbildung 5-3 ist damit kongruent mit der Korrelation der Mess- und Rechenwerte für die Fass-Dosisleistung. Die Vermutung liegt daher nahe, dass die geringe Korrelation der in Abbildung 5-3 gezeigten Werte für P1 und P2 durch die Heterogenität der Datenqualität verursacht wird. Daher wird das Kottenmodell nicht grundsätzlich in Frage gestellt. Bei der Auswertung der optimierten Fasspositionen muss jedoch zwingend die Datenqualität der Fässer berücksichtigt werden.

5.5 Ergebnisse der Dosisleistungsminimierung für die betrachteten 4 Kammern

5.5.1 Modellierung des Problems und Durchführung der Optimierung

Das Optimierungsproblem wurde als Bedingungserfüllungsproblem modelliert, wobei sämtliche Genehmigungsregeln als Bedingungen aufgestellt wurden. Die Ortsdosisleistung an den 4 Aufpunkten konnte dabei für jede Realisierung der Positionen aller Fässer ermittelt werden. Die Berechnung der Ortsdosisleistung erfolgte mithilfe einer gemäß Abschnitt 5.4.2 parametrisierten Punkt-Kern-Integration, wobei im Vorfeld Dosisleistungskonversionskoeffizienten für jede Höhenkote und jedes Nuklid ermittelt wurden. Die Parametrisierung ist notwendig, um eine Rechenbeschleunigung um mehrere Größenordnungen zu erreichen.

Als Minimierungsziel wurde die Summe der Ortsdosisleistungen über alle 4 Aufpunkte gestellt. Für diese Rechnung wurden ausschließlich Fässer aus den Kammern der 4 Aufpunkte zugrunde gelegt.

Die erzielte Einsparung der Ortsdosisleistungssummen über die 4 Kammern sowie die Beträge dazu aus den einzelnen Höhenkoten wird in Abbildung 5-6 gezeigt. Hier stellen die blauen Balken die Werte aus den nicht optimierten Zuständen dar, entsprechen also der gegenwärtigen Fassbelegung in den Kam-

⁶ Die DL Messungen an den Kammern wurden im April 2019 durchgeführt, daher sind Abklingeffekte minimal. Es kann allerdings nicht ausgeschlossen werden, dass sich die Lagerbelegung zwischen 31.01.2019 und 31.07.2019 geringfügig geändert hat.

mern. Die ausgefüllten Balken sind die Ergebnisse aus dem Optimierungsalgorithmus, der zur Berechnung der Ortsdosisleistung die Punkt-Kern Integration mithilfe einer Parametrisierung approximiert. Die leeren Balken stellen die MicroShield® Rechnungen dar, die zum einen auf der Basis der Referenzbelegung, zum anderen nach dem Optimierungslauf durchgeführt wurden.

Als Ordinatenwerte werden mR/hr^7 , eine Ausgabeeinheit von MicroShield®, zugrunde gelegt. Die Einheit der Werte ist unerheblich, da die Konversionsfaktoren ebenfalls in mR/hr skalieren.

5.5.2 Korrelation des approximativen Multiplikationsalgorithmus mit vergleichenden MicroShield® Rechnungen

Im Allgemeinen korrelieren die mithilfe des parametrisierten Knotenmodells angenäherten Werte gut mit den entsprechenden MicroShield® Rechnungen (Abbildung 5-6). Eine mögliche Ausnahme bilden dabei die Ergebnisse des Messpunkts P3: Die absolut erzielten Werte stimmen nur mäßig mit den entsprechenden MicroShield®-Rechnungen überein. Da die Korrelation jedoch vorhanden ist, wird der approximative Parametrisierungsansatz des Optimierungsverfahrens nicht grundsätzlich in Frage gestellt.

5.5.3 Erzielte Einsparung der Ortsdosisleistungssummen

Für die Kammer des Messpunkts P3 hat keine Einsparung stattgefunden. Bei der Kammer des Messpunkts P1 ist die Dosisleistung nach der Optimierung sogar deutlich höher, sie verdoppelt sich ausgehend vom Referenzwert von $0,3 \text{ mR/h}$ auf zwischen $0,6 \text{ mR/h}$ und $0,8 \text{ mR/h}$.

⁷ mR/hr („milli Röntgen pro Stunde“) ist die standardmäßige Ausgabe von MicroShield® der Ionendosis. Das Röntgen ist eine veraltete Einheit. 1 R entspricht etwa 1 cGy. Die Einheit der Zeit „hr“ wird im Folgenden mit der üblicheren Bezeichnung „h“ abgekürzt.

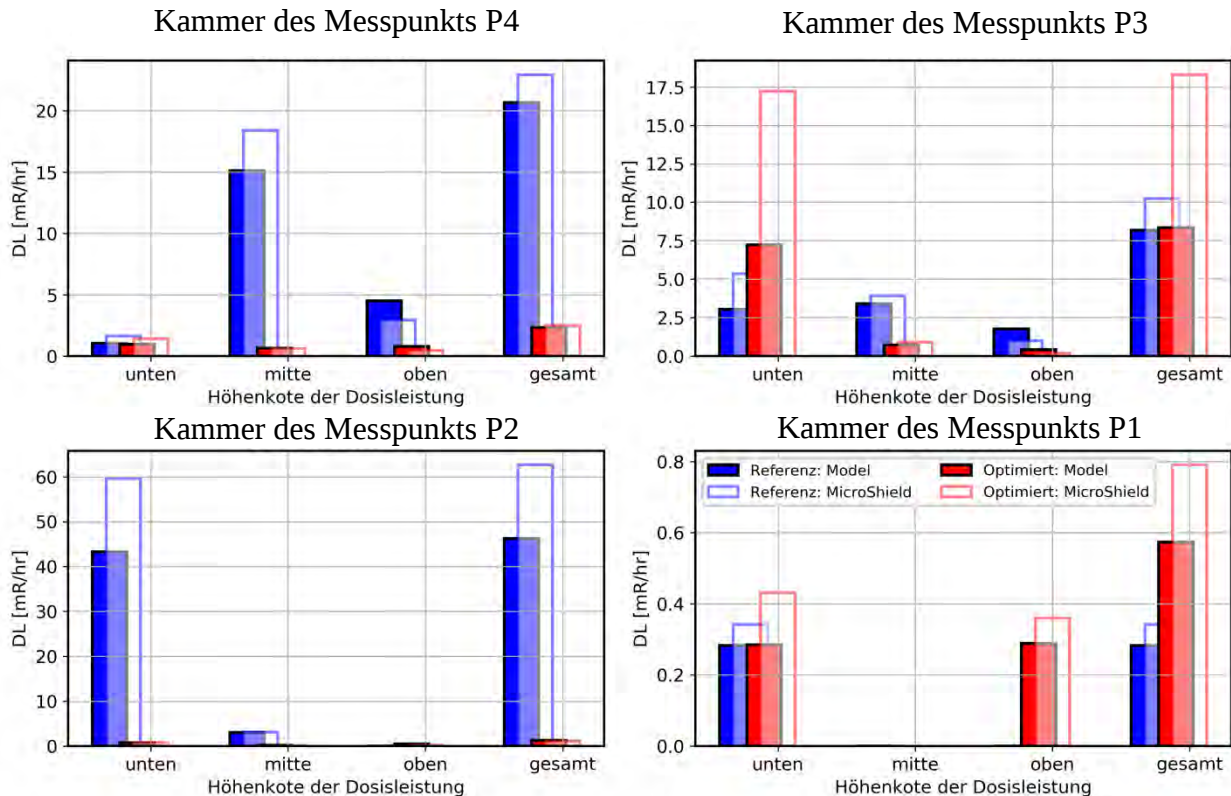


Abbildung 5-6: Dosisleistung vor der Optimierung (blau) und nach der Optimierung (rot) für die Kammern der einzelnen Messpunkte P1 bis P4. Die jeweils ausgefüllten Balken stellen direkte Dosisleistungswerte der Optimierungsroutine dar, die leeren Balken die mit MicroShield® ermittelten Vergleichswerte, auf der Basis der durch die Optimierung berechnete Fasszuordnung

Die hohe Reduktion der Ortsdosisleistungen ergeben sich bei den Kammern der Messpunkte P4 und P2: Hier sinkt die Ortsdosisleistung von Werten jeweils um die 20 mR/h und 50 mR/h auf 2 mR/h und ca. 1 mR/h. In Summe betrachtet hat die potentielle Umlagerung von Fässern zu einer Verringerung der Ortsdosisleistungssummen auf zwischen 16% (ausgehend von der DL Multiplikationsapproximation im Optimierungsalgorithmus) zu 24% (MicroShield® Werte) geführt.

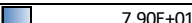
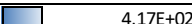
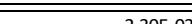
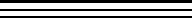
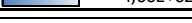
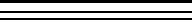
5.5.4 Analyse der vom Optimierungsalgorithmus gewählten Umlagerungsstrategie

Um eine möglicherweise triviale Ein- und Umlagerungsstrategie zu identifizieren, die einen Einsatz der hier gezeigten Optimierungsanwendung überflüssig macht, wird in diesem Abschnitt untersucht, wie sich die Massen und gamma-relevanten Aktivitäten der optimierten Belegung mit Bezug auf die Referenzbelegung (also die gegenwärtige Realisierung) geändert hat.

Tabelle 5-6 zeigt die Aktivitäten- und Massenverteilung, nach Höhenkoten untergliedert, für die Kammern der einzelnen Messpunkte sowohl vor als auch nach der Optimierung. In jeder Eigenschaftszeile (Masse, Co-60-Aktivität, Cs-137+-Aktivität) sind die Skalen gleich, um die Veränderungen leichter erfassen zu können. Es können hier zwei Effekte identifiziert werden:

- In die Kammer, die zum Messpunkt P3 gehört, wird sowohl Masse als auch Aktivität in erheblichem Umfang zugefügt.
- Aus den Kammern aller anderen Messpunkte fließt sowohl Masse und Aktivität ab (mit Ausnahme der Kammer des Messpunkts P1 – hier ist die Cs-137+-Aktivitätsbilanz geringfügig positiv).

Tabelle 5-6: Aufschlüsselung der Umverteilung der Massen und gamma-relevanten Aktivitäten mit Bezug auf die gegenwärtige Belegung, unterteilt nach Höhenknoten

Kammer der Messposition	Eigenschaft	Vor Optimierung (Referenz)	Nach Optimierung
P4	Masse [kg]	oben  9,99E+03 mitte  5,48E+03 unten  6,63E+03	oben  5,99E+03 mitte  6,02E+03 unten  6,58E+03
	Co-60 [GBq]	oben  4,52E+01 mitte  7,49E+02 unten  1,33E+02	oben  6,28E+00 mitte  1,02E+01 unten  8,10E+01
	Cs-137+ [GBq]	oben  7,90E+01 mitte  2,35E+02 unten  1,21E+02	oben  2,90E+01 mitte  8,52E+01 unten  4,04E+01
P3	Masse [kg]	oben  8,85E+03 mitte  6,41E+03 unten  5,70E+03	oben  1,21E+04 mitte  8,20E+03 unten  5,61E+03
	Co-60 [GBq]	oben  3,10E+01 mitte  7,26E+02 unten  1,90E+03	oben  1,31E+01 mitte  2,45E+02 unten  1,45E+04
	Cs-137+ [GBq]	oben  4,17E+02 mitte  1,82E+02 unten  9,86E+02	oben  1,03E+01 mitte  1,35E+02 unten  1,61E+03
P2	Masse [kg]	oben  4,72E+03 mitte  4,11E+03 unten  3,49E+03	oben  3,92E+03 mitte  3,80E+03 unten  3,46E+03
	Co-60 [GBq]	oben  2,30E-02 mitte  3,00E+02 unten  1,11E+04	oben  9,54E+00 mitte  8,41E+00 unten  1,11E+02
	Cs-137+ [GBq]	oben  0,00E+00 mitte  5,50E+01 unten  4,00E+02	oben  9,04E+01 mitte  3,00E+01 unten  3,14E+02
P1	Masse [kg]	oben  3,40E+03 unten  3,73E+03	oben  3,12E+03 unten  3,70E+03
	Co-60 [GBq]	oben  0,00E+00 unten  2,00E+01	oben  4,31E+00 unten  1,20E+01
	Cs-137+ [GBq]	oben  0,00E+00 unten  0,00E+00	oben  2,00E+01 unten  1,06E+02

Auffällig ist, dass es dem Algorithmus gelingt, die massenreichen und aktivitätsarmen Gebinde in die obere Höhenkote zu verschieben, die aktivitätsreichen, aber massenarmen in die niedrigeren Höhenkoten. Das gilt auch in etwas geringerem Maße für die Kammern der anderen Messpunkte.

5.5.5 Fazit der Optimierung über die Dosisminimierung der Kammern der Messpunkte P1 bis P4

Zur Handhabbarmachung der Dosisleistungsoptimierung wurde zunächst ein einfaches Knotenmodell entwickelt, bei dem Fässer einer Höhenkote in ihren Eigenschaften aggregiert wurden. Dieses Modell konnte im Vergleich zu Messwerten an 4 Aufpunkten validiert werden.

Das Höhenknotenmodell wurde – parametrisiert – in das Optimierungsmodul integriert. Nach Optimierung konnte gezeigt werden, dass die Ortsdosisleistungssummen an diesen vier Aufpunkten auf ca. 25 % bis 20 % des ursprünglichen Wertes reduziert wurden. Es wurde gezeigt, dass der Optimierungsalgorithmus diese Reduzierung dadurch erreicht, dass möglichst viel gamma-relevante Aktivität in die niedrigeren Höhenkoten platziert wird, bei gleichzeitiger Füllung der obersten Höhenkoten mit aktivitätsarmen und massenreichen Gebinden, um die Absorption zu maximieren.

5.6 Pareto Optimierung: Gleichzeitige Ortsdosisleistungs- und Arbeitszeitminimierung

Zu Herstellung der erheblichen Reduzierung in den vorigen Abschnitten müsste eine erhebliche Anzahl Fässer von ihrer ursprünglichen Position in eine andere Position verbracht werden. Im Realisierungsfall kostet diese Umlagerungsarbeit Dosis, da das Personal dafür in dem Abfalllager arbeiten muss. Der Aufwand für eine Umlagerung eines Fasses konnte mit dem Projektteilnehmer in zwei Teilschritte aufgeteilt werden:

- die Arbeitszeit der Ein- oder Auslagerungsvorgang *pro Fass*, wobei diese Arbeitszeit stark von der Höhenkote und der Position im Lager abhängt, von wo nach wo das Fass verbracht wird,
- eine *fassunabhängige* Arbeitszeit, die einmalig pro Umlagerungsvorgang anfällt – auch diese Arbeitszeit hängt stark von dem betroffenen Raumbereich ab.

Dem Forschungsnehmer wurde vom Projektteilnehmer eine Tabelle zur Verfügung gestellt, in der für alle ~2000 möglichen Fasspositionen diese beiden Angaben aufgeführt waren. Zur besseren Übersicht konnten die Fasspositionen in 14 Gruppen unterteilt werden, wobei eine Fasspositionsgruppe über die gleichen fassabhängigen und –unabhängigen Zeiten verfügt. Die erstgenannten variieren zwischen 15 Minuten und 3:15 Stunden, die fassunabhängigen betragen minimal 15 Minuten und maximal 3 Std.

Diese Tabelle wurde dem Optimierungsalgorithmus zur Verfügung gestellt und als Optimierungsvariable – zusammen mit der Ortsdosisleistungssumme – als Pareto⁸-Zielwert minimiert. Das Ergebnis einer solchen Optimierung ist in Abbildung 5-7 dargestellt. Die Ortsdosisleistungssumme der Referenzbelegung im Lager (d. h., die gegenwärtige Belegung), die durch das Ortsdosisleistungsmodul des Optimierungsalgorithmus berechnet wird, wird mit der gestrichelten Linie dargestellt.

Der zu Herstellung der Referenzbelegung erforderliche Arbeitsaufwand müsste bei genau 0 min. liegen, tatsächlich jedoch liegt er bei ca. 100 min. Das ist kein Artefakt, kann aber im Rahmen dieses Berichts nicht erläutert werden.

⁸ Bei der Pareto Minimierung werden mehrere Variablen unabhängig voneinander minimiert. Für Punkte auf der Pareto-Front gilt, dass der Wert in einer Dimension nicht verbessert werden kann ohne den Wert einer anderen Dimension zu verschlechtern.

Bei einer Reduzierung der Ortsdosisleistungssumme auf die Hälfte des jetzigen Werts wären ca. 700 min. Arbeitszeit notwendig. Die maximale Reduzierung auf ca. 20 mR/h ist mit ca. 7000 min. Arbeitszeit zu erreichen.

Der Grund für einen lokalen Peak bei der Ortsdosisleistungssumme von 250 mR/h liegt in der Natur des Optimierungsalgorithmus. Der wahre Wert muss unter ca. 800 min. liegen, denn die Ortsdosisleistungssumme von 200 mR/h kann mit nur ca. 700 min. erreicht werden. Die angegebenen Punkte stellen naturgemäß jeweils obere Abschätzungen dar.

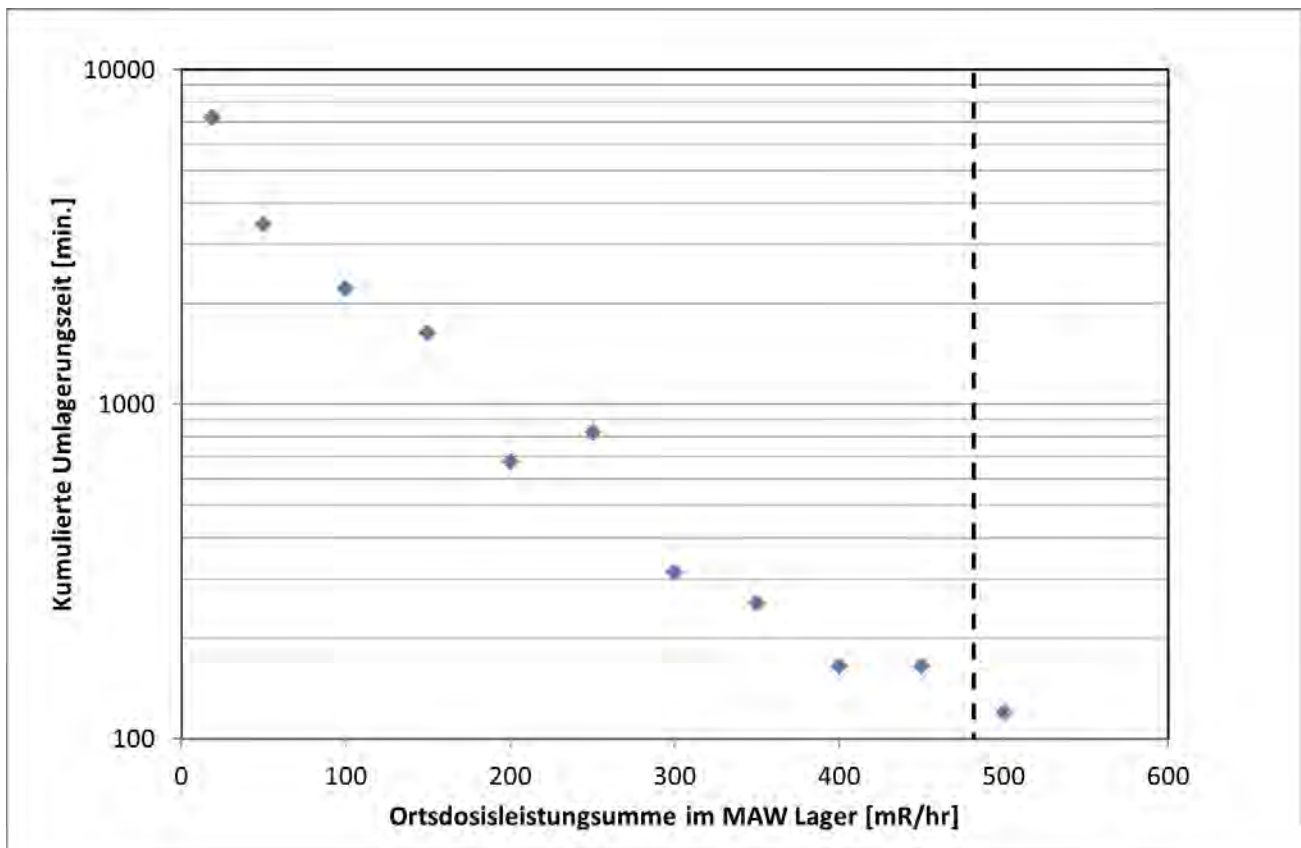


Abbildung 5-7: Pareto-Plot einer Optimierung zweier unabhängigen Variablen: Umlagerungszeit (Arbeitszeit) und Ortsdosisleistungssumme; gestrichelte Linie: Ortsdosisleistungssumme der Referenzbelegung

5.7 Zusammenfassung und Fazit

Im Rahmen des FV sollte ein komplexes Logistikproblem identifiziert und mithilfe eines Bedingungs-erfüllungslösers gelöst werden (vgl. Abschnitt 1.5). In Arbeitspaket 3 wurde hierzu analog ein mit der gleichen Methodik zu behandelndes Umlagerungsproblem bearbeitet.

Es wurde gezeigt, dass eine Umlagerung von Fässern dazu dienen kann, die Ortsdosisleistung innerhalb des Lagers – und damit aufgrund von Skyshine auch außerhalb des Lagers – zu reduzieren.

Eine hohe Anzahl Fassabfälle lagern in einem Abfalllager und unterliegen einer hohen Anzahl (111) von Randbedingungen, die sich direkt aus der Genehmigung herleiten lassen. Durch die z. T. hohe Ausschöpfung dieser Randbedingungen können die Fässer nicht ohne sorgfältige vorherige Planung umgelagert werden.

Nach der Validierung eines Modells zur Berechnung der Ortsdosisleistung auf der Basis der Fassdaten sowie der parametrisierten Geometrien der Kammern konnte an Referenzkammern von vier Messpunkten gezeigt werden, dass die Dosisleistung auf ca. 20 % bis 25 % des jetzigen Referenzwertes durch Umlagerungen abgesenkt werden kann.

In einem zweiten Schritt wurden zusätzlich die Arbeitszeiten zur Durchführung der Fassumlagerungen modelliert, die proportional zur Dosis des Personals sind, welche zu minimieren ist. Hier kamen sowohl fassabhängige als auch fassunabhängige Arbeitszeitanteile zum Tragen. Alle Arbeitszeiten hängen von Ursprungs- und Zielpositionen der Fässer ab.

Es wurde mithilfe des Optimierungstools eine Paretografik entwickelt, die zwei Variablen – Ortsdosisleistungssumme über ca. 50 Aufpunkte des Lagers und kumulative Arbeitszeit für die Umlagerung der Fassabfälle – jeweils unabhängig voneinander minimiert.

Die Mächtigkeit eines automatisierten Umlagerungstools konnte in diesem Vorhaben vollständig zum Ansatz werden. Durch die schnelle Berechnung der Ortsdosisleistungssumme im Zusammenhang mit dem Bedingungserfüllungslöser können in sehr kurzer Zeit (wenige Minuten) viele verschiedene Umlagerungsvarianten betrachtet werden. Der Berechnungsalgorithmus kann daher dazu dienen, die Ortsdosisleistungssumme bei einer vorgegebenen, zur Verfügung stehenden Arbeitszeit zu minimieren.

6 GESAMTFAZIT

In diesem Forschungsvorhaben (FV) wurden manuell ermittelte Lösungen von im Abfallmanagement von radioaktiven Abfällen vorkommenden Zuordnungsproblemen (z.B. Verpackungsplanungen) mit solchen verglichen, die mithilfe eines automatisierten Algorithmus berechnet wurden. Verglichen werden im Einzelnen die sich durch die Lösung ergebenden Behälter-, Endlagerungs- und Handhabungskosten, wobei nicht bei jeder Planung alle Kostenfelder vorliegen.

Die angewandten Algorithmen sind im Wesentlichen Lokale Suchheuristiken, die zur Lösungsfindung von klassischen Bedingungserfüllungsproblemen (z.B. Sudoku, Stundenplanung mit Raumbelegung, Maschinenbelegung, Routenplanung etc.) verwendet werden.

Es wurde gezeigt, dass insbesondere bei großen und komplexen Zuordnungsproblemen (d. h., viele zuzuordnende Entitäten und viele Randbedingungen) bei Anwendung der automatisierten Algorithmen ein hohes Einsparpotential vorliegt. Die für die Modellierung notwendige Arbeitszeit ist dabei vergleichbar mit der manuellen Ermittlung einer Lösung. Nach der Modellierung können in nahezu unbegrenzter Zahl weitere Varianten ermittelt werden und neue, günstigere Lösungen berechnet werden.

Ein weiteres, sehr komplexes Zuordnungsproblem – die Neuordnung von Fässern in einem stark regulierten Abfalllager bei Minimierung der Ortsdosisleistung und Neuordnungsaufwandes – wurde gelöst, um zu zeigen, dass auch radiologisch aufwendige Problemstellungen bearbeitet werden können. Für dieses Zuordnungsproblem existierte aufgrund der Komplexität und daraus folgenden hohen Planungsaufwandes keine vorgeschlagene Neuordnung. In diesem Teilvorhaben zeigten sich die Vorteile

der automatisierten Planung am deutlichsten, da viele verschiedene Neuordnungsrealisierungen – gemäß der Paretofunktion der Variablen Ortsdosisleistung und Neuordnungsaufwand – ohne Zusatzaufwand ermittelt und gegenübergestellt werden konnten.

Die Anwendung von Bedingungserfüllungsalgorithmen auf (kerntechnische) Zuordnungsprobleme wird daher für ein erfolgreiches Verfahren gehalten, welches in der Zukunft durch weitere Randbedingungen (Geometrie der Abfallstücke, Schnittreihenfolge etc.) noch weiter ergänzt und detailliert werden kann. Entscheidungen können so noch besser mit quantitativen Argumenten substantiiert werden.

7 LITERATUR

- [ADR 15] ECONOMIC COMMISSION FOR EUROPE COMMITTEE ON INLAND TRANSPORT
ADR - European Agreement Concerning the International Carriage of Dangerous Goods by Road” - Volume I; Stand vom 01.01.2015
- [AIG 13] JÖRG AIGN, KIM MENNICKEN
“Westinghouse Waste Simulation and Optimization Software Tool”, KONTEC 2013
- [BRE 14] PETER BRENNECKE
Anforderungen an endzulagernde radioaktive Abfälle (Endlagerungsbedingungen, Stand: Dezember 2014), Bundesamt für Strahlenschutz
- [BOC 14] MATTHIAS BOCK, ARTURO LIZON AGUILAR, WERNER STRATMANN,
Software based optimization Software of the container selection for the repository Schacht Konrad, Jahrestagung Kerntechnik 2014
- [BOR 13] ANDREAS BORTFELDT, GERHARD WÄSCHER
Constraints in container loading – a state-of-the-art review, European Journal of Operational Research, Amsterdam: Elsevier, Bd. 229.2013, 1, S. 1-20
- [FRA 16] FRAUNHOFER INSTITUT FÜR ALGORITHMEN UND WISSENSCHAFTLICHES RECHNEN (SCAI)
<https://www.scai.fraunhofer.de/de/geschaeftsfelder/optimierung/produkte/packassistant.html>
abgerufen am 23.11.2016
- [FRI 07] ANDREAS FRISKE, BENJAMIN VOLMERT
Verfahren zur Aktivitätsbestimmung von Kernbauteilen aus KKW“, KONTEC 2007
- [FRI 09] ANDREAS FRISKE, JÖRG RADZUWEIT, SIEGFRIED HUBER
Standort Obrigheim, „Konditionierung von Kernbauteilen des KKW Obrigheim (KWO)“, KONTEC 2009
- [FRI 13] ANDREAS FRISKE, JÖRG RADZUWEIT, DANIEL BRACK, BODO WEHNERT
„Konditionierung von Kernbauteilen des KKW Leibstadt (KKL-CH)“, KONTEC 2013
- [GLP 12] ANDREW MAKHORIN
GLPK package, part of the GNU project, released under the aegis of GNU.
Copyright © 2000, 2001, 2002, 2003, 2004, 2005, 2006, 2007, 2008, 2009, 2010, 2011, 2012
Andrew Makhorin, Department for Applied Informatics, Moscow Aviation Institute, Moscow, Russia. All rights reserved.

- [GNS 11] GNS GESELLSCHAFT FÜR NUKLEAR-SERVICE MBH
Zwischenlagerung von Betriebs- und Stilllegungsabfällen im Transportbehälterlager Ahaus –
Technische Annahmebedingungen - , Bericht GNS B 035/2007 vom März 2011, Rev. 4
Mit Ergänzung: Aktivitätsbeschränkungen für die Kategorien 1 bis 6 im Bericht BGZ B
245/2017, Rev. 1, gültig ab 2020
- [GRS 19] GESELLSCHAFT FÜR ANLAGEN- UND REAKTORSICHERHEIT (GRS) GGBH
Fortschrittsbericht, Forschungsvorhaben zum Förderkonzept „FORKA - Forschung für den
Rückbau kerntechnischer Anlagen“, Berichtszeitraum 1.Juli - 31. Dezember 2019
- [HÜB 16] FELIX HÜBNER, REBEKKA VOLK, JOSUA SEMME, FRANK SCHULTMANN
“Improvement of nuclear decommissioning and dismantling planning via experience exchange
and optimization methods”, 3rd Conference on Technological Innovations in Nuclear Civil En-
gineering, September 2016
- [KAR 17] LUTZ KARBSTEIN, EWN GMBH
„Optimierte Verpackung von radioaktivem Bauschutt in Konrad-Containern“, Jahrestagung
Kerntechnik 2017, Keynote
- [MAY 16] KLAUS MAYER, LARS ACKERMANN
AREVA GmbH, Reinhard Kaschel, E.ON Kernkraft GmbH, „Radiologische Verpackungsopti-
mierung bestrahlter Steuerelemente“, Kampagne KKI1, TÜV SÜD Expertentreffen Strahlen-
schutz, 16. – 18.3.2016, Rottach-Egern
- [SIL 14] ELSA SILVA, JOSÉ F. OLIVEIRA, GERHARD WÄSCHER
“The pallet loading problem - a review of solution methods and computational experiments”,
International transactions in operational research. - Oxford: Wiley-Blackwell, 2014
- [STG 20] GESETZ ZUM SCHUTZ VOR DER SCHÄDLICHEN WIRKUNG IONISIERENDER STRAHLUNG (STRAH-
LENSCHUTZGESETZ - STRLSCHG)
Strahlenschutzgesetz vom 27. Juni 2017 (BGBl. I S. 1966), das zuletzt durch Artikel 3b des Ge-
setzes vom 28. April 2020 (BGBl. I S. 960) geändert worden ist
- [STV 20] VERORDNUNG ZUM SCHUTZ VOR DER SCHÄDLICHEN WIRKUNG IONISIERENDER Strahlung
(Strahlenschutzverordnung - StrlSchV)
Strahlenschutzverordnung vom 29. November 2018 (BGBl. I S. 2034, 2036), die durch Artikel
1 der Verordnung vom 27. März 2020 (BGBl. I S. 748) geändert worden ist
- [WIK 16] WIKIPEDIA
[https://de.wikipedia.org/wiki/Lastverteilung_\(Informatik\)](https://de.wikipedia.org/wiki/Lastverteilung_(Informatik)), Abgerufen am 21.11.2016