Recherche und Beschreibung für das Endlagerbehältersystem in Frage kommende Materialien

Akronym

ElaBeMa

Leibniz Universität Hannover, Institut für Werkstoffkunde, Unterwassertechnikum Hannover

Friederike Rümelin, ruemelin@iw.uni-hannover.de

Dr. Thomas Hassel , hassel@iw.uni-hannover.de

Projektlaufzeit: 01.01.2023 – 30.06.2024

Förderkennzeichen: 02 E 12092

Gefördert durch das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV) und betreut durch den Projektträger Karlsruhe (PTKA)

Zuordnung zum FuE-Programm:

Projektförderprogramm des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie zur Sicherheitsforschung für kerntechnische Anlagen 2021–2025

FuE Bereich C2 Sicherheits und Endlagerkonzepte; Endlagertechnik und (geo-)technische Barrieren

FuE Feld C2.3 Geotechnische und technische Barrieren

PTKA Projektträger Karlsruhe Karlsruher Institut für Technologie

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz

1 Inhaltsverzeichnis

2 Einleitung 4

3 Methodik zur systematischen Werkstoffauswahl- und Bewertung 5

3.1 Der Design Prozess 5

3.1.1 Materialauswahlprozess 9

3.1.2 Erarbeitung eines Anforderungskataloges für ein Endlager 11

3.1.3 Übersetzung der Bedingungen in Parameter die einen Vergleich der Materialkennwerte ermöglichen 26

4 Recherche von Werkstoffsystemen 30

4.1 Polymere 30

4.2 Metallische Werkstoffe 32

4.2.1 Eisenbasislegierungen 33

4.2.2 Kupferbasislegierungen 38

4.2.3 Nickelbasislegierungen 42

4.2.4 Aluminiumbasislegierungen 45

4.2.5 Titanbasislegierungen 46

4.2.6 Zirkonium-Basislegierungen 49

4.2.7 Cobalt-Basis-Legierungen 49

4.2.8 Keramik 52

4.2.9 Glas 53

4.2.10 Verbundmaterialien 54

4.3 Übersicht der Werkstoffeigenschaften in Bezug auf die Eignung für einen Endlagerbehälter 55

4.4 Recherche der Produktionstechnik 59

4.4.1 Gießen 59

4.4.2 Additive Fertigung 61

4.4.3 Umformen 62

4.4.4 Stoffschlüssiges Fügen 63

4.4.5 Mechanisches Fügen 69

4.5 Anpassung der Werkstoffeigenschaften 70

4.6 Korrosionsschutz 70

4.6.1 Anstriche und Lacke 71

4.6.2 Pulverbeschichtungen: 72

4.6.3 Galvanische Beschichtungen 75

4.6.4 Kathodischer Schutz 75

4.6.5 Eloxieren 76

4.6.6 Chemische Beschichtungen 76

4.6.7 Phosphatieren 76

4.6.8 Vernickeln 76
4.6.9 Thermisches Spritzen....77
5 Eignung von Fertigungsverfahren und Werkstoffen 80
6 Literaturverzeichnis 82
7 Abbildungsverzeichnis....90
8 Anhang....91

2 Einleitung

Am 15. April 2023 wurden die letzten drei verbleibenden Kernkraftwerke in Deutschland vom Netz genommen. Trotz dem die kommerzielle Nutzung der Kernenergie zur Stromerzeugung in Deutschland damit ein Ende gefunden hat sind viele Fragen zur Endlagerung von radioaktiven Abfällen noch unbeantwortet. Insbesondere für die hochradioaktiven wärmeentwickelnden Abfälle zu denen z.B. Brennelemente gehören wurde noch kein Standort für ein Endlager bestimmt. Gemäß StandAG, vom 05.05.2017 muss das einschlusswirksame Gestein einen sicheren Einschluss des Inventars für einen Zeitraum von 1 Mio. Jahre ab Verschluss des sicherstellen. Für den Transport und die Einlagerung muss das radioaktive Material (Inventar) in ein Behältnis (Endlagerbehälter) eingebracht werden. Dies muss den Einflüssen der ihn umgebenen Umwelt standhalten und das radioaktive Inventar sicher einschließen. Gleichwohl muss der Behälter die Umwelt vor der ionisierenden Strahlung schützen, dieser Schutz erfordert die Integrität des Behälters über einen Zeitraum von 500 Jahren in denen eine Bergbarkeit möglich sein soll. Im Falle einer Einlagerung in Kristallingestein verlängert sich dieser Zeitraum auf 1 Mio. Jahre. (StandAG, vom 05.05.2017)

Die Wahl des Materials für den Endlagerbehälter spielt auch deshalb eine besondere Rolle, da die Konsequenzen eines Versagens des Behälters schwerwiegend sein können. Radionuklide könnten aus dem Behälter austreten und in die Umwelt gelangen z.B. in das Grundwasser. Wird dieses von Organismen aufgenommen kann es zu schwerwiegenden Schädigungen führen.

Im Juli 2024 wurde vom BASE ein Gutachten veröffentlicht welches zu dem Ergebnis kommt, dass frühestens im Jahr 2074 ein Standort für ein Endlager benannt werden könnte also 43 Jahre später als im StandAG angestrebt. (StandAG, vom 05.05.2017, Krohn et al. 2024) Durch diese Verzögerung würde auch die Festlegung auf ein Wirtsgestein entsprechend später erfolgen. Bis dahin ist also keine auf den spezifischen Standort und das damit einhergehende Wirtsgestein angepasste Behälterentwicklung möglich. Ohne diese Festlegung ist der Fortschritt in der Behälterentwicklung entsprechend verlangsamt. In ElaBeMa wurde Untersucht welche Materialien sich im Bezug auf die Fertigbarkeit für einen Endlagerbehälter eignen.

Die Wahl des Behältermaterials ist lediglich ein Aspekt für das Design eines Endlagers und den zugehörigen Endlagerbehälter. Es lässt sich eine Auswahl und Bewertung von geeigneten Materialien auch schon ohne spezifische Konstruktion für verschiedene Szenarien treffen. Da es sich bei Endlagerbehältern um Produkte mit hohem Sicherheitsanforderungen und einer beschränkten Stückzahl handelt weicht der Entwicklungsprozess von Produkten, welche in großen Stückzahlen zu günstigen Preisen produziert werden ab. Es kann demnach keine Materialwahl nach dem „trial and error“ Prinzip verfolgt werden (vgl.Jahan und Edwards 2013, S. 4), sondern die Entscheidung muss auf einer strukturierten Analyse und dieser und nachfolgender weiterer Untersuchungen getätigt werden.

Durch die Betrachtung von verschiedenen Werkstoffen, ihrer Fertigbarkeit und ihrem Verhalten unter dem Einfluss von, in einem Endlager erwartbaren Parametern, soll eingegrenzt werden welche Werkstoffe einen Endlagerbehälter in Deutschland in Frage kommen können. Weiterhin können aus den Ergebnissen dieser Arbeit Hinweise abgeleitet werden, welche weiteren Daten für eine evidenzbasierte Entscheidung für ein Behältermaterial benötigt werden.

Das Ergebnis soll technologieoffen und anpassbar an neue Anforderungen und technische Entwicklungen, anpassbar an das System eines Endlagers sein. Außerdem soll ergebnisoffen

gearbeitet werden, ohne die teilweise schon international festgelegten Material- und Designentscheidungen als einfach übertragbar anzusehen.

3 Methodik zur systematischen Werkstoffauswahl- und Bewertung

In diesem Bericht soll zunächst beschrieben werden wie ein Materialwahlprozess allgemein abläuft und welche spezifischen Ansätze es für die Materialwahl und den Designprozess eines Endlagerbehälters gibt. Da in Design-Prozessen generell ein Anforderungskatalog erstellt wird, soll auch hier ein solcher anhand von Studien und gesetzlichen Vorgaben systematisch erstellt werden.

3.1 Der Design Prozess

Designprozesse verlaufen oft nach einem iterativen Schema, beginnend mit der Definition des zu lösenden Problems, darauf folgt die Erarbeitung des Design-Briefs und der Randbedingungen bzw. Anforderungen. Auf der Grundlage der Anforderungen werden dann verschiedene Konzepte entwickelt aus denen dann wiederum die besten und passendsten ausgewählt werden um schließlich mit einem finalen Design zu enden.

Solche Prozesse können visuell beispielsweise durch den „Double Diamond“ (Abb. 1) dargestellt werden. In diesem Modell werden die Schritte in das Verstehen des Problems (Discover) und die Formulierung der Herausforderung (Define) unterteilt. Das Resultat der Definition ist ein klar formulierter Design-Brief, dieser ist visuell in der Mitte der beiden zu verorten. Darauffolgend werden basierend auf dem Design-Brief eine Vielzahl von Konzepten und Prototypen entwickelt. Im nächsten Schritt (Define) wird eine Auswahl aus den Konzepten getroffen. Dieser Prozess verläuft iterativ, d.h. von jedem Knotenpunkt des Prozesses kann je nach Bedarf zu einem früheren Knotenpunkt zurückgekehrt werden. Für dieses Projekt wurde ebenfalls ein iterativer Prozess gewählt, welcher schematisch in Abb. 2 dargestellt.

Da das Ziel dieser Arbeit ist, zu untersuchen welche Werkstoffe bezüglich ihrer Eigenschaften, ihrer Fertigbarkeit und Verfügbarkeit für einen Endlagerbehälter in Frage kommen könnten, muss dieser Prozess an die Materialwahl angepasst werden.

Zunächst sollte nachvollziehbar verstanden werden welche Anforderungen an welchem Ort (sowohl des Behälters als auch des Ortes an dem sich dieser befindet), zu welchem Zeitpunkt und welcher Art diese Anforderungen entsprechen.

Obwohl viele Designprozesse im Endeffekt nach einem ähnlichen Schema verlaufen gibt es in der theoretischen Betrachtung unterschiedliche Ansätze. Zudem kann in jedem Schritt eines Design-Prozesses für die Erarbeitung von Lösungsansätzen oder zur Einschränkung der gefundenen Lösungen eine Vielzahl von unterschiedlichen Methoden angewendet werden, die hier nicht näher erläutert werden soll.

Auch Methoden auch dem Projektmanagement, wie die Erstellung von Lasten- und Pflichtenheften, verlaufen iterativ. Der Auftraggeber erarbeitet dabei ein Lastenheft. Der Auftragnehmer erstellt daraus ein von ihm realisierbares Pflichtenheft. Diese beiden Hefte werden von beiden Seiten so lange redigiert, bis es zu einem Übereinkommen der Interessen beider Seiten kommt. (DIN 69901-5:2009-01; Kalasouskaya 2017)

Beispielhaft für den Prozess der Materialwahl kann der Prozess nach Ashby (2011, S. 102–103) beschrieben werden (siehe :Tabelle 1 Strategie für die Materialwahl nach Ashby (2011, S. 103)).

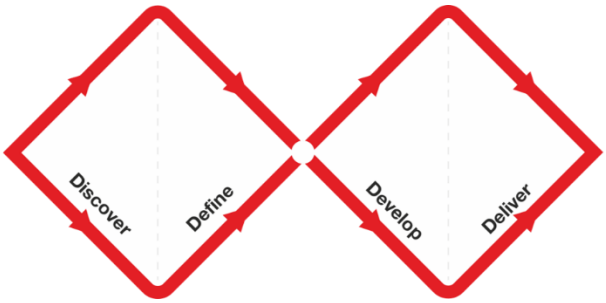


Abbildung 1 Double Diamond (Design Council)

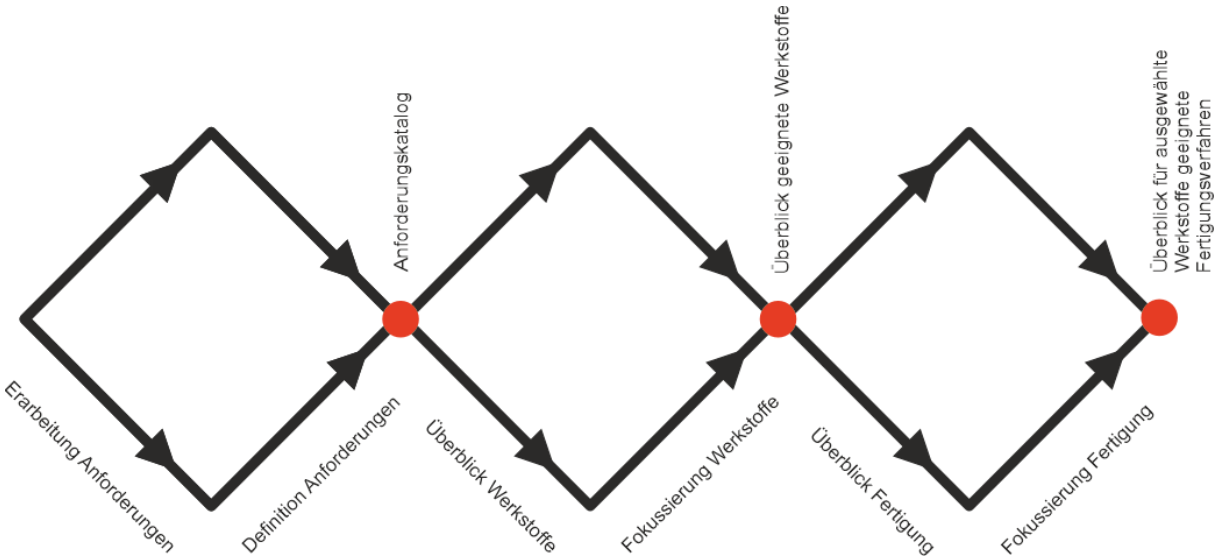


Abbildung 2 Prozess ElaBeMa

Tabelle 1 Strategie für die Materialwahl nach Ashby (2011, S. 103)

Schritt 1:	Die Anforderungen für das gesamte Produkt bzw. die zu betrachtende Komponente werden „übersetzt“ in:	Funktion	Was ist die Aufgabe des Bauteils
		Randbedingungen	Welche Bedingungen müssen in jedem Fall erfüllt werden? Bei welchen Bedingungen wäre es wünschenswert, wenn sie erfüllt werden könnten? Können in „harte“ und „weiche“ Bedingungen unterteilt werden.
		Zielsetzung	Was soll durch das Design erreicht werden? Welche Aspekte sollen maximiert oder minimiert werden?
		Freie Variablen	Welche Parameter können durch den Designer verändert werden?
Schritt 2	Überprüfung der Materialien mithilfe der Randbedingungen	Welche Materialien können die Bedingungen nicht erfüllen? → Diese aussortieren	
Schritt 3	Erstellen einer Rangliste mithilfe der Zielsetzung	Aus den Materialien, welche aus Schritt 2 übrig sind werden in einer Rangliste sortiert, nach ihrer Fähigkeit die Zielsetzung zu erfüllen	
Schritt 4	Dokumentation	Die als am besten geeignet bewerteten Materialien werden nochmals recherchiert Welche Erfahrungen gibt es zu den Materialien, genaue Kostenangaben, Diese Angaben können in Handbüchern, Datenblättern, Fallstudien und Schadensanalysen gefunden werden.	

Um die im Materialauswahlprozess erarbeiteten Anforderungen in messbare Bedingungen zu übersetzen kann als Methode „Quality Function Deployment“ genutzt werden. Diese Methode wurde ursprünglich von Yoji Akao als Methode für kundenorientiertes Produktdesign entwickelt. Sie stellt die Bedürfnisse der Kunden (Was?) in Relation zur möglichen technischen Umsetzung (Wie?). Der Zusammenhang zwischen was und wie wird anhand von Zahlen bewertet, daraus ergibt sich ein Ranking welches zeigt, welche Aspekte der technischen Umsetzung besonders beachtet werden müssen, um die Kundenwünsche zu erfüllen (Akao 1990). Diese Methode wurde beispielsweise von Mayyas et al. (2011) für die Übersetzung der Anforderungen an Automobilkomponenten in Materialeigenschaften genutzt.

Die Wahl eines Werkstoffes kann zu verschiedenen Zeitpunkten des Designprozesses getroffen werden. Wird der Werkstoff gewählt bevor eine konkrete Anwendung des Produktes feststeht so werden durch seine Eigenschaften die Möglichkeiten in Konstruktion und Anwendung eingeschränkt.

Besteht bereits ein Konzept bzw. sind schon grundlegende Anforderungen für das Produkt festgelegt worden, dann stehen möglicherweise verschiedene Werkstoffe zur Auswahl, welche die Anforderungen erfüllen. Aus diesen muss dann durch einen Auswahlprozess die bestmögliche Option ausgewählt werden. Dafür werden verschiedene Aspekte des Werkstoffes betrachtet.

Die Anforderungen müssen also kategorisiert und sortiert werden, um im Anschluss besser bewerten zu können, welche Werkstoffe den Anforderungen am besten entsprechen.

Hornbogen et al.(2019b, S. 6–9) teilen diese Aspekte ein in physikalische, technische, wirtschaftliche und ökologische Eigenschaften. Die physikalischen Eigenschaften können durch die dem Werkstoff zugehörigen Größen ausgedrückt werden. Technische Eigenschaften kombinieren physikalische Eigenschaften zu einem Eigenschaftsprofil, welches für die gewünschte Anwendung erforderlich ist, z.B. eine hohe Härte und hohe Korrosionsbeständigkeit. Wirtschaftliche Aspekte betreffen sowohl den Preis des Werkstoffes als auch die Kosten für seine Verarbeitung und die Verfügbarkeit. Ökologische Eigenschaften beschreiben wie der Werkstoff über kurze und lange Zeiträume mit Menschen und Umwelt interagiert, ob also z.B. toxikologische Aspekte betrachtet werden müssen.

Ashby (2013, S. 5) unterteilt die Materialeigenschaften in generelle und ökologische Eigenschaften, unter welche Preis, Dichte, Energiegehalt und CO_2-Fußabdruck fallen, mechanische, chemische, thermische -und elektrische Eigenschaften.

Reuter (2021, S. 56) unterteilt die Werkstoffeigenschaften in physikalisch, mechanisch, technologisch, Gebrauch und Wirtschaftlichkeit.

Karana et al. (2008) vergleichen die Aspekte zur Werkstoffauswahl, die in anderen Veröffentlichungen genannt wurden tabellarisch (siehe Tab. 2).

Tabelle 2 Aspekte der Werkstoffauswahl (Karana et al. 2008)

Review of different sources defining the effective material aspects for materials selection process								
Materials (1967)	Patton (1968)	Esin (1980)	Ashby 1992)	Lindbeck (1995)	Budinsky (1996)	Mangonon (1999)	Ashby & Johnson (2002)	Ashby (2005)
- Mechanical properties - Cost	- Service requirements -Fabrication requirements - Economic requirements	Production requirements - Economic requirements - Maintenance	General properties - Mechanical properties - Thermal properties - Wear - Corrosion/ oxidation	- Mechanical Properties - Physical properties - Chemical properties - - Electrical properties - Acoustical properties -Optical properties	- Chemical properties - Physical properties - Mechanical properties - Dimensional properties - Business issues	- Physical factors - Mechanical factors - Processing and fabricability - Life of component factors - Cost and availability - Codes, statutory and other - Property profile -Processing profile Environmental profile	- General attributes - Technical attributes - Eco attributes - Aesthetic attributes	General properties - mechanical properties - Thermal properties Electrical properties -Optical properties - Eco-properties - Environmental resistance

Für Produkte, welche an Konsumenten vermarket werden spielen zudem sensorische Aspekte und immaterielle Eigenschaften von Materialien eine Rolle, hierbei handelt es sich z.B. um den wahrgenommenen Wert den das Produkt durch die Materialwahl erhalten hat. Dazu muss der tatsächliche Wert nicht dem wahrgenommenen Wert entsprechen (vgl. Karana et al. 2008, S. 1087). Diese Aspekte spielen bei der Wahl eines Materials für einen Endlagerbehälter keine übergeordnete Rolle, dennoch spielt die Akzeptanz der Lösungsvorschläge in der Bevölkerung eine wichtige Rolle für den Erfolg einer Endlagerfindung und deren Realisierung. Besteht also zum Ende der Materialwahl eine Auswahl zwischen technisch gleichwertigen Materialien so könnte die Wahrnehmung über die Sicherheit der Bevölkerung an dieser Stelle eine entscheidungsbildende Rolle einnehmen. Die Relevanz der partizipativen Entscheidungsfindung kann durch die Anwendung von § 5 des StandAG, vom 05.05.2017 ergeben. In diesem ist festgeschrieben, dass Bürger und Bürgerinnen in das Verfahren einzubeziehen sind.

Aus Materialdatenbanken können mittels moderner digitaler Methoden Materialien ausgewählt werden, welche den geforderten Materialkennwerten am ehesten entsprechen, bzw. sie können mehrere Alternativen anbieten, da die Werkstoffwahl oft nicht direkt trennbar von der Konstruktion getroffen werden kann, haben Chandrasekhar et al. (2022) ein System entwickelt, welches Design Optimierung mit Materialwahl via neural-network verbindet.

Die Methode „Case Based Reasoning“ nutzt Informationen aus Datenbanken, welche zeigen welche Materialien in ähnlichen Anwendungen bereits erfolgreich angewendet wurden (Jahan und Edwards 2013, S. 24–25). In diesem Falle besteht zwar keine Datenbank über die Anwendung von Werkstoffen für die Anwendung in Endlagern, könnte diese Methode „manuell“ durch das vergleichen von Materialien aus Konzepten oder umgesetzten Projekten durchgeführt werden. Jahan und Edwards (2013) kritisieren an dieser Methode, dass sie mehr

auf Erfahrungswerte setzt als auf tatsächliche Materialkennwerte und damit weniger verlässliche Lösungsvorschläge bietet.

3.1.1 Materialauswahlprozess

Das Endlager muss insgesamt als ein System betrachtet werden, wobei das System als Ganzes eine generelle übergeordnete externe Anforderung erfüllen muss: Den Schutz der Bevölkerung und der Umwelt vor den Gefahren von ionisierender Strahlung.

Dem untergeordnet sind Anforderungen an Funktionen des Systems, welche wiederrum jeweils durch Anforderungen an ein Sub-System definiert werden und schließlich hat jede Komponente des Subsystems seine eigenen Anforderungen. (vgl.IAEA 2020, S. 14–15)

Methoden des Designs für sich verändernde bzw. wachsende Systeme werden bisher in der Nutzer-Zentrierten Design Forschung angewandt und dienen z.B. dazu, Produkte auf spezifische Kunden zuzuschneiden oder z.B. IoT (Internet of Things z.B.angewendet im smart-home) Produkte zu entwickeln, die sich auch in noch nicht bestehende Netzwerke eingliedern lassen. In ihrer Methodik wenden Frens et al. (2018) einen Prozess an in dem grundlegende Elemente des IoT Systems identifiziert werden. ihre Schnittstellen werden so gestaltet, dass die Möglichkeit besteht diese untereinander zu vernetzen. Aus der Zusammenwirkung der Elemente können neuartige Funktionalitäten entstehen. Die Elemente des Systems müssen dabei so gestaltet werden, dass diese Funktionen bedacht werden. Da in Zukunft die Anzahl der zu vernetzenden Elemente steigen kann sollen daher alle Eigenschaften der Grundelemente untersucht werden und mögliche Schnittstellen mit eingearbeitet werden.

	Kernfunktion 1	Kernfunktion 2	Kernfunktion 3
Kernfunktion 1		neue Funktion	neue Funktion
Kernfunktion 2	neue Funktion		neue Funktion
Kernfunktion 3	neue Funktion	neue Funktion	

Tabelle 3 Kernfunktionen und neue Funktionen nach Frens et al. (2018)

Dabei ist es besonders wichtig zu beachten, dass sich Ansprüche sowie Technologie und Forschungsstand mit der Zeit weiterentwickeln. Die Schwierigkeit liegt bei diesen Produkten darin, die folgenden Entwicklungen und Ansprüche der Nutzer bzw. hier der Anforderungen, die aus wissenschaftlichen Erkenntnissen herrühren vorauszusagen.

Im Falle des Designs eines generischen Endlagerbehälters ist es daher wichtig, das Design möglichst gut an veränderliche Randbedingungen anzupassen. Die Ungewissheit über die Randbedingungen wird hauptsächlich durch die ausstehende Wahl des Endlagerstandortes verursacht.

Betrachtet man das Endlager als System so müssen die Elemente des Systems identifiziert werden. Beispielsweise kann der Endlagerbehälter als ein Element des Systems betrachtet werden. Inventar und Endlagerstandort können nach dieser Betrachtung weitere Teile dieses Systems bilden. Der Endlagerstandort und die damit einhergehenden Eigenschaften sind noch nicht festgelegt und müssen daher als Variablen in den Entwicklungsprozess eingebunden werden. Die Menge und Art des einzulagernden Inventars sind zum jetzigen Zeitpunkt dokumentiert und stehen fest. Es ist nicht auszuschließen, dass sich diese Mengen in der Zukunft noch verändern könnten, da nicht vorherzusehen ist welche politischen Entscheidungen zur Anwendung der Kernkraft in den nächsten 74 Jahren getroffen werden. Technische Innovationen können das System insofern beeinflussen, als dass beispielsweise neue Werkstoffe für einen Endlagerbehälter entwickelt werden könnten.

Um technologische Fortschritte einschätzen zu können, können Technologie- Roadmaps und Modelle über mögliche zukünftige Entwicklungen erstellt werden. Hierbei werden Einschätzungen darüber abgegeben wie sich die technischen Möglichkeiten weiter entwickeln könnten. Um diese Modelle zu erstellen können Methoden wie Scenario Planning, die Delphi Methode, SWOT-Analyse oder ähnliche angewendet werden.

Die Veränderungen in der Planung des geologischen Tiefenlagers sind abhängig von der Entscheidung für den Endlagerstandort. Zudem kann es zu Änderungen in den angenommenen Volumina des einzulagernden Inventars kommen. Dies könnte insbesondere der Fall sein falls in Zukunft eine Rückkehr zur Kernenergie stattfinden sollte.

Alternativ zu einem generischen Design könnten anhand der Unterschiede der Anforderungen, die aus den drei in Frage kommenden Gesteinsformen hervorgehen drei verschiedene angepasste Behälter entwickelt werden.

Da in dieser Arbeit nicht das komplette Design des Endlagerbehälters, sondern nur geeigneter Werkstoffe und Verfahren ermittelt werden sollen, kann das Resultat eine unterschiedliche Eignung von Werkstoffen für die drei Gesteinstypen Kristallingestein, Tongestein und Salzgestein sein. Daher werden auch die Anforderungen an die drei unterschiedlichen Gesteinstypen angepasst.

Die IAEA schlägt in ihren „Design Principles and Approaches for Radioactive Waste Repositories“ (2020, S. 68) vor, das für das Design eines Endlagers zunächst die zu lagernden Inventare betrachtet werden sollten. Danach sollte ein schrittweiser, gut definierter Designprozess verfolgt werden, mit eindeutig definierten Meilensteinen.

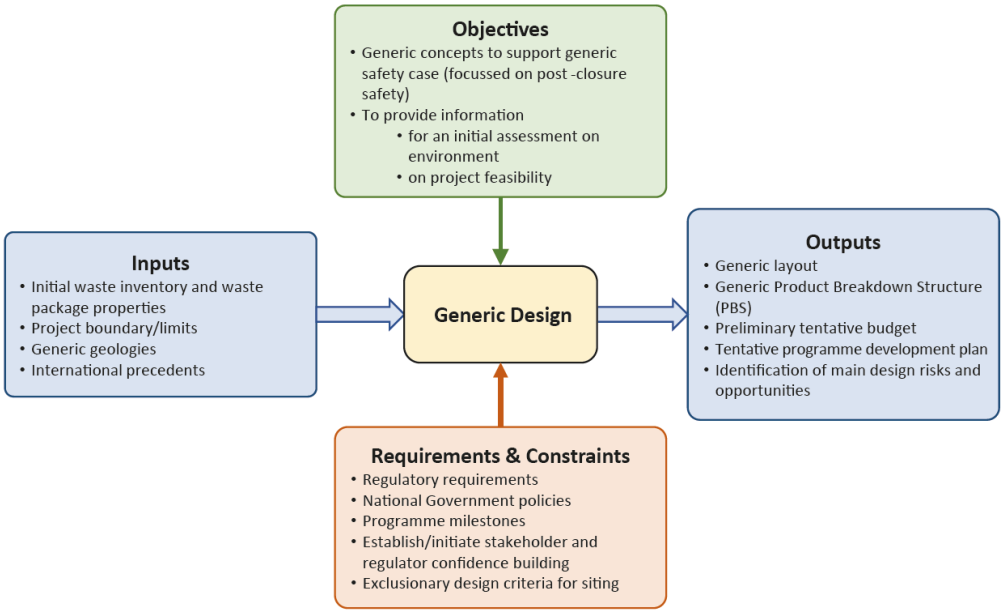


Abbildung 3 Generic Design (IAEA 2020, S. 24)

Der sechs-schrittige iterative Prozess der IAEA beginnt mit einem generischen Design (siehe Abb. 4, (IAEA 2020). Das oder die generischen Designs werden zu einem Zeitpunkt erstellt, in dem nur die groben Randbedingungen der potentiellen Lagerstätten bekannt sind.

Grobe Anforderungen, Einschränkungen müssen hierfür zusammengetragen und Annahmen getroffen werden. Dies sind z.B. Informationen zu den existierenden Inventaren und ihren Eigenschaften. Daraus soll ein konzeptuelles Design erstellt werden, welches sowohl die Sicherheit als auch die Realisierbarkeit betrachtet. Aus diesem generischen Design kann dann

wiederrum eine R&D Roadmap erstellt werden die einen Startpunkt für weitere Planungen bezüglich Zeit, Kosten und möglichen Risiken darstellt.

Beispiele von fortgeschrittenen „Endlager-Designs“: Gräben, oberflächennahe Strukturen, Unterirdische Lagerstätten in mittlerer Tiefe, Lagerung in Tiefen geologisch stabilen Formationen, andere Lagerungslösungen werden in IAEA 2020 beschrieben.“ (IAEA 2020, S. 24). In Deutschland ist bereits eine Entscheidung für ein geologischen Tiefenlager getroffen worden und damit bereits ein Teil dieses Schrittes vollzogen worden. Im ENCON-Behälterkonzept wurden zudem bereits generische Behälterkonzepte für Deutschland entwickelt. (Köhler et al. 2019)

Im Prozess des Human Centered Design werden neben den Anforderungen auch alle Stakeholder eines Produktes bestimmt. Damit gemeint sind alle Parteien und Personen die mit dem Produkt in Berührung kommen, vom Produzenten über den Nutzer bis zum Recycler am Ende des Lebenszyklus des Produktes gemeint auch indirekt betroffene Stakeholder werden betrachtet. Die Stakeholder bezogen auf den Endlagerbehälter sind: z.B. Hersteller, Rohstofflieferanten, Transport, Ministerien und staatliche Einrichtungen wie die BGE, BASE und das BMU, Institutionen, Bevölkerung und spezifisch die Anwohner eines Endlagerstandortes.

Auch wenn ein Endlagerbehälter kein Produkt für den täglichen Gebrauch in der Bevölkerung ist, so ist er doch ein essentielles Produkt für ihren Schutz. Daher müssen die Anliegen der Bevölkerung auch in die Entscheidung der Materialwahl für den Endlagerbehälter mit einbezogen werden. Gemäß des Stand AG § 5 - §10 (StandAG, vom 05.05.2017) muss die Bevölkerung in die Entscheidung für einen Endlagerstandort einbezogen werden. Dies geschieht durch sich ständig weiterentwickelnde Verfahren, eine Informationsplattform, sowie ein nationales Begleitgremium in dem die Bevölkerung durch 6 Bürger repräsentiert wird.

Dabei gilt es zu beachten, dass das Vertrauen der Bevölkerung in politische Entscheidungsträger und Wissenschaft in verschiedenen Ländern sehr unterschiedlich ausgeprägt ist. So handelt es sich bei skandinavischen Ländern wie Schweden und Finnland um sogenannte „high-trust“- Länder und im Gegensatz dazu bei Frankreich um eine „Gesellschaft des Misstrauens“ (Lehtonen et al. 2020). Aus diesen gesellschaftlichen Gegebenheiten lassen sich aber noch keine direkten Anforderungen ableiten, welche das Behältermaterial betreffen. aufzubauen Es wird notwendig sein die wissenschaftlichen Erkenntnisse zur Behältermaterialwahl verständlich zu kommunizieren um das Vertrauen der Bevölkerung aufzubauen und zu erhalten, damit deren Akzeptabilität in der Gesellschaft erreicht werden kann.

Die NAGRA wendet ebenfalls einen iterativen Prozess an. Ausgehend von einer angenommen notwendigen Wandstärke des Endlagerbehälters für SF (spent fuel) von 140 mm. Es wird angenommen, dass diese Wandstärke sich nach 1000 Jahren auf 138 mm und nach 10.000 Jahren auf 120 mm abnimmt. (Patel et al. 2012)

3.1.2 Erarbeitung eines Anforderungskataloges für ein Endlager

Das Übergeordnete Ziel für die Einrichtung eines Endlagers ist der Schutz der Bevölkerung und der Umwelt vor der ionisierenden Strahlung des hochradioaktiven Inventars.

Das Endlager an sich kann als ein System betrachtet werden, dessen einzelne Aspekte noch nicht festgelegt sind. Zu diesen Aspekten zählen nicht nur Standort und Wirtsgestein, sondern auch der Endlagerbehälter

Zur Ermittlung der Anforderungen wird ein top-down Approach angewandt, der zunächst die übergeordneten Anforderungen an das gesamte System des Endlagers betrachtet und sich schließlich mit den daraus resultierenden Anforderungen an den Endlagerbehälter auseinandersetzt (vgl. IAEA 2020, S. 14). Im ersten Schritt des darauffolgenden bottom-up Prozesses für die Entwicklung wird die Materialwahl für den Endlagerbehälter diskutiert.

Wie im vorhergehenden Kapitel bereits beschrieben beschreibt die IAEA in ihren „Design Principles and Approaches for Radioactive Waste Repositories“ (2020, S. 68) wie methodisch vorgegangen werden kann, um ein Endlager zu entwickeln. Es kann ein schrittweiser, gut definierter Designprozess mit eindeutig definierten Meilensteinen verfolgt werden. Insgesamt umfasst dieser Prozess sechs Schritte, im ersten soll ein generisches Design für einen Endlagerbehälter erarbeitet werden.

Da die Entwicklung der Endlagerstätte in Deutschland noch nicht entsprechend fortgeschritten ist kann hier nur ein Teil dieses ersten Schrittes beschreiben werden, bzw. ein vorbereitender Schritt für dieses erste Design erarbeitet werden: eine Beschreibung und Einordnung möglicher Werkstoffe für einen Endlagerbehälter und mögliche Fertigungsmethoden bezogen auf die Werkstoffe.

Da die Entscheidung für den Endlagerstandort noch aussteht ist es wichtig, das Design möglichst gut an veränderliche Randbedingungen anzupassen.

Daher soll bei jeder Anforderung betrachtet werden, welche möglichen Veränderungen auftreten könnten. Dies gilt sowohl für die Anforderungen an den Endlagerbehälter als auch für die Anforderungen an das Behältermaterial.

3.1.2.1 Ursprung der Daten für die Analyse

Um Materialkennwerte zu vergleichen und basierend darauf Entscheidungen zu treffen können ist ein Aspekt die Herkunft der Daten. Sie können experimentell ermittelt worden sein, oder aber sie können aus anderen bekannten Kennwerten berechnet oder aber durch Berechnungen vorhergesagt worden sein.

Aufgrund der Zeitspanne von bis zu 1 Mio. Jahre für die der Endlagerbehälter ausgelegt sein muss, kann ein zeitlich ein 1:1 getreuer experimenteller Nachweis über die Eignung des Endlagerbehälters nicht erbracht werden, da ein entsprechendes Experiment 1 Mio. Jahre dauern würde. Es können jedoch Kennwerte ermittelt werden. Welche Kennwerte ermittelt werden sollten lässt sich aus den Anforderungen ableiten welche im folgenden Kapitel erarbeitet werden. Zudem können experimentell ermittelte Daten aus kürzeren Zeiträumen als Grundlage für eine zeitliche Extrapolation genutzt werden.

Alternativ zu experimentellen Datenermittlungen können auch werkstoffkundliche Daten aus archäologischen und geologischen Untersuchungen abgeleitet werden, diese werden als archäologische bzw. geologische Analoga bezeichnet. Die Reihe der so untersuchbaren archäologischen Materialien und deren Fertigung sind dabei auf die historischen Möglichkeiten der Fertigung beschränkt. Da die Menge der verfügbaren und verarbeitbaren Werkstoffe seit der industriellen Revolution stark zugenommen hat, ist eine Beschränkung auf die Werkstoffe die vor 500 oder mehr Jahren verfügbar waren, gefunden und archäologisch untersucht worden sind dadurch stark eingeschränkt. Die Möglichkeiten der Werkstoffentwicklung und der entsprechenden Fertigungsmethoden würde viele Optionen unbeachtet lassen, welche zu erfolgsversprechenden Ergebnissen führen könnten. Bei der Betrachtung von archäologischen Analoga sollten sowohl Materialzusammensetzung als auch Fertigungsverfahren betrachtet werden, welche sich häufig in vielerlei Hinsicht von den heutigen Standards unterscheiden. Trotzdem können diese Analoga zeigen, dass sowohl

Kupfer als auch Eisenwerkstücke unter günstigen Bedingungen mehrere Tausend Jahre überdauern können (Féron und Macdonald 2006).

Neben dem archäologischen Analogon besteht das natürliche bzw. geologische Analogon. Es bezieht sich auf natürlich vorkommende gediegene Metalle welche in geologischen Formationen entdeckt wurden. Als Beispiel hierfür wird das blattförmige native Kupfer, welches in Tongestein in Littleham Cove in England gefunden wurde angeführt. (Hassel et al. 2021; Milodowski et al. 2002)

Einige Kennwerte können auch aus der Gesetzgebung abgeleitet werden. In Deutschland findet sich hierzu die Verordnung über Sicherheitsanforderungen and die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle (EndlSiAnfV, vom 06.10.2020). Zusammengefast finden sich die messbaren regulatorischen Anforderungen in Tabelle 4 im Kapitel „Gesetzliche Vorgaben“.

Internationale Studien, Erfahrungen und Konzepte sollen ebenfalls betrachtet werden. Die Anforderungen, die aus Studien abgeleitet werden können lassen sich den unterschiedlichen Funktionsorten des Behälters zuordnen und sollen so im Folgenden vorgestellt werden.

Allgemein ist zu beachten, dass Gesetze und die damit verbundenen Sicherheitsanforderungen sowie wissenschaftliche Erkenntnisse über die Eignung der Werkstoffe und deren Verarbeitung sich in der Zukunft weiter ändern können . Gemäß der (EndlSiAnfV, vom 06.10.2020) muss die Qualitätssicherung dem Stand von Wissenschaft und Technik entsprechen. Durch den langen Planungszeitraum müssen daher diese vorraussichtlichen Änderungen für sie Anforderungen mit betrachtet werden.

3.1.2.2 Anforderungen und Vorgaben für das Endlagersystem

Im folgenden Kapitel werden die Anforderungen und Vorgaben an das Endlager als gesamtes System beschrieben. Diese werden ihrem Ursprung nach vorgestellt, beginnend mit den gesetzlichen Vorgaben, fortgeführt mit den Anforderungen die sich aus den Funktionsorten des Behälters ableiten lassen.

3.1.2.3 Gesetzliche Vorgaben

In den gesetzlichen Vorgaben finden sich zumeist Vorgaben die sich auf die Funktion des Endlagers als gesamtes Bauwerk beziehen.

Generell ist zu beachten, dass eine hierarchische Ordnung von Regelungen, die von Verschiedenen Instanzen erstellt und beschlossen werden besteht. Die vom BMU (2020, S. 104) erstellte Regelwerkspyramide (Abb. 5) zeigt sowohl rechtliche Rahmenbedingungen als auch nicht-verbindliche Regelungen und Normen mit ihren Uhrhebern.

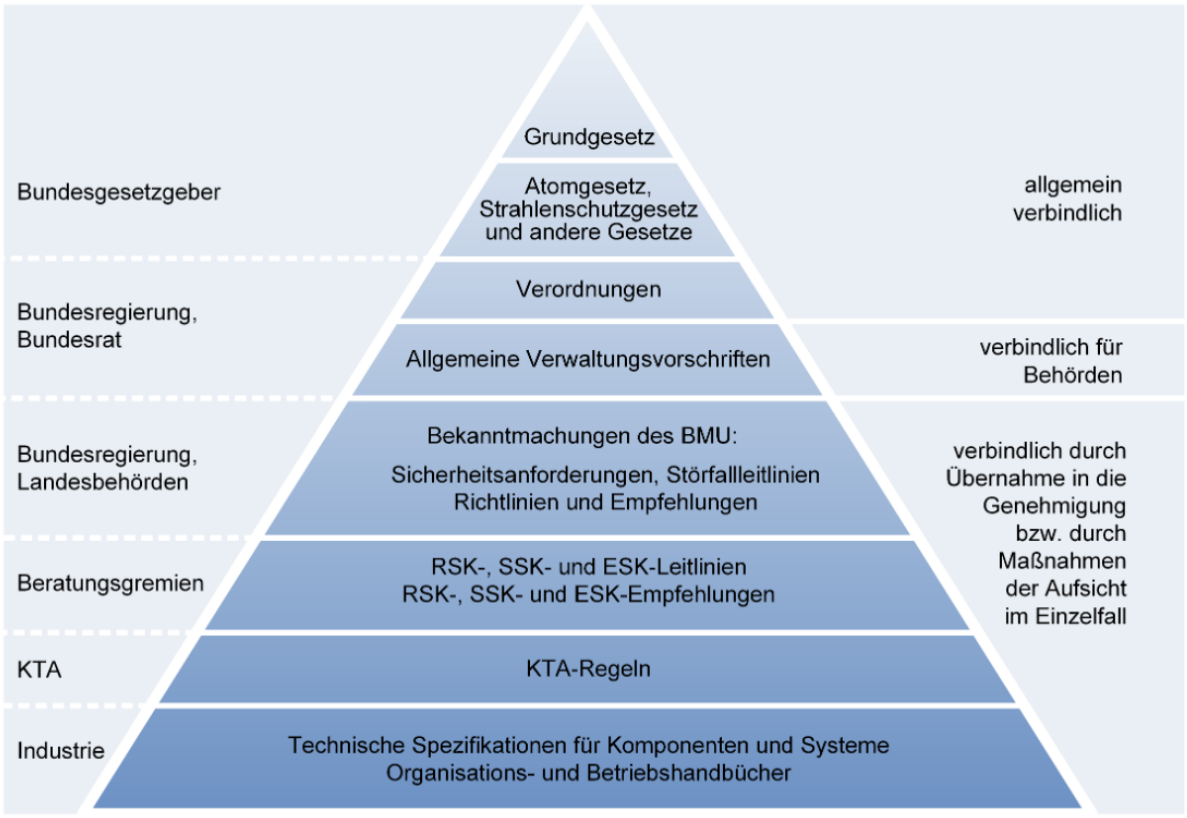


Abbildung 4 Regelwerkspyramide (BMU 2020)

Innerhalb dieser Regelungen sollten idealerweise die verbindlichen übergeordneten Regelungen so formuliert sein, dass diese den untergeordneten Anforderungen genügend Interpretations-Spielraum geben. Dies zeigt sich beispielsweise an § 27 des Stand AG welcher vorerst die Maximaltemperatur an der Außenfläche des Behälters auf 100°C festlegt, solange noch keine Festlegung der Grenztemperaturen für das Gestein des Endlagerstandortes getroffen wurde. In einem Diskussionspapier kritisierte die ESK diese vorsorgliche Festlegung (vgl.ESK 2022).

Aus den gesetzlichen Vorgaben können einige Anforderungen mit spezifischen messbaren Werten entnommen werden aufgelistet sind.

Vorgabe	Einheit / Messbarkeit	Gesetz
§ 3 Bewertungszeitraum; Entwicklungen des Endlagersystems (1) Der Bewertungszeitraum beträgt **eine Million Jahre** ab dem vorgesehenen Verschluss des Endlagers.	Jahre	(EndlSiAnfV, vom 06.10.2020)
§ 4 Sicherer Einschluss der radioaktiven Abfälle (5) Für die zu erwartenden Entwicklungen ist zu prüfen und darzustellen, dass im Bewertungszeitraum 1. insgesamt höchstens ein Anteil von $\mathbf{10^{-4}}$ und 2. jährlich höchstens ein Anteil von $\mathbf{10^{-9}}$ sowohl der Masse als auch der Anzahl der Atome aller ursprünglich eingelagerten Radionuklide aus dem Bereich der wesentlichen Barrieren ausgetragen wird. In diesen Anteilen sind auch radioaktive Zerfallsprodukte der ursprünglich eingelagerten Radionuklide zu berücksichtigen.	Massenanteil	(EndlSiAnfV, vom 06.10.2020)
§ 7 Dosiswerte im Bewertungszeitraum (2) Die Abschätzung ist sowohl für die zu erwartenden Entwicklungen als auch für die abweichenden Entwicklungen vorzunehmen. Expositionen auf Grund von Austragungen von Radionukliden aus den eingelagerten radioaktiven Abfällen sind geringfügig im Sinne von Absatz 1 Satz 1, wenn 1. für die zu erwartenden Entwicklungen die abgeschätzte zusätzliche effektive Dosis für Einzelpersonen der Bevölkerung höchstens im Bereich von **10** Mikrosievert pro Kalenderjahr liegt und 2. für die abweichenden Entwicklungen die abgeschätzte zusätzliche effektive Dosis für Einzelpersonen der Bevölkerung **100** Mikrosievert pro Kalenderjahr nicht überschreitet.	Mikrosievert	(EndlSiAnfV, vom 06.10.2020)

§ 8 Ausschluss sich selbst tragender Kettenreaktionen (2) Um eine sich selbst tragende Kettenreaktion ausschließen zu können, muss der berechnete Neutronenmultiplikationsfaktor kleiner sein als 1. **0,95** im Zeitraum von 500 Jahren nach dem geplanten Verschluss des Endlagers und 2. **0,98** während des übrigen Bewertungszeitraumes.	Neutronen-multiplika-tionsfaktor	(EndlSiAnfV, vom 06.10.2020)
§ 14 Ermöglichung einer Bergung eingelagerter Endlagergebinde (1) Es sind ausreichende Vorkehrungen dafür zu treffen, dass eine Bergung der eingelagerten Endlagergebinde während der Stilllegung und für einen Zeitraum von **500 Jahren** nach dem vorgesehenen Verschluss des Endlagers möglich ist. (2) Die Vorkehrungen sind ausreichend, wenn 1. für die zu erwartenden Entwicklungen des Endlagersystems die eingelagerten Endlagergebinde für einen Zeitraum **von 500 Jahren** nach dem vorgesehenen Verschluss des Endlagers a) individuell aufgefunden und identifiziert werden können, b) mechanisch so stabil sind, dass eine Handhabung ganzer Endlagergebinde möglich ist, und c) bei ihrer Handhabung keine Freisetzung von radioaktiven Aerosolen erwarten lassen und 2. eine umfassende Dokumentation angelegt wird über a) das aufgefahrene Endlagerbergwerk einschließlich seiner Stilllegung, b) sämtliche eingelagerten Endlagergebinde einschließlich ihrer jeweiligen Beladung und Position im Endlagerbergwerk und c) die zu erwartenden und die abweichenden Entwicklungen des Endlagersystems. Die Dokumentation muss an mindestens zwei räumlich und organisatorisch voneinander getrennten Stellen möglichst langfristig verfügbar und lesbar gehalten werden.	Jahre	(EndlSiAnfV, vom 06.10.2020)
„der Gebirgsbereich, der den einschlusswirksamen Gebirgsbereich aufnehmen soll, muss mindestens **100 Meter mächtig** sein, bei Gesteinskörpern des Wirtsgesteins Kristallin mit geringerer Mächtigkeit kann der Nachweis des sicheren Einschlusses für den betroffenen Gebirgsbereich bei Vorliegen geringer Gebirgsdurchlässigkeit auch über Zusammenwirken des Wirtsgesteins mit geotechnischen und technischen Barrieren geführt werde; eine Unterteilung in mehrere solcher Gebirgsbereiche innerhalb eines Endlagersystems ist zulässig; “	Meter	(StandAG, vom 05.05.2017) §23(2)
„die Oberfläche eines einschlusswirksamen Gebirgsbereiches muss mindestens **300 Meter** unter der Geländeoberfläche liegen. In Gebieten in denen im Nachweiszeitraum mit exogenen Prozessen wie insbesondere eiszeitlich bedingter Erosion zu rechnen ist, deren direkte oder indirekte Auswirkungen zur Beeinträchtigung der Integrität eines einschlusswirksamen Gebirgsbereichs führen können, muss die Oberfläche des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs tiefer als die zu erwartende größte Tiefe der Auswirkungen liegen; „	Meter (Tiefe)	(StandAG, vom 05.05.2017) § 23 (3)
Salzschwebe über dem ewG muss wenigstens **300 m** mächtig sein	Meter	(StandAG, vom 05.05.2017) §23 (3)
„Solange die maximalen physikalisch möglichen Temperaturen in den jeweiligen Wirtsgesteinen aufgrund ausstehender Forschungsarbeiten noch nicht festgelegt worden sind, wird aus Vorsorgegründen von einer Grenztemperatur von **100 Grad Celsius an der Außenfläche der Behälter** ausgegangen.“	°C	(StandAG, vom 05.05.2017) § 27 (4)

Tabelle 4 Spezifisch messbare regulatorische Anforderungen

Die gesetzlichen Anforderungen und Vorgaben lassen sich zudem nach ihrer Art differenzieren. Die in der vorhergehenden Tabelle 4 aufgezählten Anforderungen sind spezifisch messbar.

Einige Einflussfaktoren sind gesetzlich noch nicht festgelegt. Darunter auch der wohl wichtigste Parameter der Ort des Tiefenlagers für hochradioaktive wärmeentwickelnde Abfälle. Durch die fehlende Festlegung auf einen spezifischen Ort kann der direkte Einfluss der Beschaffenheit des behälterumgebenden Gesteins auf das Behältermaterial bisher nur generisch gedacht werden.

3.1.2.4 Anforderungen aus den Funktionsorten des Behälters

Der Endlagerbehälter ist nur ein Teil des gesamten Endlagers, er muss daher je nach Szenario nicht alle Anforderungen an das gesamte Endlager erfüllen. Seine Aufgabe besteht darin das radioaktive Inventar einzuschließen und als Teil der technischen Barriere den Verbleib des radioaktiven Abfalls im Endlager zu ermöglichen.

Die Anforderungen können aus verschiedenen Blickwinkeln heraus abgeleitet werden. Diese sind abhängig vom zeitlichen Verlauf, dem Ort und der Funktion. Da noch keine Konstruktion des Endlagers oder des Behälters besteht, können die Funktionsorte nur grob angegeben werden. Sie werden aber in jedem Falle Teil des Endlagers sein. Als Funktionsorte werden in

diesem Bericht alle einflussnehmenden Komponenten des Endlagers bezeichnet. Diese sind das Wirtsgestein, der Versatz, der Behälter und das Inventar.
Zunächst werden die Anforderungen im Zeitlich-Funktionalen-Prozess betrachtet. Diese werden in Tab. 3 zusammengefasst. Der zeitliche Verlauf kann in Produktion, Transport, Beladung, Verschluss, Einlagerung mit Rückholbarkeitsoption und Nachbetrieb unterteilt werden. Diesen Punkten lassen sich Arten der Anforderungen nach den Kategorien von Ashby, Karana et al. und Hornbogen et al. (2013; Karana et al.) zuordnen. Diese Kategorien sind: mechanische, chemische, thermische, ökologische, ökonomische und technische Anforderungen

Die in Deutschland gültigen Zeiträume lassen sich aus der EndlSiAnfV, vom 06.10.2020 ableiten. Im internationalen Kontext werden andere zeitliche Vorgaben angewandt.

So konstatieren beispielsweise die schwedischen Regulatorien andere Bewertungszeiträume als die deutsche Gesetzgebung. Die SSM (Strål Säkerhets Myndigheten / Swedish Radiation Safety Authority) verlangt eine Sicherheitsanalyse für einen Zeitraum von wenigstens 10.000 Jahren (SSM 30.01.2009a, Sektion 10). Empfohlen wird zudem eine Betrachtung des nächsten kompletten glazialen Zyklus, welcher in den nächsten 100.000 Jahren erwartet wird. Generell wird unterscheiden zwischen der Betrachtung der ersten 1000 Jahre des Bewertungszeitraumes und des Zeitraumes der nach den ersten 1000 Jahren beginnt (SSM 30.01.2009b, Sektion 11-12). In Finnland ist festgeschrieben, dass die Betrachtung von Bewertungszeiträumen wenigstens mehrere Jahrtausende betragen soll, die über 1 Mio. Jahre hinausgehen als optional anzusehen ist. (STUK 2018) Für das amerikanische Endlager Yucca Mountain wurde zunächst ein Bewertungszeitraum von 10.000 Jahren angesetzt, dieser wurde 2001 auf bis zu 1 Mio. Jahre ausgeweitet. (Gitlin 2008) In der Schweiz wird von einem Bewertungszeitraum von 10.000 Jahren ausgegangen, dieser ist jedoch nicht gesetzlich festgelegt. Eine minimale Haltbarkeit des Behälters von 1000 Jahren wird von der ENSI vorgeschrieben (Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat). (Patel et al. 2012)

Nicht nur die Bewertungszeiträume sondern auch die Daten für die Auswahl eines Standortes und die Planung der Inbetriebnahme des Endlagers unterscheiden sich national stark untereinander (vgl Abb. 6). So wird in den Niederlanden beispielsweise eine Standortauswahl in 100 Jahren angestrebt. In der Schweiz wurde 2024 ein Standort für das Endlager ausgewählt. (Verhoef et al. 2020)

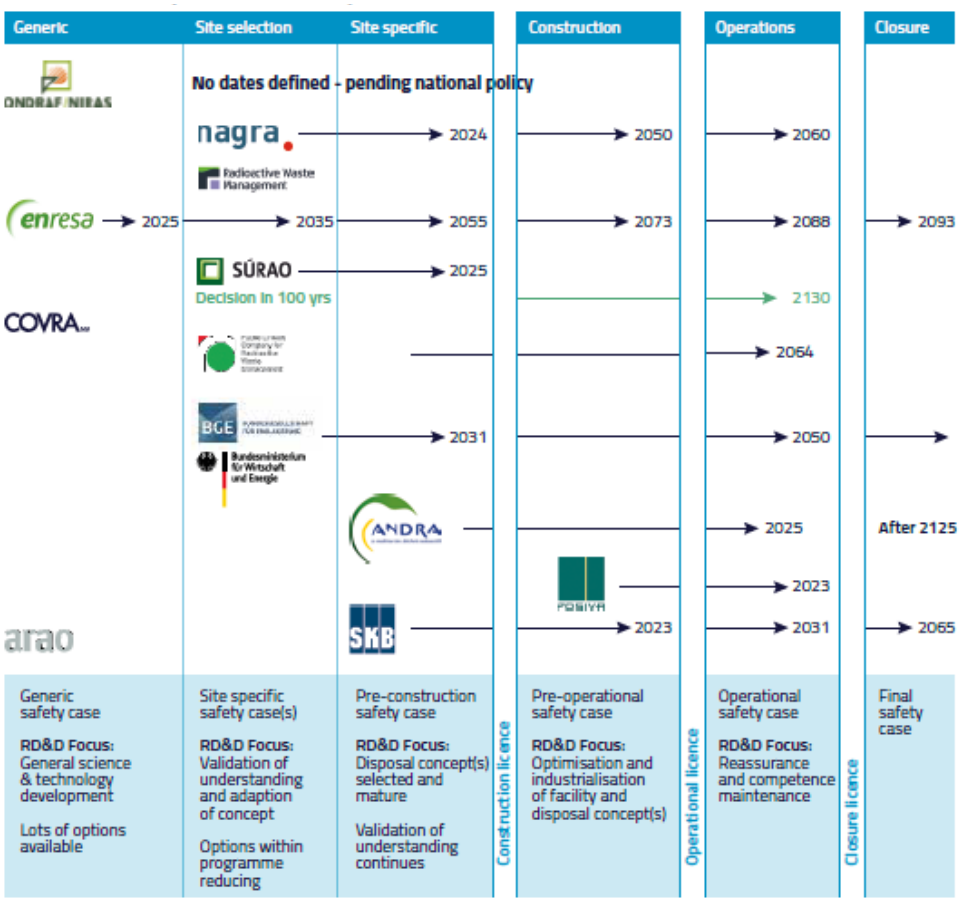


Abbildung 5 Überblick über die Zeitpläne der europäischen Endlagerprojekte (Verhoef et al. 2020)

Da sich die Bewertungszeiträume anderer Länder von denen in Deutschland unterscheiden, ist zu prüfen, in wie weit diese auf die Anforderungen der deutschen Gesetzgebung übertragen werden können.

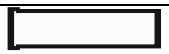
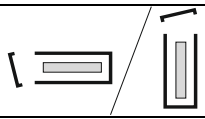
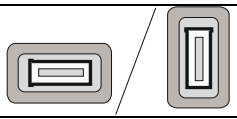
Beispielsweise ist der Designprozess im schwedischen Endlagerkonzept der SKB ebenfalls nach national und ortsspezifischen Anforderungen an die Funktion und die geforderten Eigenschaften des Behälters erfolgt. Dabei wurden die Integrität des Behältermaterials und seiner konstruktion sowie der Einfluss in seiner Barrierenwechselwirkung berücksichtigt. Nachgelagert sind dann operative Kriterien, wie die Produktionskapazitäten, das Handling, der Transport und die Rückholbarkeit betrachtet. Diese Betrachtungen äußern sich aber im Designprozess nur als geforderte Kriterien, ohne dass Optionen oder Realisierungsvorschläge für die Werkstoffauswahl (hier Kupfer als Korrosionsschutzbarriere) tiefergehend betrachtet werden. So wird z.B. hinsichtlich der Produktionskapazität lediglich gefordert, dass pro Jahr mindestesn 200 Behälter hergestellt werden können und dies als ein Serienprozess designed werden muss. Da das Material dabei als Kupfer schon ausgewählt war fand dabei kein allgemeiner Designprozess im Rahmen einer Bewertung der möglichen Werkstoffkandidaten statt. (Werme 1998)

Das ebenfalls gesetzlich vorgeschriebene Monitoring führt zu Anforderungen die eher der Konstruktion des Endlagers zugeordnet werden können. Das Endlager muss kontinuierlich überwacht werden, ab dem Beginn des Monitorings soll es in „zehnjährigen Abständen systematisch fortgeschrieben“ werden. (EndlSiAnfV, vom 06.10.2020)

Neben den Gesetzlich vorgeschriebenen Anforderungen können Anforderungen aus den Funktionsorten des Behälters abgeleitet werden. Ein Funktionsort bezeichnet hierbei beispielsweise die äußere Oberfläche des Behälters. Die Oberfläche des Behälters steht dabei

im Kontakt mit dem Versatz und ist den chemischen und physikalischen Einflüssen ausgesetzt, welche von außen an die Behälteroberfläche gelangen können. In Tab.5 ist eine Übersicht der abgeleiteten Anforderungen dargestellt.

Tabelle 5 Zeitlich-Funktionale Anforderungen

	Produktion	Transport des unbeladenen Behälters	Beladung + Verschluss	Einlagerung Rückholbarkeit und Bergbarkeit
				
Zeitraum	keine regulatorische Vorgabe für den Produktionsstart	nach der Produktion	keine regulatorischen Vorgaben	Bergbarkeit nach Verschluss des Endlagers 500 Jahre
Wo?	keine regulatorische Vorgabe für den Produktionsstandort	unbekannt, da Produktions- und Endlagerstandort unbekannt sind	am Endlagerort	Endlager in Wirtsgestein: Kristallingestein, Tongestein oder Salzgestein
Art der Anforderung				
mechanisch		- Behälter muss transportabel sein - Sicherheit bei Absturz (ESK 2013)		- Konstruktion muss den Drücken standhalten, Quellen von Versatz, Wirtsgestein, evtl. Gasdruck aus Korrosion
chemisch				Korrosion darf die Integrität des Behälters nicht beeinträchtigen z. B. Bei Wassereintritt -> Ionen - aus Korrosion entstehenden Gasdruck beschränken
thermisch				- in der thermischen Phase darf eine Temperatur von 100 °C an der Außenseite des Behälters nicht überschritten werden* - Der Behälter muss in der thermischen Phase die Wärme über das Behältermaterial ableiten können.
ökologisch	Energieverbrauch		Menschen und Natur müssen vor ionisierender Strahlung geschützt werden	
				- Wassereintritt in den Behälter und an die Behälteroberfläche muss verhindert/vermieden werden - Radiolytische Schädigung des Wirtsgesteins
ökonomisch	Materialkosten	wenn Infrastruktur gebaut werden muss: zusätzliche Kosten		-der Aufwand für die Rückholung sollte so klein wie möglich sein - die Bergbarkeit muss möglich sein die Mindestanforderungen nach § 14 EndlSiAnfV müssen eingehalten werden
technisch	Material verfügbar? Prozesse durchführbar?	Gewicht muss handhabbar sein -> Verladen - Gewichtsmaxima für Transportmittel beachten - Vorkehrungen für das Heben und Herablassen des Behälters müssen angebracht bzw. in den Behälter integriert werden	- Verschluss des Behälters -Sicherheit des Personals während der Beladung muss gewährleistet werden - Der Verschluss muss technisch durchführbar sein - Der Verschluss darf die Integrität des Behälters nicht beeinträchtigen	Sicherer Transport in das Endlager muss ohne übermäßigen Aufwand möglich sein -> Gewicht + Größe+ Integrität - Sicherer Transport aus dem Endlager muss ohne übermäßigen Aufwand möglich sein -> Gewicht + Größe+ Integrität - Monitoring muss eingerichtet werden

* siehe Diskussion um das 100 °C Kriterium im Abschnitt Wirtsgestein

3.1.2.5 Wirtsgestein:

In Deutschland gibt es für ein Tiefenlager von hochradioaktivem wärmeentwickelndem Abfall drei potentielle Wirtsgesteine. Dies sind Steinsalz, Tongestein und Kristallingestein. Die

Eigenschaften der Gesteine werden in Tabelle 4 dargestellt. Je nach Gesteinstyp muss der Endlagerbehälter verschiedene Aufgaben übernehmen.

Der einschlusswirksame Gebirgsbereich kann die Aufgabe der Abschirmung der ionisierenden Strahlung sicherstellen, dies ist aber nicht in allen drei Szenarien möglich. Da Steinsalz praktisch undurchlässig ist muss der Behälter die Funktion der Abschirmung der Strahlung nur solange erfüllen, bis das ewG wirksam wird. Ist das Endlager in Kristallingestein verortet, so muss der Endlagerbehälter gemeinsam mit der geotechnischen Barriere die Aufgabe des Nuklideinschlusses für die gesamte Zeit der 1 Mio. Jahre aufrechterhalten.

Aufgrund der noch nicht getroffenen Entscheidung für einen Gesteinstyp werden aus den Gesteinstypen Anforderungen für drei mögliche Szenarien abgeleitet.

Als im besonderen Maße relevant sollte die unterschiedliche Durchlässigkeit des Gesteins gewertet werden, da seine Aufgabe als geologische Barriere der sichere Einschluss des Behälters und des radioaktiven Materials ist.

Tabelle 6 Endlagerrelevante Eigenschaften potenzieller Wirtsgesteine (Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe 2007)

Eigenschaft	Steinsalz	Ton/Tonstein	Kristallingestein (z.B. Granit)
Temperaturleitfähigkeit	hoch	gering	mittel
Durchlässigkeit	praktisch undurchlässig	sehr niedrig bis gering	sehr gering (ungeklüftet) bis durchlässig (geklüftet)
Festigkeit	mittel	gering bis mittel	hoch
Verformungsverhalten	viskos(kriechen)	plastisch bis spröde	spröde
Hohlraumstabilität	Eigenstabilität	Ausbau nötig	hoch (ungeklüftet) bis gering (stark geklüftet)
In-situ-Spannungen	lithostatisch isotrop	anisotrop	anisotrop
Lösungsverhalten	hoch	sehr gering	sehr gering
Sorbtionsverhalten	sehr gering	sehr hoch	mittel bis hoch
Temperaturbeständigkeit	hoch	gering	hoch

Tabelle 7 (Köhler et al. 2019) Ergänzung zu Tabelle 5

mögliche Wärmeleistung der Behälter	hoch etwa 3000 W	mittel etwa 1800 W	niedrig etwa 1000 W
erhöhte Anforderungen an Integrität der Behälter	Rückholungszeitraum 500 Jahre	Rückholungszeitraum 500 Jahre	gesamte Lagerdauer > 1.000.000 Jahre

Tabelle 8 Anforderungen abgeleitet aus den Gesteinstypen

	Steinsalz	Ton	Kristallin
Durchlässigkeit	Der Behälter muss nach dem Ende der Periode in der eine Bergbarkeit möglich sein muss die Abschirmungs- und Rückhaltefunktion nicht mehr übernehmen, da diese durch das Wirtsgestein übernommen wird	Der Behälter muss nach dem Ende der Periode in der eine Bergbarkeit möglich sein muss die Abschirmungs- und Rückhaltefunktion nicht mehr zwingend übernehmen, da diese durch das Wirtsgestein übernommen wird	Da Kristallingestein durchlässig sein kann muss der Behälter die Abschirmungs- und Rückhaltefunktion für 1.000.000 Jahre erfüllen es sei denn das Wirtsgestein kann ausgewiesen werden, dann gilt dasselbe wie für Steinsalz und Ton
Sorptions-verhalten	Im Falle von Wasserzutritt muss der Behälter eine erhöhte Korrosionsbeständigkeit aufweisen.	Im Falle von Wasserzutritt muss der Behälter eine erhöhte Korrosionsbeständigkeit aufweisen.	Im Falle von Wasserzutritt muss der Behälter eine erhöhte Korrosionsbeständigkeit aufweisen.

Die IAEA unterteilt die Lagerorte nach ihrer Tiefe und der Einstufung der Abfälle (Abb. 7). Da hier nach einem Material für den Endlagerbehälter für HLW gesucht wird kommen also nur tiefe Minen und sehr tiefe Bohrlöcher als Lagertiefe in Frage.

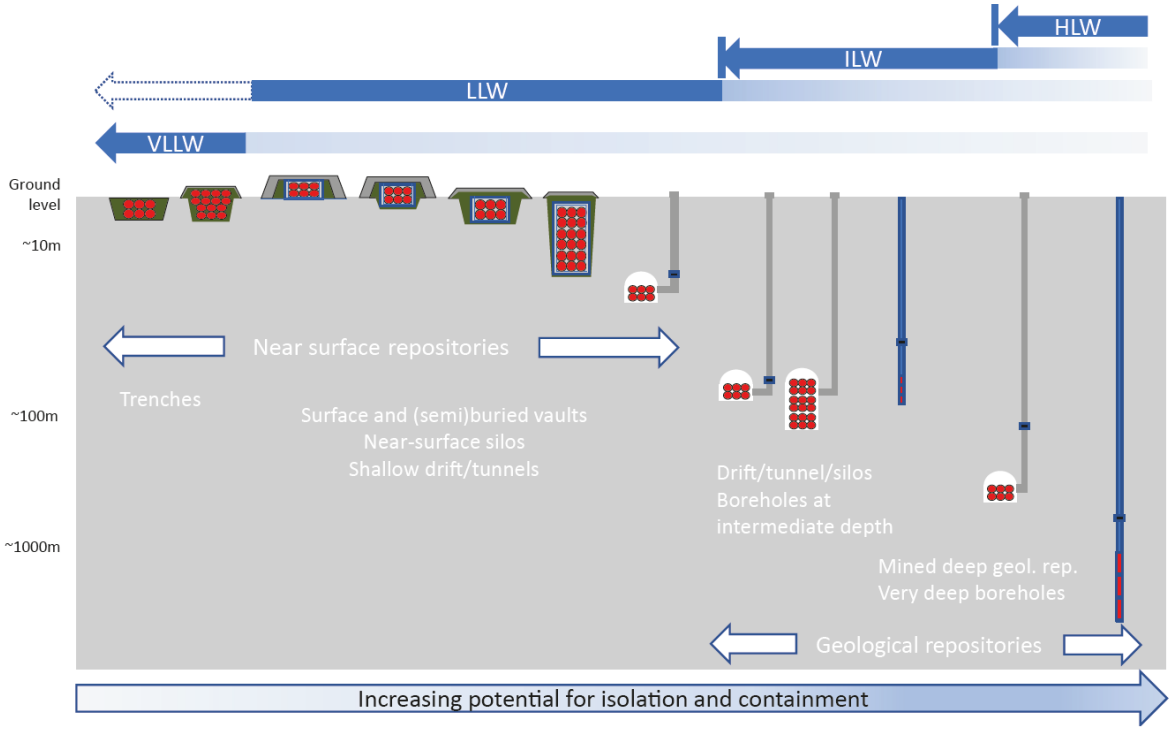


Abbildung 6 Klassifizierung der Abfälle und notwendige Tiefe der Lager (IAEA 2020)

„Die Oberfläche eines einschlusswirksamen Gebirgsbereichs muss mindestens 300 Meter unter der Geländeoberfläche liegen.“ (StandAG, vom 05.05.2017, §23 (5))

Die Tiefe des Endlagers hat einen Einfluss auf die Last die der Endlagerbehälter bzw. die Endlagerkonstruktion tragen muss. Die zu tragende Last kommt nicht nur durch das über dem Endlager befindlichen Gestein, sondern auch durch potentiell stattfindende Eiszeiten zustande. Durch Verschiebungen des Gesteins können zudem Kräfte aus anderen Winkeln auf den Behälter einwirken.

Daraus ableiten lässt sich die Anforderung einer **scherfesten Konstruktion**. Damit das Inventar auch im Falle der Verformung des Behälters eingeschlossen bleibt und nicht in die Umwelt gelangen kann sollte der Werkstoff eine entsprechend hohe Streckgrenze aufweisen.

Neben den mechanischen Eigenschaften des Gesteins müssen auch die Auswirkungen von Temperaturveränderungen auf das Wirtsgestein betrachtet werden. So korreliert die Temperatur im Salzgestein mit der Plastizität. Eine höhere Temperatur führt damit zu einer schnelleren Umschließung des Endlagerbehälters. (Mengel et al. 2012)

Die zulässige Temperatur an der Behälteroberfläche ist durch das StandAG vorgegeben.

Im StandAG, vom 05.05.2017 ist spezifiziert, dass „ solange die maximalen physikalisch möglichen Temperaturen in den jeweiligen Wirtsgesteinen aufgrund ausstehender Forschungsarbeiten noch nicht festgelegt worden sind, wird aus Vorsorgegründen von einer Grenztemperatur von **100 Grad Celsius an der Außenfläche der Behälter** ausgegangen“.

Zur Temperatur von maximal 100°C an der Behälteroberfläche hat die Entsorgungskomission eine Stellungnahme veröffentlicht in der sie die Auswirkungen dieser Festlegung erörtert.

Diese Regelung wird auch als 100 °C Kriterium bezeichnet. Darin kommt sie zu dem Schluss, dass eine wirtsgesteinunabhängige Festlegung der „Grenztemperatur“ nicht durch das Vorsorgeprinzip gerechtfertigt ist. Bezüglich der Stabilität der Verglasten Abfälle ist ein Zusammenhang zwischen Temperatur, Korrosionsraten von Glas und der Präsenz von Behälterkorrosionsprodukten nicht bekannt. Daraus ist demnach keine Grenztemperatur ableitbar. Sollte ein Behälter in der thermischen Phase undicht werden, dann können Radionuklide durch Korrosion freigesetzt werden. Die Mobilität der Radionuklide kann sich mit steigender Temperatur erhöhen, es wird aber davon ausgegangen, dass ein Versagen der Dichtigkeit der Behälter in der thermischen Phase unwahrscheinlich ist. (ESK 2022, S. 9)

Damit schlussfolgert die Entsorgungskomission eine Bestimmung einer Grenztemperatur sei aus Vorsorgegründen ist nicht wissenschaftlich begründbar, da höhere bzw. tiefere Temperaturen standortspezifisch Vor- und Nachteile mit sich bringen würden. Durch die Einschränkung auf eine Temperatur von 100°C würde die Standortsuche und Auslegung so eingeschränkt, dass eventuell potenzielle Standorte ausgeschlossen werden würden, obwohl dieser Ausschluss wissenschaftlich nicht begründbar sei.

ESK (2017) und Bollingfehr et al. (2011) empfehlen bei einer Einlagerung in Salz die Kontakttemperatur auf 200 ° C zu erhöhen. Eine höhere Temperatur sei nicht zu empfehlen, da ab 230 °C geringe Mengen Kristallwasser aus dem Salz austreten könnten, welches zu Korrosion führen kann.

In Schweden die Temperatur durch die SKB auf 100°C für den Bereich zwischen Behälter und Bentonit im Kristallingestein limitiert. (Svensk Kärnbränslehantering AB)

Nicht nur die Physikalischen Gegebenheiten des Wirtsgesteins haben einen Einfluss, sondern auch seine chemische Zusammensetzung.

Alle im Wasser gelösten Stoffe können anhand des TDS-Wertes (Total Dissolved Solids) quantifiziert werden. Dieser Wert kann durch das ausfiltern suspendierter Partikel und das anschießende verdampfen des Wassers gravimetrisch ermittelt werden. Sind hauptsächlich anorganische Substanzen im Wasser enthalten, so kann auch eine Leitfähigkeitsmessung zur Ermittlung herangezogen werden. Angegeben wird der TDS-Wert in g/L. (Environmental Protection Agency 1999)

Je nach Grundwasservorkommen und Wirtsgestein können bei einem Wassereintritt verschiedene Ionen an die Oberfläche des Behälters gelangen, diese können zu einem veränderten pH-Wert, dem Wachstum von Mikroben und demnach zu biologisch oder chemisch verursachter Korrosion und Gasbildung führen. Dadurch kann die Integrität des Behälters gefährdet werden. Die biologisch verursachte Korrosion spielt besonders nach der thermischen Phase eine Rolle, da viele Organismen erst bei Temperaturen unter 100°C lebensfähig sind. Sollte Frischwasser z.B. durch die Klüftung in Kristallingestein an die Behälteroberfläche gelangen, so nimmt es auf dem Weg in tiefere Gesteinslagen Salze auf. Dieses Porenwasser verbleibt dann über lange Zeiträume an einem Ort, es kommt in einer größeren Menge vor als das mobile Wasser. Salzhaltiges Grundwasser ist relativ immobil und steht oft schon mehrere tausend Jahre. In größerer Tiefe kommen hauptsächlich Natrium-Kalzium und Chloridionen vor, in Laxemar beträgt die Salinität in Bohrlöchern mit einer Tiefe von mehr als einem km Beispielsweise 80 g/L (1,5km Tiefe). (Neretnieks 2024) In Finnland hat Posiva Oy Grenzwerte für den TDS Wert gesetzt. Der TDS soll zwischen 0,3 und 0,7 g/L betragen. (Vu 2022)

Pyrit (FeS_2) und andere schwefelhaltige Verbindungen können sowohl im Wirtsgestein, als auch als Verunreinigung in z.B. Tongestein welches als Versatz genutzt wird vorkommen.

Oxidieren diese Verbindungen, so entstehen Säuren und oxidierte Schwefelverbindungen z.B. Thiosulfat, welche das Behältermaterial angreifen können. Grundwasser enthält häufig Sulfate, diese können von Bakterien zu Sulfiden reduziert werden und dann wiederum zu Sulfaten und Säuren oxidieren. (King 2020, S. 4)

Für die Untersuchung der chemischen Auswirkungen auf den Endlagerbehälter können Referenzelektrolyte verwendet werden, die den zu erwartenden Bedingungen im Endlager bzw. den im Extremfall zu erwartenden Bedingungen entsprechen, mit denen ein Korrosionsprozess simuliert werden kann. Die Zusammensetzung von Grund und Porenwasser kann sich von Standort zu Standort und selbst der Tiefe im Gestein stark unterscheiden, dies zeigen auch die Untersuchungen von Neretnieks (2024) und Singh et al. (2000)

3.1.2.6 Versatz:

Der Versatz steht im direkten Kontakt zur Außenwand des Behälters, es werden beispielsweise Bentonit oder Salzgrus vorgeschlagen, welche um den Behälter herum verpresst werden. Salzgrus soll im Falle einer Einlagerung in Steinsalz zum Einsatz kommen. Das Salzgrus ist ein feinkörniges Salzgesteinsmetarial, es enthält relativ viele Hohlräume und soll durch den Gesteinsdruck langsam zu Salzgestein verfestigt werden, sodass der Endlagerbehälter vollkommen vom Salzgestein eingeschlossen wird. (BASE 2024) In der Schachtanlage Asse wurden Kammern, in welche keine radioaktiven Abfälle eingelagert wurden mit Salzgrus verfüllt, es haben sich an den Firsten der Kammern Hohlräume gebildet die nochmals mit Salzbeton neu verfüllt werden sollen. (Bonka und Narrog 2012)

Der Einfluss des Salzgruses ist also mit dem Einfluss des Salzgesteins auf die Behälteroberfläche vergleichbar. Anforderungen die sich daraus ableiten gleichen also denen, die sich aus der Einlagerung in Salzgestein ergeben.

In vielen Endlagerkonzepten soll der Hohlraum um den Endlagerbehälter im Tiefenlager mit Bentonit als Versatz verfüllt werden. Bentonit ist ein Tongestein welches den Behälter in der thermischen Phase vor dem Zutritt von Wasser an die Behälteroberfläche schützen soll und somit eine technische Barriere darstellt. In anderen Konzepten soll anstelle von Bentonit eine Betonschicht aufgebracht oder als konstruktiver Werkstoff für die Endlagerstruktur verwendet werden. Das Bentonit bzw. der Beton stehen in diesem Fall im direkten Kontakt mit dem Endlagerbehälter und haben somit die Möglichkeit chemisch mit diesem zu interagieren.

Bentonit wird in Konzepten aus Schweden, Finnland, der Schweiz, Kanada, Frankreich und Deutschland erwogen. Dabei wurden unterschiedliche Einflüsse auf und durch das Bentonit untersucht. In Schweden wurde für das KBS 3 Konzept beispielsweise ein fünfjähriges Experiment durchgeführt, welches 5 Bentonite auf thermisch induzierte Veränderungen untersuchte (Sudheer Kumar et al. 2021). Choi et al. (2022) untersuchten ob die Stärke des im ursprünglichen KBS 3 Projekt geplanten Bentonitbuffers reduziert werden könnte um im Falle einer Rückholung leichter an den Behälter heranzukommen, und kamen dabei zu dem Schluss, dass dies möglich sei. Auch in Finnland wurden chemische und thermische Eigenschaften von Bentonit untersucht. (Silenius 2024).

Bentonit kann als Block zusammengepresst werden oder schichtweise ausgebracht bzw. in Zwischenräume eingeblasen werden (vgl. shotcrete). Diese Schichten müssen dann jeweils verdichtet werden, dies kann z.B mittels einer Walze erfolgen. (Pusch 2002, 2001)

Die Verwendung von Bentonitblöcken wird z.B. in Frankreich erwochen, wenn auch nicht als Vaersatz, aber zur Versiegelung der Einlagerungskammern. (Armand et al. 2023)

In Konzepten in Deutschland wird Bentonit sowohl in Form von Blöcken als auch als loser Versatz erwähnt. In Ton- und Kristallingestein kommen Bentonitblöcke für die Versiegelung der Bohrlöcher in Frage. (Simo et al. 2024)

In der Schweiz sollen die Behälter auf einem Bentonitblock liegend gelagert werden. Der verbleibende Hohlraum um den Behälter herum wird mit Bentonitpellets verfüllt (vgl. Abb 8). (Seiphoori 2015)

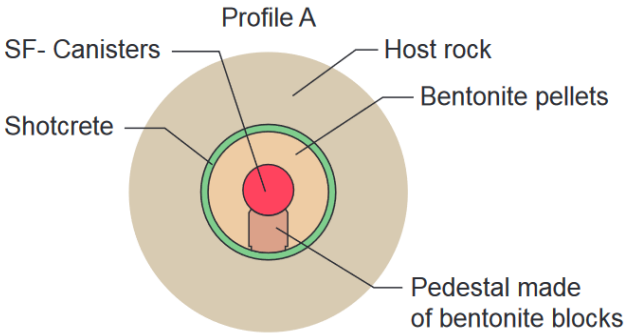


Abbildung 7 Querschnitt Bentonitversatz Schweizer Konzept (Seiphoori 2015)

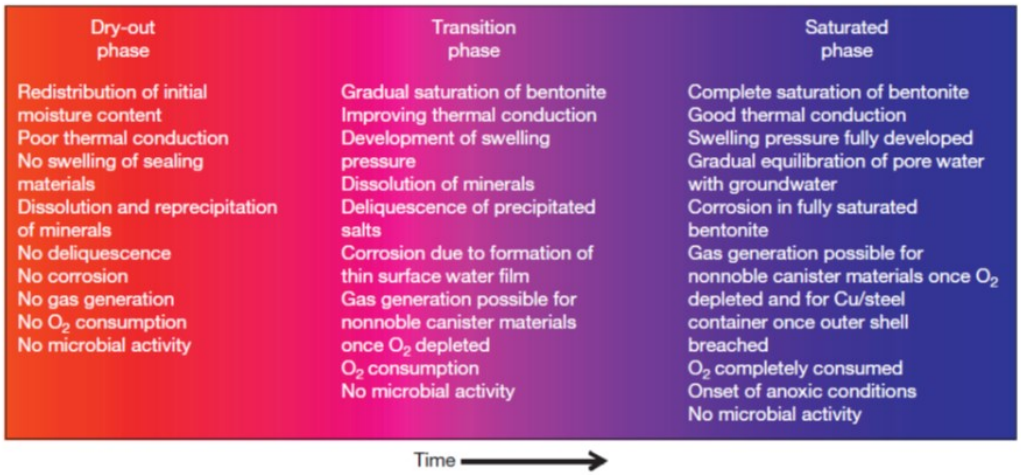


Abbildung 8 (King 2012) Ablauf der thermischen Phase Bentonit

Durch das Quellen des Bentonits steigt der Druck auf den Endlagerbehälter, dieser muss dem Druck standhalten können.

King (2012) beschreibt den Verlauf und die Auswirkungen eines Bentonit Versatzes auf den Endlagerbehälter von der thermischen Phase bis zum gesättigten Bentonit(vgl. Abb 9). Während der thermischen Phase soll Korrosion nicht auftreten, in der Zwischenphase nur bei unedlen Metallen und in der gesättigten Phase bei allen Metallen.

Fraglich ist warum in allen drei Phasen davon ausgegangen wird, dass es nicht zu mikrobiellen Aktivitäten kommt. In der thermischen Phase wäre dies durch die Temperatur von bis zu 100 °C zu erklären, für die Übergangsphase fehlt eine Erklärung und in der gesättigten Phase könnte die Abwesenheit von Sauerstoff als Grund angenommen werden. Dabei ist zu beachten, dass auch unter anaeroben Bedingungen mikrobielle Veränderungen stattfinden können, die die chemische Umgebung des Behälters verändern und zu Korrosion führen könnten. Auch die in Abb. 9 erwähnte Gasbildung kann zu Schäden am Behälter führen z.B. durch die Diffusion von Wasserstoff in den Behälterwerkstoff. Daraus lässt sich folgern, dass Korrosion trotz Bentonitversatz auch vor Eintritt der gesättigten Phase eintreten kann. Das

Bentonit ist gesättigt, wenn es den maximal möglichen Anteil Wasser aufgenommen hat. Durch die Wasseraufnahme vergrößert sich das Volumen des Bentonits, damit steigt der Druck auf Behälter und das umliegende Gestein.

Im Bentonit enthaltenes Calcit puffert das Porenwasser auf einen pH-Wert von 8 ab. Im Fall einer Verfüllung aus Beton verändert sich der pH-Wert von etwa 13 zu pH 12 bis er sich schließlich mit dem pH des Grundwassers egalisiert Je nach Gesteinstyp bzw. Versatzmaterial welche für das Endlager gewählt werden unterscheiden sich die Mengen an vorhandenen Sulfid Ionen. Die Sulfid Ionen können mit atmosphärischem Sauerstoff reagieren und produzieren dadurch unter anderem Thiosulfat welches wiederum mit den Behältermaterialien reagieren kann. (King 2020, S. 4)

In Norwegen soll ein Endlager in einem deep-borehole (ca. 3500 m) in Kristallingestein entstehen. Der Kanister soll von Bentonit als Versatz umgeben werden, danach folgt eine Versiegelung und der Rest des Loches soll mit Schotter verfüllt werden. Die Behälter werden im Norwegischen Konzept nicht als Barriere genutzt sondern dienen nur der Sicherheit während Transport und Einlagerungsprozess (Marcos et al. 2022) Auch in Frankreich wurde im Untertagelabor HADES eine Versiegelung mittels Bentonit in Tongestein untersucht, hier wird das Bentonit jedoch nicht als Versatz sondern als Versiegelung der Strecke angewendet. Es besteht also kein direkter Kontakt zwischen Behälteroberfläche und Bentonit. (Armand et al. 2023)

Durch den Zutritt von Wasser bzw. durch die Migration von Porenwasser im Gestein oder Versatz können Kohlensäuren, Chloride, Sulfate und Sulfide die im Wasser enthalten sind an die Oberfläche des Endlagerbehälters transportiert werden und den Werkstoff des Endlagerbehälters angreifen. Porenwasser migriert aufgrund unterschiedlicher Einflüsse. Gesteinsverschiebungen können zu Druckveränderungen im Gestein führen welche einen hydraulischen Gradienten hervorrufen, dieser wird durch die Bewegung des Porenwassers wieder ausgeglichen. Ebenso können Im Porenwasser gelöste Ionen Konzentrationsunterschiede aufweisen, um dieser zu egalisieren diffundieren sie und tragen zur Migration des Porenwassers bei. Poröse Gesteine können durch Kapillarwirkung Porenwasser aufnehmen und verteilen. (Hölting und Coldewey 2013)

Aus den Eigenschaften des Versatzes lässt sich demnach ableiten, dass der Behälterwerkstoff resistent gegenüber den korrosiven Spezies, welche im Versatz enthalten sind oder durch ihn transportiert werden können, resistent sein müssen.

Welchen Substanzen gegenüber der Behälterwerkstoff eine **Korrosionsresistenz** aufzeigen soll ist abhängig von Versatz, umgebendem Grundwasser und Gestein, Temperatur und mikrobieller Aktivität.

Im Falle eines Bentonitversatzes ist zudem die **Druckfestigkeit** des Behälters relevant.

3.1.2.7 Behälter

Um die Schutzfunktion des Behälters zu definieren muss die Aufgabe des Behälters im Endlagersystem definiert werden. Während der Einlagerungsphase muss er alleine ausreichenden Schutz vor ionisierender Strahlung bieten. In späteren Phasen der Einlagerung kann aber muss diese Funktion nicht bis zum Ende der Einlagerung aufrechterhalten werden. Dies hängt im Wesentlichen vom Endlagerstandort und dem dort vorhandenen Gestein ab. Die Abschirmung der Ionisierenden Strahlung beinhaltet die Abschirmung von Gamma- und Neutronenstrahlung. Der Behälter muss eine ausreichende Abschirmung gewährleisten um Betriebspersonal und Bevölkerung zu schützen. (BGE 2021)

Zudem sollte der Behälter das Inventar vor der Überkritikalität schützen, diese kann auftreten, wenn der Behälter überhitzt und im Behälter eine kritische Masse an Nukliden selbstständige Kettenreaktionen ausbildet. Eine Abführung der Wärme in der thermischen Phase ist dementsprechend notwendig. Die Temperatur an der Außenfläche des Behälters muss auf 100 °C begrenzt werden. (EndlSiAnfV, vom 06.10.2020)

Der Behälter muss Integrität und Stabilität über den Einlagerungszeitraum erhalten und das Inventar sicher einschließen. Um dies zu erreichen muss der Behälter dicht verschlossen sein und seine Eigenschaften dürfen nicht durch äußere oder innere Umstände so beeinträchtigt werden, dass der Behälter seine Schutzfunktion nicht mehr aufrechterhalten kann. Diese Umstände werden durch das Inventar bzw. durch das einschlusswirksame Gebirge und den Versatz definiert. Der stoffschlüssige Einschluss des Inventars muss dabei sichergestellt werden. (BGE 2021)

Um seine Integrität zu bewahren muss der Behälter robust sein. Diese Robustheit hat einen Einfluss auf die nötigen mechanischen Kennwerte des Behälters. Es soll sichergestellt werden, dass der Behälter dem Druck des einschlusswirksamen Gebirges sowie potentiellen Stürzen während der Einlagerung standhält.

Der Behälter muss fertigbar sein. Und in qualitätsgesicherter und ausreichender Anzahl hergestellt werden können. (BGE 2021) Stehen keine Verfahren zur Fertigung des Behälters aus dem gewählten Werkstoff zu Verfügung, so ist es nicht möglich diesen herzustellen und zu verwenden.

Der Behälter muss so konstruiert werden, dass die verschiedenen Arten des Inventars von ihm aufgenommen werden können. Eine Eindeutige Kennzeichnung des Behälters muss wenigstens 500 Jahre erkennbar sein. Zudem sollte der Behälter selbst keine negativen Auswirkungen auf die anderen Barrieren des Systems haben und einen Beitrag zur Integrität des gesamten Endlagers leisten. (BGE 2021)

3.1.2.8 Inventar

In der thermischen Phase entwickelt das Inventar Wärme, diese muss über das Behältermaterial und den Versatz in das Wirtsgestein abgeleitet werden (Advektion). Dabei darf die Temperatur an der Außenwand des Behälters nach gesetzlicher Vorgabe eine Temperatur von 100 °C nicht überschreiten. Dieses Temperaturlimit kann je nach Wirtsgestein entweder höher oder tiefer ausgelegt werden (vgl. S. 15). Damit dieses Temperaturlimit nicht überschritten wird sollte das Inventar zum Zeitpunkt der Einlagerung eine dementsprechend geringe Wärmeleistung aufweisen.

Zu verhindern ist die Überkritikalität des Inventars. Dies geschieht durch die Beachtung der Einhaltung von Masse- und Konzentrationsbeschränkungen der eingelagerten Abfallstoffe. Andere Veränderungen an den Gebinden wie die Strahlungsmenge, Temperatur und Gasentwicklung sind nicht auszuschließen. Daher müssen druckentlastende Maßnahmen eingerichtet werden sofern keine Anforderungen an die Dichtheit der Behälter bestehen. (ESK 2013)

Der Behälter muss von seiner Größe so ausgelegt sein, dass er das Inventar aufnehmen kann. Da nicht alles SNF und alle anderen HAW dieselbe Größe aufweisen ist es eventuell von Vorteil Behälter mit verschiedenen Maßen herstellen zu können. Alternativ kann die Größe an den größten Einzelteilen bzw. auch an den Gegebenheiten des Endlagers orientiert werden. Bei der Beladung muss auch die verbleibende Radioaktivität, die Integrität und die Temperatur der Abfälle beachtet werden. Zudem muss das Lager die Behälter von ihrer Größe, und ihrer Anzahl aufnehmen können.

In Deutschland ist die rechtliche Bewertung der radioaktiven Abfälle hauptsächlich abhängig von dessen Aktivität, die Vorgaben finden sich im AtG, vom 15.07.1985 (BGBl. I S. 1565) und der Strahlenschutzverordnung. (StrlSchV) Generell werden in Deutschland Radioaktive Abfälle eingeteilt in wärmeerzeugende Abfälle und solche, deren Wärmeaktivität zu vernachlässigen ist, sowie Abfälle deren Gefährdungspotential so gering sind, dass sie auf einer konventionellen Deponie entsorgt werden dürfen. (BMU 2021, S. 57)

Um die Bevölkerung erfolgreich vor der ionisierenden Strahlung zu schützen wurde in der EndlSiAnfV, vom 06.10.2020 festgelegt, dass die zusätzliche Strahlungsmenge der eine Person durch ein Endlager ausgesetzt ist pro Jahr 10 Mikrosievert nicht überschreiten darf. Insgesamt darf die Strahlungsmenge pro Jahr 100 Mikrosievert nicht überschreiten.

Der Abbrand der Brennelemente wird für die Brennelemente, die bis zum Jahr 1998 aus den Reaktoren entnommen wurden mit 40 GWd/Mg SM angenommen. Zwischen 1999 und 2006 wird mit einem Abbrand von 45GWd/Mg SM gerechnet, ab 2007 50 GWd/Mg SM. Zudem wird eine Lagerungsdauer von wenigstens einem Jahr angenommen. Die Aktivität des kompletten Inventars beträgt nach Berechnungen insgesamt ca. 2.6 x 10^20 Bq. SNF wird zunächst meist vor Ort im Kernkraftwerk nass gelagert, bis die Wärmeentwicklung ausreichend gering ist für die Trockenlagerung. Die Integrität der Brennstäbe muss während der Trockenlagerung bis zur Endlagerung sichergestellt werden. Zunächst wurde von einer Zwischenlagerung in einem Zeitrahmen von 20-50 Jahren ausgegangen, da sich die Entwicklung und der Bau von Endlagern in fast allen Ländern verzögert, könnte sich die Zeitspanne auf 100 oder sogar mehr Jahre erhöhen. Kritisch ist dabei zu betrachten, dass die Veränderungen zwischen Hüllrohren und Brennstoff noch nicht vollständig bekannt bzw. erforscht sind. Es ist also unklar, wie genau sich die Integrität der Brennstäbe über diesen Zeitraum hinaus verhält. (vgl.Konarski et al. 2021)

Die Kühlrate liegt bei einem PWR bei 2,67 °C/Jahr und bei einem SMR bei 2,26 °C/Jahr in der Trockenlagerung. (Woo und Lee 2022)

Liegt die Temperaturgrenze wie vom Stand AG Vorgeschrieben bei 100°C und diese Temperatur soll vor der Einlagerung erreicht werden, so ist diese Temperatur bei einer Kühlrate von 2,67 °C/Jahr erst nach 115 Jahren erreicht, wenn das Temperaturlimit von 400°C vor der Trockenlagerung eingehalten wird.

Da die Suche nach einem Endlagerstandort nach der Analyse des Öko-Institutes im Auftrag des BASE noch bis voraussichtlich 2072 oder 2075 andauern soll (Krohn et al. 2024) und die Endlagerbehälter bis dahin oberirdisch und trocken eingelagert werden, kann davon ausgegangen werden, dass bis zum Bau des Endlagers eine Temperatur von annähernd 100 °C erreicht wird.

Aus den Eigenschaften des Inventars lässt sich damit für den Endlagerbehälterwerkstoff ableiten, dass die **Wärmeleitfähigkeit** hoch genug sein muss um eine Überhitzung des ELB in der thermischen Phase zu verhindern.

3.1.3 Übersetzung der Bedingungen in Parameter die einen Vergleich der Materialkennwerte ermöglichen

Da die im vorherigen Abschnitt erarbeiteten Anforderungen meist nur in groben Beschreibungen resultierten und diese nicht zu einem tatsächlichen Vergleich herangezogen werden können sollen im Folgenden als spezifischere Anforderungen bzw. Funktionen des Behältermaterials und der Fertigung und deren Kennwerte beschrieben werden.

Da für die Bewertung von Endlagerbehältermaterialien Messgrößen benötigt werden, welche für einen Vergleich herangezogen werden können soll in Tabelle 7 verdeutlicht werden wie die Anforderungen in Kennwerte übersetzt werden können. Im nachfolgenden Text werden diese definiert.

Tabelle 9 Übersetzung der Anforderungen in vergleichbare Kennwerte für die Werkstoffauswahl

Art	Funktion	Kennwertvergleich
chemisch	Beständigkeit	Flächenkorrosionsrate
ökologisch /physikalisch	Schutz vor ionisierender Strahlung /Abschirmung	Dichte
mechanisch	Mechanische Stabilität	Druckfestigkeit
thermisch	Wärmeabfuhr zur Sicherung der Unterkritikalität	Wärmeleitfähigkeit

Tabelle 10 Übersetzung der Anforderungen an die Umsetzung und Herstellbarkeit des Endlagerbehälters

Art	Funktion
technisch	Dichtigkeit /Verschluss /Stoffschluss → Schweißeignung
technisch	Herstellbarkeit
ökonomisch	Verfügbarkeit

3.1.3.1 Korrosion:

Korrosion ist laut DIN EN ISO 8044:2020-08 die „physikochemische Wechselwirkung zwischen einem metallenen Werkstoff und seiner Umgebung, die zu eine Veränderung der Eigenschaften des Metalls führt und die zu erheblichen Beeinträchtigungen der Funktion des Metalls, der Umgebung oder des technischen Systems, von dem diese einen Teil bilden, führen kann.“ (DIN EN ISO 8044) Da sich Korrosion somit nur auf metallische Werkstoffe beschränkt können auch nur diese diesbezüglich beschrieben werden. Andere Werkstoffe können auch durch ihre Umgebung physikochemisch beeinflusst werden und ihre Eigenschaften verändert bzw. verschlechtert werden.
Die Korrosion kann durch Wasser, mikrobielle Aktivitäten oder im Grundwasser vorhandene Ionen verursacht werden. Sie bezieht sich Hauptsächlich auf die Außenfläche des Endlagerbehälters. Von der Innenseite des Behälters kann Korrosion durch unvollständig getrocknetes Inventar, also durch die Anwesenheit von Wasser verursacht werden.

Werkstoffe können eine unterschiedliche Korrosionsbeständigkeit gegenüber unterschiedlichen korrosiven Medien haben. Die Korrosionsrate ist zudem von weiteren Parametern wie Temperatur, Zeit und Konzentration des korrosiven Stoffes abhängig.

Abhängig vom Korrosionsmechanismus ist die Art des Abtrages durch die Korrosion unterschiedlich. Für die möglichen Korrosionsschäden an Endlagerbehältern sollten insbesondere die Flächen-, Mulden-, Lochfraß- und Spannungsrisskorrosion betrachtet werden.

Die Flächenkorrosion wird auch als uniforme Korrosion bezeichnet. Die Korrosionsreaktion findet dabei gleichmäßig über die Werkstoffoberfläche verteilt statt. Der ersten Theorie nach bildet sich zunächst ein passiver Film auf der Oberfläche, hierbei handelt es sich um das Oxid des Metalls, solange dieser Film intakt ist und nicht durch beispielsweise Halogene oder mechanische Belastung durchbrochen wird schützt er das Metall vor weiterer Korrosion. Der zweiten Theorie zufolge wird Sauerstoff an der Oberfläche chemiesorbiert und reagiert erst dann mit dem Metall um ein Oxid zu formen. (Schweitzer 2009) Da diese Form der Korrosion gleichmäßig abläuft lassen sich anhand bekannter Flächenkorrosionsraten die notwendigen

Wanddicken für einen Endlagerbehälter berechnen. Die Flächenkorrosion geht häufig in eine flächen- und muldenförmige Korrosion über. (Pohl und Forchhammer 2014)

Muldenkorrosion wird durch Imperfektionen in der oberen Korrosionsschicht hervorgerufen, es bilden sich unter diesen Fehlstellen Anoden welche eine lokale Muldenförmige Korrosion hervorrufen, welche sich weniger in die Tiefe, als in die Breite ausbildet. Diese Art der Korrosion ist besonders für schlecht passivierende Metalle typisch. Die Passivierungsschichten bilden sich durch die Korrosion neu, da der Werkstoff jedoch schlecht passiviert bildet sich die Schicht ungleichmäßig aus und es entstehen neue Anoden. (Pohl und Forchhammer 2014)

Lochfraßkorrosion betrifft hingegen gut passivierende Metalle wie z.B. Kupferlegierungen, Aluminium, Titan und Chromnickelstähle. Die Korrosion tritt lokal auf und bildet tiefe Löcher mit einem Durchmesser von bis zu 2 mm. Der Materialverlust ist gering kann aber in kurzer Zeit zu Schäden an Anlagen führen, die diese außer Betrieb setzen. Verursacht wird sie meist durch Halogenide wie z.B. Chlorid in Anwesenheit von Oxidationsmitteln. Die Lochkorrosion beginnt meist an einer Werkstoffinhomogenität beispielsweise einer Ausscheidung. Sie kann aber auch durch mechanische Schäden an der Passivschicht durch Beispielsweise ein Sandkorn hervorgerufen werden. Wie bei der Muldenkorrosion bildet sich eine Anode an der angegriffenen Stelle. Der intakte Werkstoff agiert weiterhin als Kathode. Das so zustande kommende Potentialgefälle führt zu einer weiteren Korrosion. Da der Werkstoff gut passiviert bildet sich die Korrosion nicht in der Fläche aus, sondern setzt sich in die Tiefe fort. Die Halogenidionen dringen in das entstehende Loch ein. Es sind dort nicht genügend Sauerstoffatome vorhanden, welche eine weitere Passivierung ermöglichen würden. Dadurch kann sich die Passivschicht nicht neu bilden und das Loch wird tiefer. (Pohl und Forchhammer 2014; Fraenkel 1998) Diese Art der Korrosion stellt eine Gefahr für den Endlagerbehälter dar, wenn besonders auf eine geringe Korrosionsrate geachtet werden soll, da sie schnell und schwer berechenbar voranschreitet und gerade passivierbare und damit als korrosionsresistent geltende Werkstoffe betrifft.

Unter mechanischer Belastung kann die sogenannte Spannungsrisskorrosion auftreten. Damit sie Auftritt muss die Passivschicht beschädigt sein oder chemisch angegriffen werden und ein Anriss muss vorhanden sein. Durch eine Belastung mit Zugspannung dehnt sich die-Spannungsrisskorrosion senkrecht zu dieser aus. Der Riss setzt sich fort, da die Kerbwirkung zu einer Spannungskonzentration an seiner Spitze führt. Dort bildet sich eine plastische Verformung, welche aufgrund ihrer hohen Versetzungsdichte anodisch reagiert und somit zu einer weiteren Fortsetzung des Risses führt. Je nach Werkstoff und korrosivem Medium verläuft die Spannungsrisskorrosion inter- bzw. transkristallin. Interkristalline Korrosion kann auftreten, wenn sich die Korngrenzbereiche auflösen und vor dem Korninneren zerfallen. Dieser Prozess wird bei der Ausscheidung von Chromcarbiden und -nitriden aus Stählen beobachtet. Generell sind Metalle von Spannungsrisskorrosion betroffen, welche als korrosionsresistent gelten z. B rostfreie Stähle und Kupferlegierungen. (Pohl und Forchhammer 2014; Bargel und Schulze 2018)

Spannungen können in einem Endlagerbehälter durch Scherbewegungen und Drücke des ewG und Versatzes verursacht werden. Die Konstruktion des Behälters sollte also so ausgelegt werden, dass möglichst wenig mechanische Belastung durch die Konstruktion selbst entsteht und die von außen einwirkenden Kräfte möglichst gleichmäßig verteilt werden.

3.1.3.2 Dichte:

Die Dichte eines Werkstoffes wird durch das Verhältnis von Volumen zu Gewicht bestimmt und in g/cm^3 angegeben. Sie gibt auch Aufschluss über die kernphysikalischen Eigenschaften von Materialien, mit ihrer Hilfe kann die Abschirmung von Gamma- und Neutronenstrahlung beurteilt werden. Für die Abschirmung von Gamma- oder Röntgenstrahlung werden

Werkstoffe mit einer hohen Dichte verwendet wie beispielsweise Blei. Moderatorwerkstoffe wirken auf die Geschwindigkeit der Neutronen ein. Sie verlangsamen die Geschwindigkeit indem die in ihnen enthaltenen kleinen Atome die Neutronen durch inelastische Stöße abbremsen. Als Moderatorwerkstoffe werden Werkstoffe mit einer geringen Dichte ausgewählt, die Wasserstoff oder Carbide enthalten. (Hornbogen et al. 2019a)

Die Abschirmung der Gamma- und Neutronenstrahlung ist insbesondere während des Einlagerungs- und eventuellen Rückholungs- bzw. Bergungsprozesses relevant um eine Abschirmung der Strahlung für den Arbeitsschutz zu gewährleisten. Durch eine möglichst gute Abschirmung der Strahlung könnten der Aufwand und eventuelle Kosten für zusätzliche Schutzmaßnahmen während dieser Prozesse potentiell verringert werden. Zudem ist, durch die Abschirmung des größten Teils der Strahlung durch den Behälter, die Sicherung vor dem Austritt ionisierender Strahlung im Falle einer Einlagerung in Kristallingestein besser zu gewährleisten.

3.1.3.3 Streckgrenze

Die Druckfestigkeit gibt an wie stark die Druckbelastung auf den Werkstoff sein darf bis dieser plastisch verformt bzw. komplett versagt, sie wird in Pa = N/mm^2 angegeben. (Skrotzki und Scheller 2021) Die Streckgrenze repräsentiert die mechanischen Eigenschaften des Endlagerbehälters Werkstoffes. Die längste Zeitspanne des Einsatzes des Endlagerbehälters verbringt dieser im Endlager unter dem Druck des umgebenden Gesteins oder Versatzes. Innerhalb des Zeitraumes der Einlagerung kann es zu geologischen Ereignissen wie einer Verschiebung der Erdschichten oder Eiszeiten kommen. Diese Ereignisse und auch der erhöhte Druck eines gesättigten Bentonitversatzes müssen in die Konstruktion des Behälters einkalkuliert werden. Eine *hohe Streckgrenze* ist dabei von Vorteil. Einhergehend damit ist die entsprechende Duktilität des Behältermaterials. Dadurch kann gesichert werden, dass der Behälter das Inventar auch bei einer Verformung sicher einschließt.

3.1.3.4 Wärmeleitfähigkeit:

Die Wärmeleitfähigkeit beschreibt die Fähigkeit der Wärmeübertragung eines Materials, sie wird in W/ (cm * K) angegeben. Für einzelne Bauteile kann ein sogenannter k-Wert berechnet werden. (Foth 2008) Die Wärmeleitfähigkeit ist für den Endlagerbehälter in der thermischen Phase eine relevante Größe, da das Inventar weiterhin Wärme produziert und eine Überhitzung des Inventars zu Überkritikalität führen kann. Eine *hohe Wärmeleitfähigkeit* ist dementsprechend für einen Endlagerwerkstoff von Vorteil.

3.1.3.5 Fertigbarkeit:

Die Werkstoffe sollen den vorrausgegangenen Kriterien entsprechen. Diese können letztendlich nur angewandt werden, wenn sie auch entsprechend zu einem geeigneten Endlagerbehälter verarbeitet werden können. Gibt es kein geeignetes Verfahren für einen passenden Werkstoff, so muss abgewogen werden ob dieser durch einen anderen ersetzt werden kann oder ob ein passendes Verfahren entwickelt werden könnte. Die Fertigbarkeit ist damit ein sekundäres Ausschlusskriterium. Die Fertigbarkeit kann nicht wie die anderen Anforderungen in vergleichbaren Einheiten angegeben. Um diese darzustellen werden die wichtigsten und für den Endlagerbehälter potentiell in Frage kommenden Fertigungstechniken im zweiten Teil dieses Berichtes dargestellt und eingeordnet. Der Behälter muss stoffschlüssig verschlossen sein. Sowohl der Werkstoff als auch der Verschluss, also die hermetische Herstellung der Dichtheit, des Behälters muss diese Bedingung erfüllen.

4 Recherche von Werkstoffsystemen

Nachdem die grundlegenden Anforderungen an den Werkstoff des Endlagerbehälters im vorhergehenden Kapitel erörtert worden sind werden in diesem Kapitel die Werkstoffgruppen sowie ihre wichtigsten Vertreter und ihre Eigenschaften vorgestellt. Um die Eignung als Werkstoff für einen Endlagerbehälter zu bewerten werden die folgenden Kriterien bewertet:

- Die Beständigkeit bzw. Integrität des Werkstoffes unter Endlagerbedingungen über lange Zeiträume hinaus wird hinsichtlich des *Korrosionsverhaltens* und anderen ähnlichen Alterungsprozessen bewertet.

- Die Robustheit wird anhand der mechanischen Stabilität also ihrer Eignung zum Tragen der Last des einschließenden Gebirges und spezifisch der *Streckgrenze* und Duktilität eingeordnet.

- Die Wärmeabfuhr wird anhand der *Wärmeleitfähigkeit* bewertet. Durch sie soll sichergestellt werden, dass es im inneren des Behälters nicht zu einem kritischen Zustand kommt.

- Der Schutz vor Gamma- und Neutronenstrahlung kann anhand der *Dichte* und Zusammensetzung der Werkstoffe betrachtet werden.

Um einen neutralen Blick auf die verfügbaren Werkstoffgruppen zu richten, sollen alle bekannten Materialgruppen betrachtet werden, ihre *Eigenschaften und ihrer bisherigen Relevanz in der Endlagerbehälter-Forschung* beschrieben werden.

Generell werden Werkstoffe in die Gruppen Metalle, Keramik, Gläser, Polymere, Elastomere, Verbundwerkstoffe eingeteilt. (Edwards und Deng 2007, S. 1288) Diese sollen im Folgenden vorgestellt werden.

4.1 Polymere

Polymere sind Moleküle, die aus langen sich wiederholenden Einheiten (Monomeren) bestehen. Diese Molekülketten bestehen hauptsächlich aus C sowie H, Cl, F O und N. Die Fernordnung der Moleküle von Polymerwerkstoffen ist meist eine Mischung aus Glas und Kristallstruktur. (Hornbogen et al. 2019a) Es wird zwischen Thermoplasten und Duroplasten unterschieden. Thermoplaste verflüssigen sich, wenn sie erwärmt werden und können so geformt werden, während des Prozesses ändert sich ihre Polymerstruktur leicht. Sie können nach dem formgebenden Prozess recycelt werden. (Thompson 2014) Bei der Verarbeitung von Duroplasten reagieren mindestens zwei zunächst flüssige Polymerketten miteinander und bilden dabei permanente Bindungen aus, sie können nach diesem Schritt nicht wiedererhitzt und neu geformt werden. Häufig genutzte Duroplaste sind beispielsweise Epoxide. (Pascault und Williams 2013) Polymere haben einen geringen E-Modul, ein gutes Verhältnis von Festigkeit zu Gewicht und weisen eine große Bandbreite in der Schlagzähigkeit auf, welche von spröde bis sehr zäh reicht. Viele Polymere sind resistent gegenüber schwachen Säuren, Wasser oder schwachen alkalischen Lösungen. Polyester und Polyamide können auch schon durch diese hydrolysiert werden. Organische Substanzen und starke Säuren können zu Versprödung, Verfärbung, Auflösen und Anschwellen des Werkstoffes führen. (Blaga 1973)

Polymere können als Korrosionsschutzbarriere auf Metalle aufgebracht werden und somit Korrosion an der Metalloberfläche verhindern. (Subramania et al. 2004) Sitaram et al. (1997) untersuchten beispielsweise eine Beschichtung von Stahl mit Polyanilin.

Polymere verändern sich optisch durch den Einfluss von Strahlung, so wurde 2010 untersucht welche Polymere sich beispielsweise besonders gut für die Anwendung in einem Dosimeter eignen könnten. (Srivastava et al. 2010)

Polymere werden auch im medizinischen Bereich verwendet und können dort mit Strahlung in Berührung kommen. More et al. 2021 untersuchten welche neuartigen Polymere sich beispielsweise für die Strahlenabschirmung eignen könnten und kamen zu dem Schluss, dass sich besonders PCTFE, aber auch andere Polymere für die Abschirmung von Gammastrahlen eignen.

Polymere eignen sich gut zur Herstellung von Komposit-Werkstoffen so untersuchten Ambika et al. (2017), (2020) einen Kompositwerkstoff aus Polyester und Wolframoxid bezüglich seiner Wirksamkeit als Strahlenschutz.

Durch die Herstellung von Nuklearwaffen sind insbesondere in den USA und Russland große Mengen an hochradioaktiven flüssigen Abfällen entstanden. Kelley et al. (2003) befanden, dass ‚high-tech Polymere' dazu geeignet sind die Abfälle in Russland zu immobilisieren, um einen sicheren Transport und einen Lagerung zu ermöglichen.

In den USA wurde an der Savannah River Site, einem Standort der US-Nuklearwaffen Produktion ebenfalls die Verwendung von Polymeren bei der Aufbereitung von hochradioaktiven Abfällen untersucht. Skidmore und Fondeur (2013) beschreiben beispielsweise Auswirkungen der ionisierenden Strahlung auf Polymerbauteile in HAW-Behältern. Polymere wie der Elastomer EPDM (Ethylen-Propylen-Dien-Monomer), Thermoplaste wie PTFE (Teflon®) und auch ETFE (Ethylen-Tetrafluoroethylen), UHMWPE (ultra high molecular-weight-polyethylene) oder PEEK (Polyetherketon) werden in der Aufbereitung und Lagerung als Abdichtungen genutzt, aufgrund ihrer elastischen Eigenschaften und der geringen Kosten. In ihrer Untersuchung stellen Skidmore und Fondeur (2013) fest, dass die Intensität der Strahlung einen direkten Effekt auf die Lebensdauer der Polymere hat. Eine geringe Schädigung bei hoher Strahlenbelastung lässt dabei nicht auf eine geringe Schädigung durch dieselbe Strahlendosis über einen längeren Zeitraum hinweg schließen. Ebenso sollte in weiteren Untersuchungen der Einfluss der Temperatur und der chemischen Umgebung auf die Lebensdauer der Polymere untersucht werden.

Die Verwendung von PE (Polyethylen) für die Mikro- und Makroverkapselung für LLW wurde in den 1990er Jahren auch für die Langzeitlagerung untersucht und in Betracht gezogen, da diese Methode effizienter eingesetzt werden kann als die Immobilisierung durch hydraulischen Zement (Kalb und Lageraaen 1994; Kalb et al. 1991). Polyethylen ist auch deshalb interessant für die Einlagerung von Radioaktiven Abfällen, da es resistent gegenüber zyklischen Temperaturschwankungen, Chemikalien, Mikroorganismen und Gammastrahlung ist. (Skidmore und Fondeur 2013)

Auch in Deutschland wird Polyethylen in der Zwischenlagerung eingesetzt. In CASTOR® Behältern sind in den monolithischen Gusseisenkörper PE-Stäbe als Moderatorwerkstoff eingelassen. Es befinden sich ebenfalls PE Platten an Deckel und Boden des Behälters. (Wimmer et al. 2015)

Da Polymere durch die Umweltbedingungen früher oder später zerfallen bzw. sich abbauen und damit die Integrität des Werkstoffes beschränkt ist unterliegen sie einer Art Korrosion. Brockmann (1988) identifizierte drei verschiedene Schädigungsmechanismen für eine solche Beschichtung. In Bezug auf Polymere wird die „Korrosion" als Alterung bezeichnet, diese kann durch Lösungsmittel, UV-Strahlung oder andere physikalische Einflüsse hervorgerufen werden. (Seidel und Hahn 2018)

Ein Prozess der sich ebenfalls auf die Verschlechterung der Werkstoffeigenschaften durch Umgebungsbedingungen bezieht ist die Hydrolyse von Polymeren. Grundvoraussetzung für die Hydrolyse ist die Anwesenheit von Wasser, die Polymerketten werden dabei in kleinere Bestandteile zerlegt. (Sanders et al. 2002) Durch die Hydrolyse verliert der Polymerwerkstoff Gewicht, die Kristallinität kann sich verändern zudem kommt es zu einer Verschlechterung der

mechanischen Eigenschaften. Die Hydrolyse ist ein autokatalytischer Prozess, welcher durch Carbonsäuregruppen vorangetrieben und verschnellert wird. (Loyer et al. 2021 , Antheunis et al. 2009) Durch Radiolyse degradieren Polymere ebenfalls. Die Strahlung führt zur Ionisierung und der Bildung von Radikalen, welche zum Abbau der Vernetzung zwischen den Polymeren und somit einer Degradation führt. (Kerry Thomas 2007)

Daher sind Polymere sind aufgrund der im Vergleich zu Metallen instabileren Kohlenstoff-Wasserstoff-Bindungen und der fehlenden Einschätzung für das Verhalten der Werkstoffe über einen Zeitraum von 1 Mio. Jahre nicht in die nähere Auswahl für das Hauptmaterial eines Endlagerbehälters geeignet.

Während eine Polymerbeschichtung für ein Metall einen Korrosionsschutz bieten kann ist dieser Schutz nicht für eine Zeitspanne der Nutzung eines Endlagerbehälters zu gewährleisten, da die Integrität der chemischen Bindungen der Polymere durch Einflüsse von Hydrolyse und Radiolyse nicht über den geplanten Zeitraum als gesichert betrachtet werden kann.

4.2 Metallische Werkstoffe

Metallische Werkstoffe setzen sich aus den metallischen Atomen zusammen, sie können in unterschiedlichen Zusammensetzungen kombiniert bzw. auch mit nichtmetallischen Elementen wie z.B. Kohlenstoff. Durch die verschiedenen Zusammensetzungen sowie die Fertigungsmethoden können die Eigenschaften der Metalle weiter beeinflusst werden. Sie unterscheiden sich von den Polymeren darin, dass sie nicht über längere Zeiträume hinweg oder durch Recycling degradieren. (Thompson 2014) Im Vergleich zu Polymeren haben Metalle generell eine höhere Dichte. (Blaga 1973)

Zudem Unterscheiden sich Metalle von Polymeren durch ihre Struktur und ihre Bindungen. Metallatome befinden sich in Gittern, die äußeren Atome befinden sich im „Elektronengas und können sich frei durch das Gitter bewegen, diese delokalisierbaren Elektronen führen zur guten elektrischen und thermischen Leitfähigkeit der Metalle. Bei den kettenförmigen Polymeren handelt es sich hingegen um kovalente Bindungen. Metalle sind als einzige Werkstoffgruppe zwischen 0K und ihrer Schmelztemperatur bruchzäh und plastisch verformbar. (Hornbogen et al. 2019a)

Metalle sind nicht nur elektrisch, sondern auch thermisch leitfähiger als Polymere, sie können daher beispielsweise auch zu Wärmeableitung genutzt werden. Allgemein besitzen Metalle die höchsten Wärmeleitfähigkeiten von allen Werkstoffen. (Foth 2008) Reine Metalle sind besonders elektrisch leitfähig. Sind ihre konstruktiven Eigenschaften nicht ausreichend, oder wäre der Einsatz der reinen Metalle zu kostenintensiv, so können die Metalle legiert werden um ihre Eigenschaften entsprechend anzupassen. (Hornbogen et al. 2019a)

Im Gegensatz zu Polymeren, die meist eine gute chemische Beständigkeit gegenüber Säuren und Basen aufweisen können Metalle unter diesen Umständen korrodieren oder oxidieren. Polymere sind teilweise empfindlich gegenüber UV-Strahlung während dies auf Metalle nicht zutrifft.

Die Verfahren zur Verarbeitung der Metalle erfordern meist einen relativ hohen Energieaufwand.

Die Dichte von Metallen ist generell höher als die von Polymeren. Metalle lassen sich unterteilen in Eisenbasiswerkstoffe, Kupferbasiswerkstoffe, Nickelbasiswerkstoffe, Aluminiumbasiswerkstoffe und Titanbasiswerkstoffe.

4.2.1 Eisenbasislegierungen

Als Stähle werden Eisen-Kohlenstofflegierungen mit einem Kohlenstoffanteil bis zu 2,06 % bezeichnet. Sie werden in unlegierte und legierte Stähle unterteilt (vgl. Darstellung in Abb. 10). (Schuler und Twrdek 2024; DIN EN 10020)

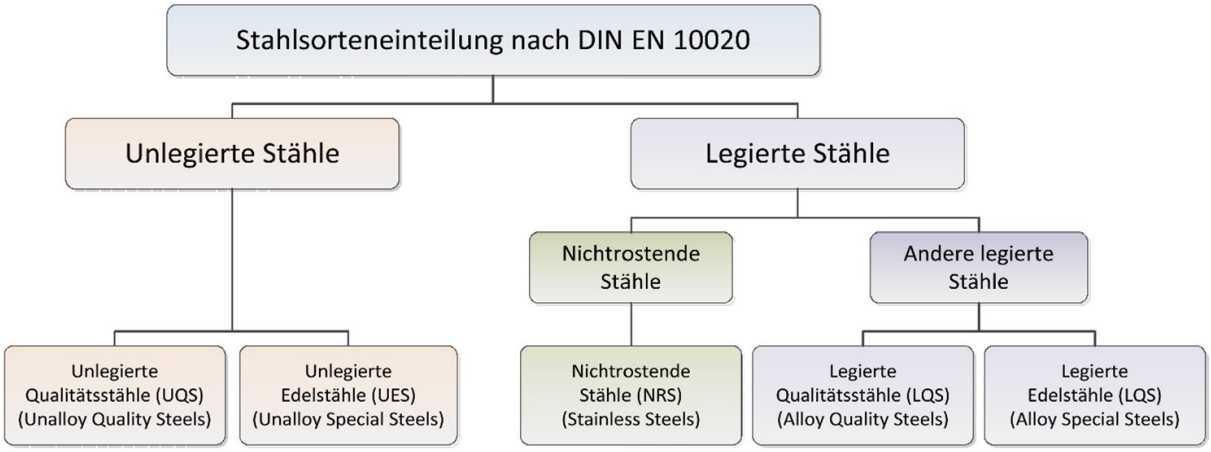


Abbildung 9 Einteilung der Stähle nach DIN EN 10020 (Schuler und Twrdek 2024)

4.2.1.1 Unlegierte Stähle

Unlegierte Stähle enthalten neben Kohlenstoff nur sehr geringe Anteile an Legierungselementen (vgl. Tab. 11). Zu diesen gehören beispielsweise die unlegierten Vergütungsstähle C22 – C60. An dieser Bezeichnung kann der Kohlenstoffanteil abgelesen werden. So enthält ein C22 Stahl 0,22 % Kohlenstoff. Neben den Vergütungsstählen gehören auch die Einsatzstähle zu den unlegierten Stählen, ihr Kohlenstoffgehalt ist jedoch geringer und liegt zwischen 0,1 und 0,2 %. (Schuler und Twrdek 2024) In DIN EN 10020 ist festgelegt bis zu welchen prozentualen Anteilen die jeweiligen Legierungselemente maximal enthalten sein dürfen (vgl. Tab. 9). Diese Stähle bestehen im Wesentlichen aus Eisen und einem geringen Kohlenstoffgehalt (in der Regel unter 0,25%). Unlegierte Stähle sind aufgrund ihrer guten Verarbeitbarkeit und relativ niedrigen Kosten weit verbreitet. Sie weisen jedoch eine geringe Korrosionsbeständigkeit auf und werden daher häufig mit Schutzschichten und Lacken versehen. (Callister 2001)

Tabelle 11 Grenze zwischen unlegierten und legierten Stählen (DIN EN 10020)

Al	B	Bi	Co	Cr	Cu	La	Mn	Mo	Nb	Ni	Pb	Se	Si	Te	Ti	V	W	Zr
0,3	0,0008	0,1	0,3	0,3	0,4	0,1	1,65	0,08	0,6	0,3	0,4	0,1	0,6	0,1	0,05	0,1	0,3	0,05

Das Einsatzspektrum von unlegierten und niedrig legierten Stählen erstreckt sich von Baustählen bis zu Einsatz und Vergütungsstählen. (RÖMPP-Redaktion 2002a)

Einsatz- und Vergütungsstähle sind für die Wärmebehandlung konzipiert mit der ihre Eigenschaften nach der Fertigung eingestellt werden können. Generell sind sie nicht für das Schweißen optimiert. Soll ein Teil nach der Wärmebehandlung geschweißt werden so sollte die obere Schicht abgeschliffen werden um Risse zu vermeiden, die durch den hohen Kohlenstoffgehalt an der Oberfläche entstehen können. (Schuler und Twrdek 2024)

Der Kohlenstoffanteil im Behältermaterial spielt auch eine Rolle in der Reduktion der ionisierenden Strahlung. Die Simulationen von Poenitz und Walther (2017) kommen zu dem

Schluss dass ein Behälter ohne Graphit eine um 62% erhöhte Dosisleistung an der Behälteroberfläche aufweist.

Gammastrahlung erhöht die Korrosionsrate erheblich bei höheren Temperaturen, sie hat weniger Einfluss über längere Zeiträume, da die Strahlung über diese Zeiträume ebenfalls abnimmt. In langfristigen Vorhersagen und aufgrund der kurzen Hochtemperaturphase, in Betracht der gesamten Lagerzeit, kann die Strahlung als vernachlässigbarer Parameter angesehen werden. (Zhang et al. 2022)

Weltweit ist Deutschland der siebtgrößte Stahlerzeuger und in Europa der Größte. Der Großteil des in Deutschland verarbeitetet Eisenerzes wird aus Südafrika, Kanada, Brasilien, Schweden und den USA importiert.

In Schweden wurde von der SKB zwei Konzepte für Einsätze aus unlegiertem Stahl erstellt. Diese Einsätze wurden jeweils für die Brennelemente von Siedewasser und Druckwasserreaktoren ausgelegt für die sich die Legierungen der Druckrohre jeweils leicht unterscheiden vgl. Tabelle 12. Deckel, Boden und Gerüst werden jeweils aus demselben Stahl gefertigt. (Johansson et al. 2024)

Tabelle 12 Zusammensetzung der Stähle für die Einsätze aus dem Rebus-Konzept nach Johansson et al. (2024)

Element in %	Gerüst	Deckel und Boden	Druckrohr Konzept 1 1.0562	Druckrohr Konzept 1 1.0565	Druckrohr Konzept 2 1.8905	Druckrohr Konzept 2 1.8935
C	≤ 0,17	0,1 – 0,22	≤ 0,20	≤ 0,20	≤ 0,20	≤ 0,20
Mn	≤ 1,40	1,1 -1,7	0,9 -1,7	0,9 -1,7	1,0 – 1,7	1,0 – 1,7
P	≤ 0,025	≤ 0,025	≤ 0,025	≤ 0,025	≤ 0,025	≤ 0,025
S	≤ 0,025	≤ 0,01	≤ 0,02	≤ 0,01	≤ 0,02	≤ 0,01
Cu	≤ 0,055	≤ 0,05	≤ 0,05	≤ 0,025	≤ 0,05	≤ 0,05
Si		≤ 0,60	≤ 0,50	≤ 0,50	≤ 0,60	≤ 0,60
Al		≥ 0,02	0,02 -0,04	0,02 -0,04	0,02 -0,04	0,02 -0,04
N		≤ 0,012	≤ 0,02	≤ 0,02	≤ 0,02	≤ 0,02
Cr		≤ 0,30	≤ 0,30	≤ 0,30	≤ 0,30	≤ 0,30
Mo		≤ 0,08	≤ 0,08	≤ 0,08	≤ 0,10	≤ 0,10
Nb		≤ 0,04	≤ 0,05	≤ 0,05	≤ 0,05	≤ 0,05
Ni		≤ 0,30	≤ 0,50	≤ 0,50	≤ 0,80	≤ 0,80
Ti		(max)0,03	≤ 0,04	≤ 0,04	≤ 0,04	≤ 0,04
V		0,02	≤ 0,10	≤ 0,10	≤ 0,20	≤ 0,10
Andere (Cr, Cu, Mo, Ni)		≤ 0,7				
Nb + Ti + V			≤ 0,12	≤ 0,12	≤ 0,22	≤ 0,12

Im Yucca Mountain Project wurde eine 100 mm dicke A516 Baustahlschicht für die Tragfestigkeit in verschiedenen Behälter Designs verwendet. A516 ist ein nach ASTM Norm gefertigter unlegierter Stahl. (Rechard und Voegele 2014)

In China wurde durch Zhang et al. (2022) untersucht ob sich Q235 Stahl für einen Endlagerbehälter eignet, sie kamen zu dem Schluss, dass sich die Wasserstoffkonzentration mit der Zeit erhöht, der Werkstoff gegenüber der Wasserstoffversprödung nur wenig empfindlich ist. Für eine langfristige strukturelle Integrität des Behälters empfehlen sie eine hohe Wanddicke und eine Anpassung struktureller Elemente an die Korrosionsrate. In der Studie wurde ein Aufbau mit simuliertem Grundwasser und verpresstem Bentonit verwendet.

Bor als Element wird als Neutronenabsorber angewendet. Meist geschieht dies in Form von Borcarbid. Stähle können jedoch auch boriert werden und das Bor so in das Metall eingebracht

werden. Borierter, korrosionsbeständiger Stahl wird für einen Behälter als Neutronenabsorber genutzt, der im PA-93 (Performance Assessment Konzept in Yucca Mountain) verwendet werden soll (Abb.11). (Rechard und Voegele 2014)

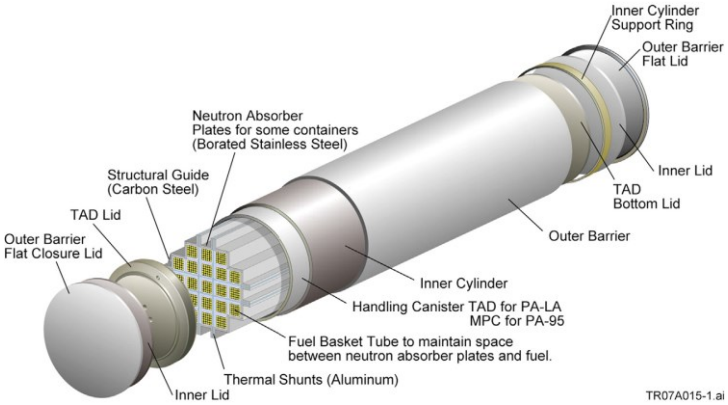


Abbildung 11 In Drift Waste Package for PA-93 (Rechard und Voegele 2014)

Unlegierte Stähle sind in den Konzepten von Canada, Japan und Spanien enthalten. Stahl allgemein findet sich als potentieller Werkstoff in den Endlagerbehälterkonzepten von Belgien, Frankreich, Korea, der Schweiz, Großbritannien und den USA.

4.2.1.2 Gusseisen

Gusseisen ist ein Eisenwerkstoff mit einem Kohlenstoffanteil über 2,06 %. Es wird zwischen weißem und grauem Gusseisen unterschieden. Das weiße Gusseisen erstarrt metastabil, der Kohlenstoff wird als Zementit gebunden. Das graue Gusseisen erstarrt hingegen stabil und der Kohlenstoff wird aufgrund seiner hohen Konzentration als Graphit im Gefüge ausgeschieden. Diese Ausscheidungen können sich lamellar, kugelförmig oder vermicular ausprägen (vgl. Abb.12).

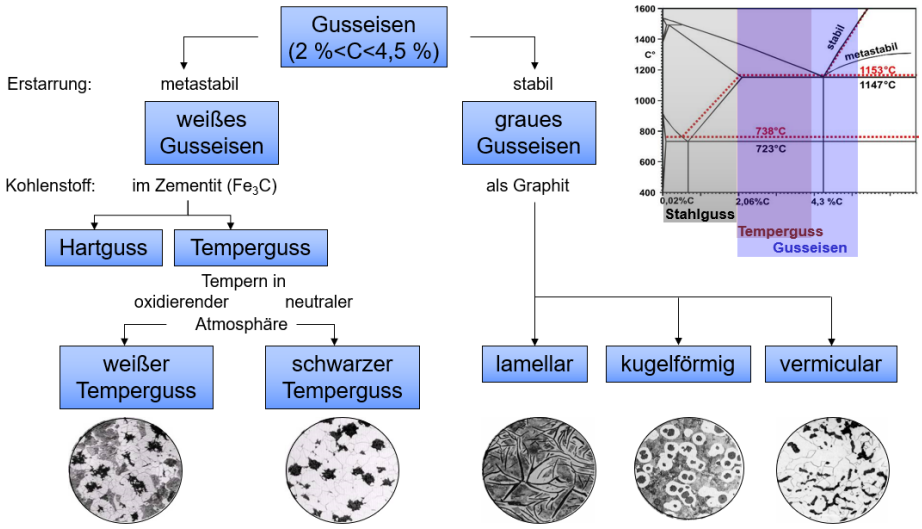


Abbildung 12 Einteilung der Gusseisenwerkstoffe

Durch die Zulegierung von bis zu 5 % Ni kann graues Gusseisen in Festigkeit, Zähigkeit, Härtbarkeit und Korrosionsfestigkeit verbessert werden. Das Nickel sorgt dabei für eine gleichmäßigere Graphitstruktur. (Davis 2000)

Beim Schweißen von Gusseisen wird zwischen Warm- und Kaltschweißen unterschieden (vgl. Abb. 13). Beim Warmschweißen kann ein artgleicher Schweißzusatz verwendet werden. Beim

Kaltschweißen ist dies hingegen nicht möglich. (Schuler und Twrdek 2024) Mit einer Dichte von ca. 7- 8 kg/dm^3 ist die Dichte von Gusseisen geringer als die von reinem Eisen oder Stählen. (Total Materia 2012). Der hohe Anteil von Kohlenstoff in Gusseisen führt zu einer höheren Abschirmwirkung von Neutronenstrahlung als bei Stählen, welche einen geringeren Kohlenstoffanteil aufweisen. (Poenitz und Walther 2017)

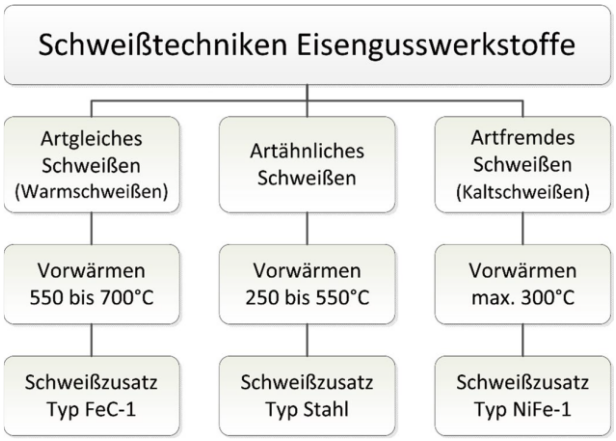


Abbildung 13 Schweißtechniken Eisengusswerkstoffe (Schuler und Twrdek 2024)

Das artgleiche Schweißen bietet den Vorteil, dass zwischen Schweißgut und Schweißnaht kein elektrisches Potentialgefälle eintreten kann, welches die galvanische Korrosion an der Schweißstelle befördern könnte. Der Nachteil beim Schweißen von Gusseisen besteht hier jedoch darin, dass das Schweißgut auf bis zu 700 °C vorgewärmt und anschließen langsam abgekühlt werden muss. Dies lässt sich nur untere einem unvertretbaren Aufwand und Risiko für einen automatisierten Verschluss in der heißen Zelle und einem beladenen Endlagerbehälter realisieren. Demnach müsste ein Gusseisenbehälter beim Verschluss kaltgeschweißt werden.

Im Bericht von 1989 (Simpson 1989) beschäftigt sich die Nagra mit Stahlguss mit niedrigem Kohlenstoffgehalt als Behältermaterial. Der Bericht kommt zu dem Schluss, dass die allgemeine Korrosion von kohlenstoffarmen Stählen in Grundwässern verschiedener Zusammensetzungen unbedenklich ist. Die erwartete langfristige Korrosionsrate von 20 µm/a würde nicht überschritten werden und Lochfraßkorrosion sowie Schwankungen in der Korrosionsrate seien nicht zu erwarten. Zudem wurde ein Nachweis darüber geführt, dass ein Stahlgussbehälter nicht durch Spannungsrisskorrosion versagen würde. Durch die anaerobe Korrosion von Stahl entsteht Wasserstoff, dieser kann zu weiteren Schäden und einem Druckaufbau führen. Diese Gasentwicklung muss bei der Konstruktion und Werkstoffwahl beachtet werden.

Die Nagra untersuchte Kohlenstoffstähle unter zementchemischen Bedingungen mit Temperaturen von 50°C bis 80°C und pH-Werten von 13,5 (junges Zementwasser) bis 12,5 (Portlandit gesättigtes Wasser). Es wurde festgestellt, dass der Zement selbst über mehrere Jahre hinweg erhebliche Mengen an Wasserstoff erzeugt und anfangs vorhandenen Sauerstoff schnell verbraucht. Stahldraht korrodierte schneller als Stahlstäbe, die wiederum schneller korrodierten als Stahlblech der Güteklasse SA516 70 (ähnlich dem belgischen Supercontainer-Umverpackungsmaterial). Bei 100 % relativer Luftfeuchtigkeit und 50 °C korrodierte Stahldraht mit 10 nm/Jahr, während Stahlstäbe mit weniger als 0,5 nm/Jahr korrodierten. In jungem Zementwasser bei 50 °C korrodierte der Stahldraht stetig mit 400 nm/Jahr, unabhängig von bereits gebildeten Korrosionsprodukten. Bei 80 °C ging die Korrosionsrate nach einer anfänglichen Periode mit einer Rate von µm/Jahr schnell auf 10 nm/Jahr zurück. In Portlandit gesättigtem Wasser bei 50 °C korrodierte Stahldraht mit einer abnehmenden Rate zwischen 1 und 10 nm/Jahr, während Stahlstäbe mit 0,1 nm/Jahr

korrodierten. Bei Stahlstäben, die bei 50 °C in Zement eingebettet waren, lagen die gleichmäßigen Korrosionsraten bei 100 % relativer Luftfeuchtigkeit bei weniger als 0,5 nm/Jahr und bei 0,1 nm/Jahr. (Senior und Martino 2022)

Die geschätzte Verringerung der Wanddicke aufgrund von gleichmäßiger Korrosion beträgt etwa 0,2 mm nach der aeroben Phase (10-100 Jahre), 2,2 mm nach 1.000 Jahren und etwa 20 mm nach 10.000 Jahren. (Patel et al. 2012)

Der belgische Supercontainer soll aus einem Stahlguss gefertigt werden. (Bollingfehr et al. 2020, S. 17; Kinet et al. 2016) Im Projekt OPERA (2011-2017) wurde das Entsorgungskonzept in boom clay vom belgischen Programm in den Niederlanden übernommen. Eine finale Entscheidung für die Methode der Einlagerung steht aber bis zum Jahr 2100 aus. Die Inbetriebnahme des Endlagers ist für das Jahr 2130 vorgesehen. (Verhoef et al. 2020)

Zudem besteht in den Niederlanden ein Konzept der COVRA zur Entsorgung von HAW aus dem Forschungsreaktor HABOG. Der Brennstoff ist verpackt in Kohlenstoff-Stahl-Overpacks, welche unter Heliumatmosphäre verschweißt werden. Eine Undichtigkeit des Behälters könnte durch das Austreten von Helium detektiert werden. Um den Overpack herum befindet sich eine Schicht Beton, welcher für einen hohen pH- Wert von wenigsten 10-13,5 sorgen soll und wenig wasserdurchlässig sein soll, damit die Korrosion am Overpack auf ein minimales Maß reduziert werden kann. Der Container steht auf einem Sockel welcher ebenfalls aus Beton besteht. Zwischen dieser Betonschicht und der Äußeren Liner- Betonschicht befindet sich eine weitere Schicht aus „geschäumtem Beton“. Die COVRA geht davon aus, dass zu einem bestimmten Zeitpunkt alle diese Barrieren ausfallen, daher soll eine weitere Zementschicht innerhalb des Stahlkanisters um die mit Aluminium umhüllten Brennstäbe verbracht werden. (Koets et al. 2022, S. 10–12) Dieses Konzept ist vergleichbar mit dem belgischen Supercontainer.

In Canada soll der Kohlenstoffstahlbehälter zusätzlich mit einer mindestens 3mm starken Kupferschicht als Korrosionsschutz umgeben werden. (Briggs, Scott (Hg.) 2023)

4.2.1.3 Hochlegierte korrosionsbeständige Stähle

Es gibt keine Normung für den Legierungsanteil hochlegierter Stähle, gemeinhin enthalten sie mehr als 5% Legierungselemente. In den Bezeichnungen werden sie mit einem X als Vorbuchstaben gekennzeichnet. Darauf folgt die Angabe des 100 fachen Wertes des Kohlenstoffgehaltes. Danach folgen die Legierungselemente in Prozent. Ein X40CrMoV5-1 enthält also als Legierungselemente 0.4 % C, 5 % Cr, 1 % Mo und < 1 % V. Als Legierungselemente werden meist Chrom, Nickel und Molybdäneingesetzt, da sie die Korrosionsbeständigkeit und mechanische Stabilität des Stahls verbessern. Chrom ist entscheidend für die Bildung einer schützenden Passivschicht, während Nickel zusätzlich zur Korrosionsbeständigkeit beiträgt und die Duktilität des Stahls erhöht. Molybdän wird eingesetzt, um die Widerstandsfähigkeit gegenüber Lochfraßkorrosion, insbesondere in chloridhaltigen Umgebungen, zu erhöhen (Scheller 2009; Berns und Theisen 2006) Das meiste Nickel wird als Legierungselement in rostfreiem Stahl verwendet, in den USA sind dies beispielsweise 55 % des Nickelverbrauchs. (Davis 2000)

Edelstähle werden für die Endlagerbehälter von Belgien, China, Frankreich, Russland, Tschechien und den USA in Betracht gezogen. (Ojovan und Steinmetz 2022)

In der Schweiz wird von der NAGRA die Grimsel-Test-Site betrieben, ein internationales Testlabor, das dazu dient, die Sicherheit und das Langzeitverhalten von Endlagerbestandteilen und -systemen zu untersuchen. Dort wird unter anderem im MaCoTe-Experiment das Korrosionsverhalten von Kohlenstoffstahl, Kupfer und hochlegiertem Edelstahl bei der Verwendung eines Bentonitversatzes, welcher mit dort natürlich

vorkommenden Mikroorganismen behandelt wurde, untersucht. Acht Edelstahlmodule, die Bentonit und Metallproben enthalten wurden in einem Bohrloch in Grimsel platziert. Nach 394 Tagen war die Korrosionsrate von Edelstahl vernachlässigbar, die von Kupfer betrug 0,09-0,24 µm/Jahr und die von Kohlenstoffstahl betrug 1,87-2,05 µm/Jahr. Die Dichte des Bentonits sowie die mikrobiell induzierte Korrosion hatten keinen signifikanten Einfluss auf die Korrosionsraten. Die Veränderung der Oberflächen von Kupfer und Kohlenstoffstahl durch die Korrosion führte zu geringen mineralogischen Veränderungen des Bentonit. (Reddy et al. 2021)

4.2.2 Kupferbasislegierungen

Kupfer ist ein natürlich gediegen auftretendes Element welches schon seit ca. 6.000 v. Chr. von Menschen verarbeitet und genutzt wird. Mit Beginn der Bronzezeit um 3000 v. Chr. wurden erste Legierungen durch das Beimengen von Zinn hergestellt, es waren aber auch Begleitelemente wie Arsen, Antimon und Nickel in den ersten naturharten Bronzen enthalten. Kupferlegierungen können als Guss oder Knetlegierungen hergestellt werden. (RÖMPP-Redaktion 2002b) (Krüger 2003)

Die weltweiten Kupferreserven sind von 870 auf 1.000 Mio. Tonnen angewachsen und die geologische Verfügbarkeit ist aufgrund großer Reserven in u.a. Südamerika und Australien längerfristig gesichert. (Nachrichten des Kupferverband 2024)

Kupfer ist ein Edelmetall aber im Gegensatz zu Gold und anderen Edelmetallen ist es nicht vollständig korrosionsfest gegenüber gängigen Reagenzien und Umwelteinflüssen. Reines Kupfer weißt in den meisten korrosiven Umgebungen eine gute Beständigkeit auf. Einige Kupferlegierungen zeigen eine Anfälligkeit für Spannungsrisskorrosion (SCC). SCC tritt meinst in Bronzen auf, die mehr als 15% Zink enthalten und Ammonium oder Aminen ausgesetzt sind. Damit SCC auftritt ist eine gleichzeitige Zugspannung und die Anwesenheit einer bestimmten chemischen Spezies notwendig. Durch Weichglühen oder Entfernen der chemischen Spezies kann der SCC vorgebeugt werden, dies ist nur effektiv, wenn das entsprechende Bauteil nicht durch seinen Gebrauch weiteren mechanischen Belastungen ausgesetzt wird, welche zu Inneren Spannungen führen. (Davis 2001)

Messing ist eine Kupferlegierung, deren Hauptlegierungselement Zink ist. (Callister 2001) Ein weiterer Schadensmechanismus ist das „Dealloying“ ab einem Zinkgehalt von über 15 % kann es zu einer Entzinkung kommen das Zink wird dabei aufgrund seiner höheren Konzentration unter Anwesenheit von Feuchtigkeit und Sauerstoff aus dem Messing herausgelaugt. Dabei entstehen Spalte, Poren und das im Messing enthaltene Kupfer oxidiert and der Oberfläche. Diese Entzinkung kann an der Oberfläche oder lokal (plug-type) auftreten. (Cerrato et al. 2017)

Da die meisten Kupferlegierungen desoxydiert sind, besteht bei ihnen keine Gefahr der Wasserstoffversprödung. (Davis 2001)

Kupfer ist ein duktiles Metall mit guter Wärme- und elektrischer Leitfähigkeit. Es lässt sich zudem vollständig ohne Qualitätsverlust recyclen. (Krüger 2003)

Kupfer und Kupferlegierungen sind sowohl gute elektrische Leiter als auch gute Wärmeleiter. Denn Veränderungen im Wärmeleitfähigkeitsverhalten folgen gemäß dem Wiedemann-Franz‘schen Gesetz[1] der elektrischen Leitfähigkeit und sind nahezu proportional zueinander. (Davis 2001)Kupfer und Kupferlegierungen sind sowohl gute elektrische Leiter als auch gute Wärmeleiter. Denn Veränderungen im Wärmeleitfähigkeitsverhalten folgen gemäß dem

[1] $\frac{\lambda}{\sigma} = L \cdot T$ λ = thermische Leitfähigkeit σ = elektrische Leitfähigkeit
L = Lorenz Zahl
T = Temperatur

Wiedemann-Franzschen Gesetz[2] der elektrischen Leitfähigkeit und sind nahezu proportional zueinander. (Davis 2001)

Kupfer und Kupferlegierungen haben antimikrobielle Wirkungen und können Pathogene wie Bakterien, Viren und Pilze die sich auf ihrer Oberfläche befinden innerhalb einiger Stunden eliminieren. (Prado J et al. 2012; Li et al. 2010) Diese Eigenschaften könnten zur Verminderung von mikrobiell induzierter Korrosion beitragen.

Kupfer wird aufgrund seiner elektrischen Leitfähigkeit besonders im Energiesektor benötigt. Erneuerbare Energien wie Solar und Windenergie erfordern im Vergleich Elektrizität, die aus fossilen Energieträgern gewonnen wird mehr Kupfer pro MW. (UNECE 2022) Durch den Ausbau der erneuerbaren Energieerzeugung steigt damit auch der Bedarf an Kupfer.

Aber auch andere Teile der von Infrastruktur und der Bausektor benötigen Kupfer für Kabel, Rohre, Heizungen und Klimaanlagen. In elektronischen Geräten wird Kupfer ebenso benötigt wie in industriellen Anwendungen. Kupfer wird dort beispielsweise für elektronische Motoren, Ventile, Fittings und Wärmetauscher verwendet. In Konsumgütern findet sich Kupfer zudem in Schmuck, Münzen und Verschlüssen. (Davis 2001)

Als korrosionsbeständige Beschichtungen auf Kupferbasis werden häufig Kupfer-Nickel-Legierungen gewählt, die auf Kohlenstoffstahl aufgebracht werden. Diese Beschichtungen werden in Meerwasserumgebungen eingesetzt.

Techniken für das Aufbringen von Kupferschichten sind: Auftragsschweißen, Diffusionsschweißen oder Ummanteln (sheathing).

Kupfer-Nickellegierungen werden auch Kupfernickel genannt sie können von 1- 50 % Nickel enthalten. Die Meist verwendeten Legierungen sind 70Cu-30Ni, 80Cu-20 Ni und 90Cu-10Ni. Legierungen mit 10-30 % Ni werden aufgrund ihrer Korrosionsbeständigkeit gegenüber Seewasser in maritimen Anwendungen verwendet in den USA und in Canada werden 75Cu-25Ni für 5 und 10 ct. Münzen verwendet. In Canada bestehen 10 und 25 ct Münzen seit 1922 aus reinem Nickel. (Davis 2000) Kupfer-Nickellegierungen werden auch Kupfernickel genannt sie können von 1- 50 % Nickel enthalten. Die Meist verwendeten Legierungen sind 70Cu-30Ni, 80Cu-20 Ni und 90Cu-10Ni. Legierungen mit 10-30 % Ni werden aufgrund ihrer Korrosionsbeständigkeit gegenüber Seewasser in maritimen Anwendungen verwendet in den USA und in Canada werden 75Cu-25Ni für 5 und 10 ct. Münzen verwendet. In Canada bestehen 10 und 25 ct Münzen seit 1922 aus reinem Nickel. (Davis 2000)

Neusilber enthalten neben Nickel und Kupfer, Zink und sind ebenfalls korrosionsbeständig, die zwei meistverwendeten Legierungen sind 65Cu-18Ni-17Zn und 55Cu-18Ni-27Zn. Diese Nickel-Messing Legierungen sind durch ihren Nickelgehalt weitaus korrosionsbeständiger als Messing mit einem ähnlichen Kupfergehalt. (Davis 2000) Neusilber enthalten neben Nickel und Kupfer, Zink und sind ebenfalls korrosionsbeständig, die zwei meistverwendeten Legierungen sind 65Cu-18Ni-17Zn und 55Cu-18Ni-27Zn. Diese Nickel-Messing Legierungen sind durch ihren Nickelgehalt weitaus korrosionsbeständiger als Messing mit einem ähnlichen Kupfergehalt. (Davis 2000)

In sauerstofffreiem Wasser wird davon ausgegangen, das Kupfer nicht korrodiert. Mikrobielle Biofilme auf der Oberfläche von Kupfer können zu einer erhöhten Korrosionsrate führen. Es kann durch die Präsenz von Bakterien auf der Kupferoberfläche zu Änderungen im pH-Wert, des Redoxpotentials, enzymatische Reduktion oder Oxidation von Korrosionsprodukten und die Ausscheidung von korrosionsfördernden Stoffwechselprodukten kommen. (Carpen L. et al. 2018) Auch der Bericht der NAGRA kommt zu dem Schluss, dass es zunächst zu einer

gleichmäßigen Korrosion der Behälteroberfläche kommen würde, welche durch den anfänglich eingeschlossenen Sauerstoff und die Zufuhr von Sulfidionen aus dem Wirtsgestein verursacht wird In Salzgestein oder unter anoxischen Bedingungen z.B. in reinem Wasser sei die Korrosion des Kupfers jedoch zu vernachlässigen. (Diomidis und King 2022)

Auch Macdonald und Sharifi-Asl (2011) untersuchten die Korrosionsbeständigkeit von Kupfer in Wasser in Bezug auf den Plan Finnlands und Schwedens dies als Werkstoff für ihren Endlagerbehälter einzusetzen. Sie zeigten, dass Kupfer thermodynamisch in sauerstofffreiem Wasser stabil ist. Diese Stabilität wird nur mit einer hohen Konzentration von Cu^{+}-Ionen und einem hohen Wasserstoffpartialdruck erreicht. Sind Die Cu^{2+} Konzentration und der Wasserstoffpartialdruck gering so kommt es zu Korrosion an der Kupferoberfläche. Zudem muss beachtet werden, dass auch andere Spezies im Grundwasser im schwedischen Endlager in Forsmark vorhanden sind. S^{2-}, HS^{-} und H_2S sind in ausreichend hohen Konzentrationen vorhanden, um das Kupfer korrosiv schädigen zu können. Macdonald und Sharifi-Asl (2011) kommen daher zu dem Schluss, dass die Verwendung von Kupfer in den schwedischen Behältern hinterfragt werden sollte und die Auswirkungen von Versatzmaterialien besser untersucht werden sollten.

Die SKB hat zum Einfluss von Sulfiden ebenfalls eine Studie durchgeführt, in der Cu-OFC Proben zunächst einer regulären Zugprüfung bei Raumtemperatur an Luft geprüft wurden. Um den Einfluss von Sulfiden zu testen wurden die Proben in einem Autoklaven in einer Sulfid haltigen Lösung mit einem pH von 7,2 bei 25° C mit 135 MPa belastet wurden. Nach zwei Stunden wurde das Sulfid durch die Einleitung von Stickstoff in den Autoklaven entfernt. Daraufhin erhöhte sich die Dehnungsrate stark. Die Wasserstoffkonzentration im Kupfer wurde durch Schmelzgasextraktion ermittelt. Und es wurde festgestellt, dass Sulfidexsposition zu einer Erhöhung des Wasserstoffgehaltes im Kupfer führt. (Ikäläinen et al. 2023)

Kupfer gilt als resistent gegenüber Spannungsrisskorrosion (SCC). Dennoch konnte diese unter spezifischen Ionenkonzentrationen nachgewiesen werden. Für die Spannungsrisskorrosion (SCC) von Kupfer unter oxidierenden Bedingungen sind spezifische Ionenkonzentrationen erforderlich: Ammonium benötigt eine Konzentration von etwa 0,1 mol/L, während Nitrit eine Konzentration von 0,001 mol/L erfordert. Acetatkonzentrationen von über 0,4 mol/L fördern ebenfalls SCC. (Svensk Kärnbränslehantering AB 2022)

Johansson A. J. Svensson, D. et al. (2020) untersuchten den Zustand von Kupfer Rohren und Blechen, welche für 20 Jahre im Äspö Hard Rock Laboratory in Bentonit und thermischer Belastung eingelagert wurden. Die Temperaturen lagen dabei zwischen 90 und 150 °C. Der Einfluss von Wasser wurde durch das Anbohren einer Wasserführenden Gesteinsschicht simuliert. Das Experiment war ursprünglich dazu gedacht das Verhalten des Bentonits zu untersuchen. Daher lassen sich die Daten zur Kupferkorrosion nicht durch standardisierte gravimetrische Methoden zum Masseverlust quantifizieren. Zudem wurde ein Standard-Desoxygeniertes-Kupfer (SS 5015-04) und nicht das im KBS-3 verwendete Cu-OFP genutzt. Für die 20 Jahre eingelagerten Proben wurde dabei eine durchschnittliche Korrosionsrate von 0.6 – 1.3 µm festgestellt. Für kürzer eingelagerte Proben waren die Korrosionsraten höher mit 3.7 – 4.8 µm nach 1 Jahr und 1.5 – 2.5 µm nach 6 Jahren. Die Mikrostruktur der Behälterwände erwiesen sich nach einer Untersuchung als homogen, die Struktur im Deckel zeigte jedoch erhebliche Unterschiede in der Desorientierungsverteilung der Körner und der Korngröße. Im Deckel fanden sich beispielsweise größere Unterschiede in der Korngröße, also sehr große aber auch sehr kleine Körner. Es wurden 50 mm Querschnitte von Wand und Deckel betrachtet, welche aus Cu-OF und Cu-OFP gefertigt wurden. Die Korrosion betreffend kommt die SKB zu dem Schluss, dass ich Cu-OFP besser für einen Endlagerbehälter eignet. (Hagström 2023)

Der Bericht der NAGRA aus dem Jahr 2022 beschreibt, dass sich durch den Kontakt von Sulfidionen mit der Kupferoberfläche ein poröser nicht passiver Kupfersulfidfilm bilden würde. Dieser Film sei nicht schützend, minimiere jedoch das Risiko einer lokalen Korrosion. Die genauen Eigenschaften des Filmes hingen von Faktoren wie der Sulfidkonzentratio, der Massentransportrate durch das Bentonit der Chloridkonzentration und der Temperatur ab. Die allgemeine Geschwindigkeit der Korrosion würde während der anoxischen Phase durch die Geschwindigkeit des Transportes von Sulfidionen an die Behälteroberfläche abhängig sen. Diese Geschwindigkeit wird als sehr gering eingeschätzt. Es wird angenommen, dass die Unterschiede des Korrosionsverhaltens von kaltgespritzten Kupferbeschichtungen und elektrolytisch abgeschiedenem Kupfer gering sind. (Diomidis und King 2022)

Auch die ESK (ESK 2021) bewertet das schwedische KSB 3 Konzept welches auf einem Kupferbehälter basiert und kommt zu dem Schluss, dass von der thermodynamischen Stabilität von Kupfer unter anaeroben Bedingungen ausgegangen werden kann.

Bei der Sulfid-induzierten Kupferkorrosion wird die Korrosionsrate durch die Rate des Sulfidtransportes durch den Bentonitpuffer bestimmt, dieser sei so gering, dass er die und die Integrität des Behälters innerhalb des Bewertungszeitraumes von 1 Millon Jahren nicht gefährde. Es sind zudem mikrobielle Prozesse an der Kupfer Bentonit Grenzfläche zu betrachten, die bisher nicht ausreichend untersucht wurden. Bei nahezu neutralem pH-Wert und 75 °C lag die gleichmäßige Korrosionsrate von Kupfer stets deutlich unter 1 nm/Jahr und sank oft über mehrere Jahre auf unter 0,01 nm/Jahr. Niedrige Chlorid- und Schwefelwasserstoffkonzentrationen stimulierten eine kurzzeitige Korrosion auf Kupferoberflächen mit einer Spitzenrate von 0,4 nm/Jahr, die auf einen Oberflächenreifungseffekt zurückzuführen ist. (Senior und Martino 2022)

Unter Bestrahlung in feuchter Luft ist die Korrosionsrate von Kupfer 7 bis 9 mal höher als in unbestrahlten Referenztests. Die Gamma-Dosis am Behälter beträgt durchschnittlich 20 kGy, maximal 70 kGy; die Neutronendosis ist vernachlässigbar. (Svensk Kärnbränslehantering AB 2022)

Im Finnischen Endlager Onkalo soll das radioaktive Inventar in 400-500 m Tiefe in Kristallingestein in Kupferbehältern eingelagert werden, die Rückholbarkeit soll 50 Jahre betragen. (ESK 2017) Sacklén (2017) berichtet über die Einwirkungen von Fremdmaterial auf die Endlagerung welches nicht in allen Fällen entfernt werden kann. Fremdmaterial ist z.B. zur Konstruktion der Endlagerstätte verwendeter Spritzbeton, welcher auch nach der Einlagerung nicht entfernt werden kann. Im Bericht findet sich eine Liste von Materialien welche für das finnische Lager zugelassen und welche nicht zugelassen sind. In Finnland herrscht im Vergleich zu Schweden ein hohes Grundvertrauen der Bevölkerung und Medien in Fachleute, Behörden und Industrie. Es kommt nicht wie in Schweden zur breit diskutierten „Kupferkontroverse“ obwohl beide das KBS-3 Konzept für ihre Endlager anwenden, da die finnischen Medien kaum über die Debatte zur Korrosion an Kupfer berichten. (Lehtonen 2021)

Auch Canada plant Kupfer als Werkstoff für sein Konzept der Einlagerung in Kristallingestein zu verwenden. Dazu soll ein Brennstab-Bündel mit den Maßen 0.1 x 0.5 m wird von einem Kohlenstoffstahlcontainer umgeben, welcher äußerlich mit einer wenigstens 3mm dicken Kupferschicht umgeben ist. Dieser Behälter wird dann in eine 1 x 1 x 2,9 m große Puffer-Box aus verpresstem Bentonit platziert. (Naserifard et al. 2021)

Wie Bereits im Abschnitt über die Eisenbasislegierungen erwähnt wurde im GrimSEL Test Labor im Rahmen des MaCoTe-Experimentes auch das Korrosionsverhalten von Kupfer untersucht. Die Korrosion betrug 0,09-0,24 µm/Jahr. (Reddy et al. 2021)

In Südkorea soll ähnlich zum schwedischen Behälterkonzept ein Kupferbehälter aber durch additive Fertigung hergestellt werden. Im Prototypen wurden reines Kupfer, Cu-10Sn und Cu-10Ni angewendet. (Lee et al. 2024)

Bezüglich der Verarbeitung von Kupfer und dem Verschluss eines Kupfer Endlagerbehälters hat die SKB eine Studie zum Schweißen von Kupfer durchgeführt. Dabei wurden das Rührreibschweißen und das Elektronenstrahlschweißen verglichen. Hinsichtlich der Korrosion zeigte, dass die Schweißnaht des Rühreibschweißens eine geringere Korrosionsrate als die des Elektronenstrahlschweißens aufweist. Zwischen Schweißmaterial und Basismaterial der Reibrührschweißnaht konnte keine Bildung einer Anode festgestellt werden. Die Bildung von Anoden führt zu lokaler Korrosion. Durch das Reibrühr-Werkzeug werden kleinste Metallpartikel in die Schweißnaht eingebracht, diese beeinflussten die Korrosionsbeständigkeit jedoch nicht negativ. (Gubner und Andersson 2007)

Weiterhin sollte für die genauere Betrachtung der Sulfid Korrosion die Konzentration im Grundwasser, der Klüftungszustand des Kristallingesteins und Szenarien von eindringendem glazialem Schmelzwasser durch die Bentonitbarriere, betrachtet werden

4.2.3 Nickelbasislegierungen

Hochlegierte Nickelbasislegierungen werden auch als Superlegierungen bezeichnet, ihre Warmfestigkeit basiert auf den kohärenten NI_3Al Ausscheidungen die für eine Behinderung der Versetzungsbewegungen sorgen, einer hohen Mischkristallhärte und Korngrenzenverfestigung. (Adam 1998)

Nickel ist korrosionsbeständig, geeignet für Hochtemperaturanwendungen und spielt aufgrund seiner magnetischen und elektrischen Eigenschaften eine wichtige Rolle in der Elektrotechnikindustrie.
Nickel wird auch in Akkumulatoren z.B. Nickel-Cadmium Batterien verwendet. Unterschiedliche Industrien haben Anwendungen für Nickel und seine Legierungen, so wird findest es in den Prozessen der Chemischen Industrier, der Luft und Raumfahrttechnik, sowie anderen Produktionsprozessen Anwendung, als auch in der Medizin und der Verarbeitung von Metallen. (Davis 2000)Nickel ist korrosionsbeständig, geeignet für Hochtemperaturanwendungen und spielt aufgrund seiner magnetischen und elektrischen Eigenschaften eine wichtige Rolle in der Elektrotechnikindustrie. Das meiste Nickel wird als Legierungselement in rostfreiem Stahl verwendet, in den USA sind dies beispielsweise 55 % des Nickelverbrauchs. Nickel wird auch in Akkumulatoren z.B. Nickel-Cadmium Batterien verwendet. Unterschiedliche Industrien haben Anwendungen für Nickel und seine Legierungen, so wird findest es in den Prozessen der Chemischen Industrier, der Luft und Raumfahrttechnik, sowie anderen Produktionsprozessen Anwendung, als auch in der Medizin und der Verarbeitung von Metallen. (Davis 2000)

Im Yucca Mountain Project wurde die Legierung Alloy 825 (21 % Cr, 3% Mo, 2% Cu, 1%Ti, 42% Ni) in verschiedenen Behälterdesigns unter anderem als korrosionsfeste 9,5 mm Behälterinnenschicht verwendet. In späteren Behältermodellen wurde Alloy 22 (22% Cr, 13 % Mo, 3 % W, 58 % Ni, 3 % Fe), eine weitere Nickelbasislegierung verwendet. (Rechard und Voegele 2014)I

Nickel und seine Legierungen sind eine wichtige Klasse der Konstruktionswerkstoffe, da sie über ausgezeichnete Eigenschaften bei hohen Temperaturen, wie Korrosionsbeständigkeit, Härte und Ermüdungsbeständigkeit verfügen und dabei um einiges günstiges als die Co-Basis-Legierungen sind. Die geringe Stapelfehlerenergie und das kfz-Gitter mit dem niedrigen Diffusionskoeffizienten bieten gegenüber dem krz-Eisen den Vorteil einer höheren Rekristallisationstemperatur, die dementsprechend Anwendungen auch oberhalb 600◦C zulässt. Da Nickel insbesondere mit Chrom im Mischkristall über eine ausgezeichnete

chemische Beständigkeit verfügt, ist es als Basiselement für naß- und hochtemperaturbeständige Legierungen von Interesse. Diese Eigenschaften machen diese Legierungen sehr attraktiv für eine Vielzahl von technischen Anwendungen, einschließlich in der chemischen Industrie sowie der Herstellung und Reparatur von Dampfturbinen sowie vielen anderen Bauteilen, die hohen Temperaturen ausgesetzt sind. Als Hauptlegierungselemente werden Chrom, Eisen, Kohlenstoff, Bor und Silizium eingesetzt (Berns 1998b).

Ihre Härte erreichen die Legierungen auf Nickel-Basis sowohl durch Ausscheidung von Nickelboriden und -siliciden als auch durch Chromboride und -carbide (Gurumoorthy et al. 2007). In der Hauptsache wird in den Legierungen auf Ni-Basis Bor als Metalloid zur Hartphasenbil- dung genutzt. Die Mikrostruktur von Borhaltigen Legierungen besteht aus Boriden und Nickelboriden vom Typ in Ni-reichen Matrices. Bei einem niedrigen Chromgehalt sind die Nickelboride Ni3B die hauptsächliche Hartphase in dieser Legierung. Mit der Zunahme des Chromanteils werden die Nickelboride sukzessiv durch Chromboride (CrB, Cr2B, Cr3B2) ersetzt. Chromborid tritt in Form von CrB bei geringen und in Form von Cr5B3 bei hohen Chromanteilen auf. Silicium (Si) ist ebenso ein wichtiges Matrixelement, das hauptsächlich als selbstfliessendes Element fungiert und als inter- metallischer Verbund Ni3Si zurückbleibt. Während Silizium unterhalb 600◦C effektiv ist, zeigt Chrom seine Wirksamkeit besonders bei Temperaturen oberhalb 600 °C. Aus diesem Grund sind hochwarmfeste Legierungen auf Ni-Basis in der Regel mit Chrom legiert. So werden als Basis für Metall-Matrix Verbundwerkstoffe häufig Metallpulver mit 20 % Chrom eingesetzt. Besonders wirksam ist auch die Kombination von Chrom und Silizium, wie sie bei den Legierungen des Systems Ni-Cr-Si-B ausgenutzt wird. In der Metallmatrix finden sich bis zu 8% Cr und 4.5% Si, die die Härte bei Raumtemperatur auf bis zu 450 HV0.05 anheben. Durch die Elemente Bor und Silizium kann der Schmelzpunkt von Nickel-Basis-Systemen auf bis 1000 ◦C gesenkt werden. Dies ist vor allem bei der Zugabe zusätzlicher Hartstoffe vorteilhaft, da diese durch die geringere Wärme, die zum Aufschmelzen der Matrix notwendig ist, weniger belastet werden und so Zersetzungserscheinungen reduziert werden können (Berns 1998a).

Carbid-Legierungen haben eine ausgezeichnete Beständigkeit gegen Abrasion, fressendem Verschleiß, Schlagbeanspruchung und Korrosion. In dieser Hinsicht sind diese Legierungen besser geeignet als boridhaltige Ni-Basis-Werkstoffe. Diese Legierungen enthalten auch komplexe Carbide wie M7C3 und M6C. Es hat sich herausgestellt, dass Co-Basis-Legierungen Quellen für radioaktive Co-Isotope sind. Aus diesem Grund wurden Carbid-haltige Legierungen auf Nickel-Basis entwickelt.

Neuere Entwicklungen verwenden zum Teil aus Kostengründen, vor allem zur Eigenschaftsverbesserung Hartphasen anderer Elemente. Carbide, Boride und Nitride der Elemente Vanadium, Niob, Molybdän und Wolfram werden zunehmend wichtiger, zumal ihre Härte meist deutlich oberhalb der Härte der Chromcarbide liegt und da- durch gleichzeitig Chrom in ausreichenden Gehalten zum Schutz der Metallmatrix vor korrosivem Angriff belassen werden kann. (Berns 1998b)

Nickel-Legierungen liefern ebenso eine gute Verschleiß- und Korrosionsbeständigkeit wie die Cobalt-Legierungen, sind aber um einiges günstiger als diese. Auch im Bereich der Legierungen auf Nickel-Basis kann Deloro Stellite als Marktführer betrachtet werden. Aber auch Wall Colmonoy (Wall Colmony) hält einige Patente für Ni-Basis-Legierungen und hat darüber hinaus einige in der Literatur genutzte Referenzwerkstoffe im Portfolio. Unter den Nickel-Basis-Legierungen werden meistens die verschiedenen Deloro Legierungen verwendet. Die Deloro Legierungen (Tabelle 13) sind Ni-basierte Hartlegierungen, deren Härte bis zu 62 HRC erreicht, was diese Werkstoffe zu idealen Verschleißwerkstoffen macht. Die Temperaturbeständigkeit der Deloro Legierungen liegt etwas unterhalb der Stellite

Legierungen, dagegen ist die Korrosionsbeständigkeit in Natronlauge und ähnlichen Medien aber hervorragend, weshalb Beschichtungswerkstoffe auf Nickel-Basis häufig in der Petrochemie und der Textil- und Papierindustrie eingesetzt werden. Unter anderem werden sie für Formen von Glaskolben, Dieselmotorventilen, für den Verschleißschutz- und für Dichtungsringe, Pressformen, Formen, Wellen, Lager, Zylinderlaufbuchse, Hülsen, Spindelführungen usw. verwendet (Badisch und Roy 2013).

Tabelle 13: Zusammensetzung der gängigsten Zusatzwerkstoffe vom Typ Deloro (Kennametal Stellite GmbH)

Bezeichnung	C [%]	Cr [%]	Co [%]	Si [%]	B [%]	Fe [%]	Ni [%]	Härte [HRC]
Deloro 25	0,05	–	–	2,7	1,8	–	Rest	25-28
Deloro 30	0,15	7,0	–	3,4	1,2	3,0	Rest	27-30
Deloro 40	0,25	7,5	–	3,5	1,7	2,5	Rest	38-42
Deloro 50	0,45	11,0	–	4,0	2,3	3,0	Rest	48-52
Deloro 60	0,7-0,9	15,0	–	4,3	3,5	3,5	Rest	58-62

Nistelle Legierungen sind Ni-Basis-Legierungen, die speziell für den Einsatz gegen aggressive Chemikalien und bei korrosiven Medien entwickelt wurden. Der hohe Chrom- und Molybdängehalt gewährleistet diese exzellenten Eigenschaften (Tabelle 14). In Europa nicht ganz so verbreitet, in den USA allerdings im Bereich der Nickel- Legierungen stark vertreten, ist die Wall Colmonoy Corporation mit Sitz in Madison Heights (Wall Colmony). Die unter dem Handelsnamen Colmonoy verfügbaren Legierungen auf Ni-Basis werden zu Forschungszwecken ähnlich wie die Legierungen vom Typ Deloro von Deloro Stellite als Referenzwerkstoffe herangezogen. Colmonoy 56, 83 und 88 (Tabelle 15) werden sehr häufig eingesetzt (Wu und Wu 1996). Die Legierung Colmonoy 56 besteht hauptsächlich aus einer Mischung aus Ni, Cr und B.

Tabelle 14: Zusammensetzung der gängigsten Zusatzwerkstoffe vom Typ Tribaloy und Nistelle (Kennametal Stellite GmbH)

Bezeichnung	C [%]	Cr [%]	Co [%]	Mo [%]	sonstiges [%]	Fe [%]	Ni [%]	Härte [HRC]
Tribaloy T-700	–	15,5	–	32,5	–	–	Rest	25-28
Nistelle C	–	16,5	<2,5	17,0	4,5 W	5,5	Rest	27-30
Nistelle 625	–	21,5	–	9,0	3,6 Nb	–	Rest	38-42
Nistelle 718	0,6	19,0	–	3,0	[1]	–	Rest	48-52

Als Verstärkungsphase sind harte Partikel, wie Chromcarbid und Chromborid, enthalten. Das Gefüge weist ein sehr feine Mikrostruktur auf und ist aus drei Phasen aufgebaut. Die Nickel-Mischkristallmatrix zeigt Spuren von Chrom und Eisen. Darin eingebettet ist die hauptsächlich aus Chrom bestehende Hartphase (Chromboride). Zudem ist noch dendritisches Wachstum in Form von nadelartigem Chrom- und Nickelcarbid zu erkennen. Colmonoy 83 besteht hauptsächlich aus den Elementen Ni, W, Cr und C. Hier tragen die in der Ni-Cr-Matrix verankerten Chrom- und Wolframcarbidpartikel zur Verschleißfestigkeit bei. Die Festigkeit von Colmonoy 88 ist auf die Ausscheidung von Wolfram- und Chromcarbiden in der Ni-W-Cr-Matrix zurückzuführen.

Tabelle 15: Zusammensetzung der gängigsten Zusatzwerkstoffe vom Typ Colmonoy (Wall Colmony)

Bezeichnung	C [%]	Cr [%]	W [%]	Si [%]	B [%]	Fe [%]	Ni [%]	Härte [HRC]
Colmonoy 4	0,55	13,00	–	3,90	1,40	4,00	Rest	30-42
Colmonoy 56	0,90	18,00	–	5,30	1,90	5,40	Rest	46-58
Colmonoy 83	1,90	20,30	33,90[2]	1,70	1,00	1,40	Rest	43-55
Colmonoy 88	0,80	15,00	16,50	4,00	3,00	3,50	Rest	59-64

Vor allem die Zugabe von Wolframcarbid (WC) oder Wolframschmelzcarbid (WSC) verspricht eine extreme Verbesserung der Hartlegierungen auf Ni-Cr-B-C-Basis. Wahrscheinlich aus dem Grund, dass die Basislegierungen in hoher Qualität von den führenden Wettbewerbern, wie Deloro Stellite und Colmonoy, zu beziehen sind, haben sich mittlerweile einige Anbieter von Pulverwerkstoffen mehr oder weniger auf Legierungen diesen Typs spezialisiert. Hierzu zählt beispielsweise Oerlicon Metco (Oerlicon Metco), das mit den Zusatzwerkstoffen des Typs PlasmaDur vor allem auf die Verwendung von WC und WSC in MMCs setzt. PlasmaDur 51022 und PlasmaDur 51027 enthalten gleichverteiltes Wolframschmelzcarbid (WSC) und eine selbstfließende Ni-Basis-Legierung. Die Wolframcarbide haben eine Härte von 1.900 bis 2.200 HV0,1. Mit einer Härte der NiBSi-Matrix von 50 HRC liefert die Legierung eine sehr gute Abrasionsbeständigkeit bei noch ausreichender Schlagbeständigkeit. Die Legierungen kommen unter anderem für Bohrinstrumente in der Ölindustrie und bei Erdarbeiten zum Einsatz, wo keine besonders hohe Korrosi- onsfestigkeit gefragt ist. PlasmaDur 51937 und PlasmaDur 53003 beinhalten wie die Legierungen PlasmaDur 51022 und PlasmaDur eine NiBSi-Matrix. Allerdings setzen sich beide Legierungen aus sphärischem Wolframcarbid zusammen, was ihnen eine extrem hohe Härte und Abrasionsbeständigkeit verleiht. 51027 PlasmaDur 51122 enthält Mono-Wolframcarbid. Die NiCrBSi-Matrix weist zwar ebenfalls eine Härte von 50 HRC auf, die Legierung eignet sich aber besser für Ölsande-Anwendungen und im Braunkohletagebau. PlasmaDur 51302 und PlasmaDur 51322 Beschichtungen haben mit 30 HRC die weichste Matrix, was sie für einen Einsatz bei hohen Schlagbeanspruchungen und geringen Abrasionsbelastungen auszeichnet. Beide Legierungen werden vor allem im Bergbau beispielsweise für Schüttelsiebe und der Ausrüstung in Steinbrüchen eingesetzt. Die Legierung PlasmaDur 51142 ist mit einer Matrix-Härte von 40 HRC für eine gute Abrasionsbeständigkeit und einer angemessenen Festigkeit gegen Schlagbeanspruchungen ein Kompromiss der Produkte.

Tabelle 16: Zusammensetzung der PlasmaDur Schweißprodukte von Oerlicon Metco (Oerlicon Metco)

	Phase %	W	C	Fe	Phase %	Ni	Cr	B	Si	C	Fe
PlasmaDur 51022	60	Bal.	3,8-4,1	<0,30	40	Bal.	–	3,0-3,3	2,8-3,2	<0,03	<0,30
PlasmaDur 51027	60	Bal.	3,8-4,1	<0,30	40	Bal.	–	3,0-3,3	2,8-3,2	<0,03	<0,30
PlasmaDur 51122	60	93,8-94,0	6,0-6,2	–	40	Bal.	9,5-12,5	2,0-2,5	3,5-4,2	0,3-0,6	<1,5
PlasmaDur 51142	60	93,8-94,0	6,0-6,2	–	40	Bal.	6,9-8,2	1,5-1,8	3,2-3,8	0,2-0,4	<1,5
PlasmaDur 51302	65	93,8-94,0	6,0-6,2	–	35	Bal.	6,0-7,8	1,0-1,6	3,7-4,5	0,2-0,6	<1,5
PlasmaDur 51322	60	93,8-94,0	6,0-6,2	–	40	Bal.	5,0-6,5	0,8-1,2	3,8-4,3	0,2-0,5	<1,5
PlasmaDur 51937	60	95,8-96,5	3,5-4,2	–	40	Bal.	–	2,9-3,4	2,7-3,3	<0,01	–
PlasmaDur 53003	60	Bal.	3,7-3,9	<0,30	40	Bal.	–	3,0-3,3	2,8-3,2	<0,03	<0,30

4.2.4 Aluminiumbasislegierungen

Aluminium bildet wie beispielsweise Titan und Zirkonium eine Passivierungsschicht aus die zu einer guten Korrosionsbeständigkeit führt. Aluminium hat ein geringes Gewicht und eine gute Wärmeleitfähigkeit von 80-130 W/m · K, daher wird es z.B. in Kühlkörpern für elektronische Geräte verwendet. Es kann mit einer Reinheit von 99,99% hergestellt werden. Als Legierungselemente werden hauptsächlich Kupfer, Magnesium, Silizium Zink und Mangan

verwendet. (Sitzmann 2004; Kammer 1995; Drossel, G. Friedrich, S. et al. 2018; Kammer 2014)

Aluminiumwerksstoffe werden in Serien eingeteilt ihre Anwendungen und Eigenschaften sind in Tabelle 17 aufgeführt.

1000er Serie	mindestens 99% Al	korrosionsbeständig	elektrische und chemische Anwendungen	Al1050
2000er Serie	+ Kupfer	stark?	Luft und Raumfahrt	Al 2024
3000er Serie	+ Mangan	korrosionsresistent	Getränkedosen	Al 3003
400er Serie	+ Si	gut Gieß und Schweißbar	Automobil	Al4045
5000er Serie	+ Mg	Festigkeit+ Korrosionsbeständigkeit	maritime Anwendungen	Al5083
6000er Serie	+ Mg + Si	„Vielseitig“	Bau, strukturelle Anwendung	Al 6061
7000er Serie	+ Zn + (Cu)		Luft und Raumfahrt + Motorsport	Al7075

Tabelle 17 Aluminiumlegierungsserien (Sitzmann 2004)

Bisher werden Aluminium und seine Legierungen nicht für die Verwendung in einem Endlagerbehälter betrachtet. Seine Eignung als Legierungselement für Kupfer wurde in einer Aluminiumbronze (CDA 613, Al 6-8,5 %, Fe 2-4 %, Rest Cu) wurde von van Konynenburg et al. (1993) untersucht und die Eigenschaften bezüglich Korrosion und Eignung für den Endlagerbehälter als „unvorhersehbar“ beschrieben.

4.2.5 Titanbasislegierungen

Titan hat ein hohes Verhältnis von Festigkeit zu Gewicht, was es zu einem idealen Werkstoff für Anwendungen macht, bei denen Gewichtseinsparungen entscheidend sind. Titan ist sehr korrosionsbeständig gegenüber Seewasser und anderen chloridhaltigen Medien. Einige Titanlegierungen sind für Hochtemperaturanwendungen geeignet. Aufgrund dieser Eigenschaften werden Titanlegierungen vor allem in der Luft und Raumfahrttechnik, Automobilindustrie, der chemischen Industrie und aufgrund der hohen Biokompatibilität auch in der Medizintechnik verwendet. (HWN Titan)

Die größten Reserven von Titan in Form von Ilmenit und Rutil finden sich in Australien und China. Insgesamt belaufen sich die Reserven auf über 2 Milliarden Tonnen. (U.S. Geological Survey 2024)

Titanlegierungen werden in Alpha- und Beta-Legierungen unterteilt.

Alpha Legierungen enthalten beispielsweise Aluminium und Stickstoff und eignen sich für Hochtemperaturanwendungen, sie sind schwierig zu bearbeiten.

Beta Legierungen enthalten Molybdän, Niob oder Vanadium und sich leichter zu bearbeiten als Alpha-Legierungen. Alpha-Beta Legierungen kombinieren die Eigenschaften von Alpha und Beat Legierungen und werden am häufigsten angewendet, dazu zählt Beispielsweise die Ti-6Al-4V (Titan Grade 5).

Reintitan wird in unterschiedliche Grades eingeteilt. In den nachfolgenden Tabellen 18 und 19 werden die Eigenschaften beschrieben (HWN Titan).

Grade	Beschreibung	Verwendung	Produktformen	Wärmebehandlung		Schweißen
				Weichglühen	Spannungsarm glühen	
1	Reintitan hohe Korrosionsbeständigkeit durch passivierende Oxidschicht See und Meerwasser-beständig	Wärmetauscher, maritime Anw.; Galvanik, Medizintech., Motorsport, Outdoor	Rohr, Draht, Stab, Blech, Platte	600 -700 °C (Schutzgas oder Vakuum)	450 – 600 °C (ca. 8 h) (Schutzgas oder Vakuum)	MIG und WIG mit Reinargon, Plasma, Laser- oder Elektronenstrahl-schweißen
2	Wie grade 1 aber wird auch in Chemie und Petrochemischen Anlagen verwendet	Wärmetauscher, maritime Anw.; Galvanik, Medizintech., Motorsport, Outdoor, Chemie				
3	Wie grade 1	Chemische Industrie, Luft und Raumfahrt, Medizintechnik				Lässt sich wie Grade 1 und 2 verwenden, aber nicht so gut verarbeiten
4						
5	meistverwendete Titanlegierung, hohe Festigkeit bei geringer Dichte, Meerwasser-beständig, biokompatibel, beständig ggü. Korr. Medien	Luft- und Raumfahrt, Medizintechnik, Turbinen, Ultraschallanwendungen, Motorsport, Sportausrüs-tung	Draht, Stab, Blech, Platte	650-750 °C (Schutzgas oder Vakuum)	450 – 600°C (ca. 8 h) (Schutzgas oder Vakuum)	MIG und WIG mit Reinargon, Plasma, Laser- oder Elektronenstrahl-schweißen
7	Niedrig legierter Titanwerkstoff mit Pd,Ni, Mo, Verbesserte Beständigkeit ggü. Chloridhaltigen Lösungen	Hauptsächlich chemische Industrie	Rohr, Draht, Stab, Blech, Platte	650-750 °C (Schutzgas oder Vakuum)	450 – 600 °C (Schutzgas oder Vakuum)	MIG und WIG mit Reinargon, Plasma, Laser- oder Elektronenstrahl-schweißen
9	Alpha-Legierung	Besonders in der Luft und Raumfahrtindustrie	Rohr, Draht, Stab, Blech, Platte, Gussteile			
12	Legierung mit Ni und Mo erhöhte Beständigkeit ggü. Reduzierenden Lösungen und verringerung von Spaltkorrosion in chloridhaltigen Lösungen	Chemische Industrie und Druckbehälterbau	Band, Blech, Roh, Schmiede und Gussteile			
23 (=5Eli)	Wie Titan Grade 5 „Extra low Interstitials" die gehalte an interstitiellen Elementen und Fe werden besonders niedrig gehalten	in Meerwasser, Medizintech., Mikromechanik, Uhrwerkkomponenten, Schmuck, Verschleißtiel, Energietechnik, Luft- und Raumfahrttechnik	Stäbe, Bleche … Stäbe, Bleche …	700-840 °C	550 -700 °C	

Tabelle 18 Titan: Reintitan: Grades, Anwendungen und Verarbeitung (HWN Titan)

Grade (ISO)	UNS	N % max	C % max	H % max	Fe % max	O % max	Al %	Mo %	Ni	Pd %	V %	Sonstige % max
1	UNS R50250	0,03	0,10	0,015	0,20	0,18						0,10
2	UNS R50400	0,03	0,08	0,015	0,30	0,25						0,10
3	UNS R50550	0,05	0,08	0,015	0,30	0,35						
4	UNS R50700	0,05	0,08	0,015	0,50	0,40						
5	UNS R56400	0,05	0,08	0,015	0,08	0,20	5,50-6,75				3,50-4,50	
7	UNS R52400	≤ 0,03	≤ 0,08	≤ 0,015	≤ 0,30	≤ 0,25				0,12-0,25		
9	UNS R56320	0,03	0,08	0,015	0,25	0,15	2,50-3,50				2,00-3,00	
12	UNS R53400	0,03	0,08	0,02	0,30	0,25		min. 0,20 max. 0,40	min. 0,60 max. 0,90			

Tabelle 19 Reintitan in der Grade-Einteilung: Zusammensetzung (HWN Titan)

Titan wird in nuklearen Anwendungen in der Regel als Strukturmaterial in Brennstoffkreislaufanalgen oder Behältern für den Transport oder die Lagerung von Nuklearen Abfällen verwendet. (Leal et al. 2011)

Lukens und Saslow (2017) untersuchten wie sich das Spaltprodukt Tc-99 in eine stabile Abfallform überführen lassen könnte, sie wählten dafür eine Immobilisierung durch Titanoxid. Dazu wurde mit Technetium dotiertes Titanpulver in wässriger Lösung mit Ammoniumflourid oxidiert. Tc löst sich leicht aus mit Borosilikat verglasten Abfällen. Daher soll Tc in Titanoxid immoblisiert werden, da das Tc von seiner atomaren Größe, das Ti gut im Gitter ersetzen kann.

Im Yucca Mountain Project kamen die drei Legierungen Titan grade 12, C-4 und 825 in Betracht für ein „drip-shield“. Dieser Tropfschutz wird aus 15 mm Titan über dem Behälter angebracht. (van Konynenburg et al. 1993)

2004 untersuchten (Hua et al.) wie sich Titanlegierungen unter Endlagerbedingungen verhalten. Sie kamen zu dem Schluss, dass Korrosion, Wasserstoffinduzierte Rissbildung und durch Strahlung verursachte Korrosion innerhalb von 10.000 Jahren nicht zu einem Versagen der Barrierefunktion eines Behälters aus Titan Grade 7 führen. Spannungsrisskorrosion hätte dabei keinen Einfluss auf die Barrierefunktion. Es sei nicht zu erwarten, das lokale oder mikrobiell verursachte Korrosion auftreten würden.

Im KBS-3H Konzept wurde Reintitan als Alternative zu Stahl für einen Supercontainer vorgeschlagen, da Titan eine Korrosionsrate von weniger als 1 nm/a unter einem breiten Spektrum von pH und Temperaturen aufweist. Untersucht wurde die Interaktion von Titan mit Bentonit und anderem Tongestein. Es konnte keine signifikanter Übergang von Titan in das Gestein festgestellt werden. Der Aufbau sollte jedoch für ein Folgeexperminet optimiert werden, da alle Gesteine auch vorher schon Titanverbindungen enthalten haben und diese nicht von den möglicherweise übergetretenen Spezies unterschieden werden können. (Paul Wersin et al. 2010)

Mattsson (1981) erwog Titan für einen Schwedischen Endlagerbehälter, dafür wurden Reintitan Grade 3 (Ti-50A), ATi-24 (unlegiertes Titan mit max. 0,05 % Fe, 0,05 % C, 0,01 % O; 0,03 % H); Titan Grade 7 (Ti 0.2Pd) und Titan Grade 12 (Ti -12) untersucht. Dazu wurden sie in Seewasser und NaCl Lösungen bei 250 °C eingelegt. Es wurde eine uniforme Korrosionsrate festgestellt, die sich mit zunehmender Temperatur erhöhte. Bei Titan Grade 12 und 7 wurde keine Lochfraß- oder Spaltkorrosion festgestellt. Titan Grade 3 wies bei einer Temperatur Spaltkorrosionserscheinungen auf. Titan reagiert zudem empfindlich auf Wasserstoff, sobald die Löslichkeit überschritten wird (20 ppm bei Raumtemperatur) bilden sich Hydride, diese können zu Wasserstoffversprödung führen. Der genaue Mechanismus der

Wasserstoffversprödung wurde an dieser Stelle nicht untersucht sollte jedoch betrachtet werden, wenn Titan als Endlagerbehältermaterial in Erwägung gezogen wird.

4.2.6 Zirkonium-Basislegierungen

Zirkonium und Titan ähneln sich in vieler Hinsicht. Zirkonium ist ein chemisches Element mit dem Symbol Zr und der Ordnungszahl 40. Es gehört zur Gruppe der Übergangsmetalle. Ähnlich wie Titan ist Zirkonium resistent gegenüber vielen Säuren, Basen und Salzen. Daher kann es in vielen aggressiven Umgebungen eingesetzt werden. Zirkonium hat mit 1855 °C eine sehr hohe Schmelztemperatur und ist damit gut für Hochtemperaturanwendungen geeignet. Der geringe Neutroneneinfangquerschnitt ist in der Anwendung als Hüllrohr für Brennstoff in Kernreaktoren wichtig, da der Neutronenfluss durch das Zirkonium nicht wesentlich eingeschränkt wird. Zirkonium ist duktil und hat eine gute Festigkeit. Es wird in der Kerntechnik als Hüllrohr der Brennelemente angewendet. In der chemischen Industrie wird Zirkonium in chemischen Reaktoren und Wärmetauchern aufgrund seiner Beständigkeit gegenüber aggressiven Medien eingesetzt. In der Medizintechnik dient Zirkonium in Prothesen und chirurgischen Instrumenten verwendet, da es besonders biokompatibel ist. Zirkonium wird außerdem in Hochleistungslegierungen verwendet um die Korrosionsbeständigkeit und Stabilität unter extremen Bedingungen zu erhöhen. (Hornbogen et al. 2019a; Oelkers 2023; Arnold 2019)

4.2.7 Cobalt-Basis-Legierungen

Cobalt-Basis-Legierungen zeichnen sich durch ihre ausgezeichnete Widerstandskraft gegenüber Korrosion, Erosion und Abrasion sowie gegen Verschleiß aufgrund der Reibung von Metall-auf-Metall auch bei sehr hohen Temperaturen aus. Im Vergleich mit Legierungen auf Ni-Basis weisen die Legierungen auf Co-Basis eine überlegene Schweißbarkeit und Temperaturwechselbeständigkeit auf. Zudem können sie im Gegensatz zu den Nickel-Basis- und Eisen-Basis-Legierungen auch an der Luft und unter Argon Umgebungen aufgeschmolzen werden (Ahn 2013). Die Hauptkomponenten der Legierungen auf Co-Basis sind Chrom (Cr), Wolfram (W) und Kohlenstoff (C). Chrom ist als eines der Hauptlegierungselemente einer der wichtigsten Carbidbildner in Co-Basis-Werkstoffen und verbessert die Oxidations- und Korrosionsbeständigkeit in hohen Temperaturbereichen. Zusätzlich sind Wolfram- und Molybdän für die Carbidbildung verantwortlich. Wolfram-, Molybdän- und Kohlenstoff-Anteile verfestigen die Co-Basis-Legierungen und verbessern die Verschleißeigenschaften. Die Warmfestigkeit des Elements Cobalt bei Anwendungstemperaturen oberhalb 700◦C ist auf die sehr geringe Stapelfehlerenergie zurückzuführen. Dadurch wird einerseits ein hohes Maß an Verfestigung erreicht und andererseits der Erholungs- und Rekristallisationsbeginn zu höherer Temperatur verschoben, sodass Entfestigungsprozesse in ihrem Ablauf effektiv behindert werden. D'Oliveira, Vilar und Feder (2002) konnte zeigen, dass selbst zyklische Temperaturwechselbeanspruchungen im Bereich von 20 bis 1050 ◦C Co-Basis-Beschichtungen nicht verändern und die ursprüngliche Härte konstant bleibt. Das kubisch-flächenzentrierte (kfz) α-Co wandelt bei 420°C in ein hexagonal-dichtest-gepacktes (hdp) Gitter um. Dieses ϵ-Cobalt weist bereits ohne Legierungszusätze eine Härte von 240 HV0.05 auf und eignet sich daher im Gegensatz zu Eisen und Nickel auch als reines Matrixelement ohne weitere Zusätze. So wird reines Cobalt gerne als Metall-Matrix in Diamantwerkzeugen für die Steinbearbeitung eingesetzt (d'Oliveira et al. 2002; Kashani et al. 2007).

Die α-Phase bietet gitterbedingt die besseren Verformungseigenschaften. Wie beim System Fe-C handelt es sich beim Transformationsvorgang um ein martensitisches Umklappen des Gitters. Die metastabile α-Phase liegt nach der Abkühlung noch ganz oder teilweise im Gitter vor, da auf Grund der Umwandlungsträgheit des Cobalts die Temperatur, bei der die Martensitbildung abgeschlossen ist, unterhalb der Raumtemperatur liegt. Im Fall der Verschleißbeanspruchung kann die, im Vergleich zum ϵ-C, duktilere Phase spannungsinduziert in die dhp-Phase umwandeln. In der Regel wer- den substitutionell

eingelagerte Legierungselemente zur Mischkristallhärtung benutzt, von denen Chrom, Molybdän und Wolfram, die hexagonale ϵ-Phase stabilisieren. Im Gegensatz dazu begünstigen die Elemente Eisen, Nickel und Mangan die kubische α-Phase und erhöhen die Stapelfehlerenergie. Da technische Co-Basis-Legierungen bis zu 30% Chrom, bis zu 15% Wolfram und bis zu 8% Molybdän enthalten, sind deren Metallmatrizes meist Phasengemische aus α- und ϵ-Cobalt. Molybdän und Wolfram wirken sich positiv auf die Warmfestigkeit aus, da ihre Atomradien sehr viel größer sind als die des Co-Atomes. Auf diese Weise behindern sie die Bewegung von Versetzungen, sodass eine Erholung erst bei wesentlich höherer Temperatur ablaufen kann (Shin et al. 2003).

Hartlegierungen und -verbundwerkstoffe auf Co-Basis entstammen hauptsächlich dem System Co-Cr-W-C und sind die meist verbreitetsten Legierungen zum Auftragschwei- ßen von Werkzeugstählen. Diese Legierungen, die mit dem Handelsnamen Stellite bezeichnet werden, enthalten variierende Mengen an Kohlenstoff und Wolfram oder Kohlenstoff und Molybdän, um die Härte und andere Eigenschaften zu verändern. Die Verschleißfestigkeit wird durch die Bildung von Carbid und dessen Volumenanteil, Größe und Verteilung unterstützt. Grundsätzlich unterscheiden sich die Legierungen auf Co-Basis in der enthaltenen Kohlenstoffmenge, in deren Abhängigkeit die Legierungen entweder untereutektisch, eutektisch oder hypereutektisch erstarren. In untereutektischen Legierungen (Stellite 6 und Stellite 21), insbesondere in denen mit niedrigem Kohlenstoffgehalt, tritt duktiles Chromcarbid in der Regel in Form von $M_{23}C_6$ auf. Dadurch kann die Verschleißfestigkeit von Metall-gegen-Metall Paarungen und gegen Kavitationserosion verbessert werden. In einigen der Legierungen ist ein Netzwerk von eutektischen Co-M_7C_3 vorhanden (Stellite 12). Diese Legierungen haben eine begrenzte Duktilität, zeigen aber eine verbesserte Verschleißfestigkeit gegen Abrasion. Ab einem Kohlenstoffanteil von 2 % (Stellite 1) erstarren die Co-Basis-Legierungen überteutektisch. Damit werden Härte und Verschleißbeständigkeit wesentlich vom Kohlenstoffanteil in der Legierung beeinflusst (Mellor 2006).

Die unter dem Handelsnamen Stellite des Unternehmens Deloro Stellite (Kennametal Stellite Group) bekannten Cobalt-Basis-Legierungen sind die gängigsten und erfolgreichsten Legierungen, die gleichzeitig auch die besten Allround-Eigenschaften aufweisen. Die Co-Legierungen weisen eine hervorragende Verschleiß, Kaltverschweißungs-, Korrosions- und Erosionsbeständigkeit auf. Ihre gute Verarbeitbarkeit und die Fähigkeit, ihre Eigenschaften bei hohen Temperaturen beizubehalten, machen diese Legierung für viele Industriezweige äußerst nützlich (Kennametal Stellite GmbH). Mit diesen Eigenschaften sind sie prädestiniert für Einsätze im Motoren und Armaturenbau oder auch in der Holzindustrie. Stellite 1 und Stellite 6 (Tabelle 20) werden so beispielsweise für Ventilsitze (Abbildung 10) und die Armaturen der Ventile, Wellen und Buchsen von Pumpen sowie für Lager und deren Buchsen eingesetzt. Höher legierte Arten von Stellite sind für Sägezähne, Schienen von Motorsägen, rotierende Schneidemaschinen, Schneidkanten von Teppichmessern und die Papier- und Kunststoffindustrie (Abbildung 104). Stellite 701, 704, 706, usw. kommen bei Anwendungen mit einer überdurchschnittlich hohen Verschleißkorrosion zum Einsatz, wie beispielsweise bei Tricone-Gesteinsbohrspitzen, die in der Öl-Industrie eingesetzt werden.

(a) Aufschweißen von Ventilen/Ventilsitzringen	(b) Aufschweißen von Dichtsitzen in Kugelventilen	(c) Stellite in der Holzindustrie

Abbildung 10: Industrielle Einsatzgebiete von Stellite (Kennametal Stellite GmbH)

Stellite 6 und Stellite 21 zählen zu den sehr häufig für auftraggeschweißte Beschichtungen verwendeten Legierungen. Die Schmelztemperaturen von Cobalt, Stellite 6 und Stellite 21 liegen bei 1.495 ◦C, 1.350 ◦C und 1.280 ◦C (Kashani et al. 2008). Stellite 6 Legierungen enthalten ein dendritisches Gefüge mit einer typischen untereutektischen Struktur, die aus einer Co-Mischkristall-Matrix besteht, die mit eutektischen Phasen aus Chrom- und Wolframcarbid ausgefüllt wird. Die eutektische Erstarrung, bestehend aus M6C- und M7C3-Carbiden sowie γ-Austenit zwischen den Dendriten, wurde als eutektische Erstarrungsreaktion zwischen den Dendriten beobachtet (Hsieh et al. 2013).

Tabelle 20: Zusammensetzung der gängigsten Zusatzwerkstoffe vom Typ Stellite (Kennametal Stellite GmbH)

Bezeichnung	C [%]	Cr [%]	Ni [%]	Si [%]	sonstige [%]	Fe [%]	Co [%]	Härte [HRC]
Stellite 1	2,5	30,0	<3,0	1,0	12,0 W	<3,0	Rest	51-58
Stellite 6	1,2	28,0	<3,0	1,1	4,4 W	<3,0	Rest	39-43
Stellite 12	1,4-1,9	30,0	<3,0	1,5	8,5 W	<3,0	Rest	47-51
Stellite 21	0,25	27,0	<3,0	1,6	5,5 Mo	<3,0	Rest	28-40
Stellite 706	1,2	29,0	<3,0	<2,0	5,0 Mo	<3,0	Rest	39-43

Stellite 12 besteht aus CoCr29W9C1.8. Die Legierung weist eine ähnlich Mikrostruktur auf wie Stellite 6, enthält aber mehr eutektisches Gefüge. Die Materialeigenschaften basieren auf einem Gefüge mit einer Co-Mischkristall-Matrix und eingelagerten M7C3- und M6C-Carbiden. Für den auftraggeschweißten Zustand ist ein dendritisches Gefüge typisch. Darüber hinaus enthält die Matrix Cr, W und C Elemente. Die Legierungskomponenten Chrom und Wolfram sind sowohl in der Cobalt-Mischkristallphase als auch in zwei Carbidphasen innerhalb der interdendritischen Mischgebiete des Gefüges enthalten. Die meisten Mischcarbidteilchen sind chromreich. Wolframreiche Mischcarbidteilchen sind in geringer Häufigkeit vorhanden (Wu und Wu 1996).

Die Tribaloy Legierungen auf Cobalt- und Nickel-Basis zählen zu den hochwertigsten Werkstoffentwicklungen, die speziell für extremen Verschleiß, hohe Temperaturen und korrosive Medien entwickelt wurden. Der hohe Molybdängehalt (Tabelle 211) begünstigt die Trockenlaufeigenschaften und die Anwendung bei adhäsivem Verschleiß. Die Tribaloy Familie von Cobalt-Legierungen verfügen über eine harte intermetallische Laves-Phase, die in einer harten eutektischen oder Mischkristall-Matrix verteilt ist. Sie weisen eine hervorragende Beständigkeit gegen hohe Temperaturen Verschleiß, Abrieb und Korrosion auf und sind besonders geeignet für Anwendungsgebiete, in denen Schmierung ein Problem ist.

Tabelle 21: Zusammensetzung der gängigsten Zusatzwerkstoffe vom Typ Deloro (Kennametal Stellite GmbH)

Bezeichnung	C [%]	Cr [%]	Ni [%]	Si [%]	Mo [%]	Fe [%]	Co [%]	Härte [HRC]
Tribaloy T-400	–	8,5	–	2,6	29,5	–	Rest	46-53
Tribaloy T-400C	–	14,0	–	2,4	27,0	–	Rest	47-52
Tribaloy T-401	0,2	17,0	–	1,3	22,0	–	Rest	45-50
Tribaloy T-800	–	17,5	–	3,4	28,0	–	Rest	54-60

4.2.8 Keramik

Keramiken bestehen aus Metallatomen in Verbindung mit Sauerstoff, Stickstoff, Kohlenstoff oder Bor. Beispiele sind SiC, TiB_2, Si_3N_4, Al_2O_3 und $MoSi_2$. Sie werden bei hohen Temperaturen gefertigt. Ihre Struktur ist kristallin, die von Gläsern hingegen ist amorph. Es bestehen auch Zwischenstufen zwischen Glas und Keramik, diese werden als Glaskeramik bezeichnet, sie beinhalten sowohl kristalline als auch amorphe Strukturen. Keramiken sind in der Regel für Anwendungen bei hohen Temperaturen geeignet, sind meist spröde und neigen zu Brüchen. Keramiken können sowohl elektrisch isolierende als auch Piezoelektrische Eigeschaften aufweisen. Sie sind verschleißfest und haben eine hohe Festigkeit, Härte und Formbeständigkeit. Sie sind hochtemperaturfest, isolieren und habe eine eher geringe Wärmeleitfähigkeit. (Thompson 2014; Höland 2012)

Glas und Keramik wurden lange als korrosionsbeständige Werkstoffe beschrieben. Im Gegensatz zu Metallen handelt es sich bei Keramiken und Gläsern um die thermodynamisch stabilen oxidierten Zustände der Moleküle. Metalle hingegen werden generell in ihrer unoxidierten Form verarbeitet, welche thermodynamisch instabiler ist als die oxidierte Form. Über lange Zeiträume gesehen werden die Metalle, mit Ausnahme der Edelmetalle, also in den Zustand zurückkehren in dem sie als Erz abgebaut wurden. (Katz 2018)

Für Keramik kann kein einzelner spezifischer Weg der Korrosion beschrieben werden, da die Korrosion abhängig von der Struktur, Zusammensetzung abhängig ist. So korrodieren dichtere Keramiken weniger schnell und kristalline Strukturen korrodieren anders als Glas-Strukturen. (McCauley 2013)

Auch als Beschichtungsmaterial für austenitische Stahlbehälter wird TiO_2 diskutiert. TiO_2 ist ein keramischer Werkstoff. Sathasivam et al. (2023) untersuchten eine mehrlagige Beschichtung mit Ce dotiertem Titandioxid welche durch einen Sol-Gel Prozess aufgebracht und durch glühen bei niedrigen Temperaturen fixiert wurde. Das Ce lässt sich für bis zu 24 h durch UV-Bestrahlung aufladen und sorgt somit für einen kathodischen Schutz in chloridhaltigen Medien bzw. Seewasser. Für einen Schutz vor Spannungsrisskorrosion des in dieser Untersuchung als strukturellen Werkstoff verwendeten 304LSS (= AISI 304L; Korrosionsbeständiger Edelstahl) wird also eine regelmäßige UV-Bestrahlung benötigt um den Korrosionsschutz der Beschichtung zu erhalten.

Keramik wird für alltägliche Konsumgüter wie Geschirr aber auch als Isolator in der Elektrotechnik sowie der Chemischen Industrie verwendet.

Aufgrund der hohen Härte werden 25% aller technischen Keramiken für Güter verwendet die mit abrasiven Partikeln in Kontakt kommen, wie z.B. Düsen für Sandstahlgerät. (Katz 2018)

Keramiken wie z.B. Aluminiumhydroxid und Y-TZP und Calciumtriphosphate werden für Implantate von Hüftgelenken oder auch zur Rekonstruktion von Knochen eingesetzt, es wird zwischen bioaktiver, bioinerter und bioresorbierender Keramik unterschieden, diese Werkstoffe müssen dem leicht alkalischen Blut so wie darin enthaltenen Elektrolyten, Antikörpern und anderen Zellen standhalten. (Katz 2018)

In Schweden bestand ein Konzept für einen Aluminiumoxid Endlagerbehälter. Dieser hatte eine Wanddicke on 100 mm und sollte in vertikalen Bohrlöchern 500 m unter Tage eingelagert werden. Es stellte sich heraus, dass Alumina nicht ausreichend thermodynamisch stabil in Wasser ist. Unter einer Temperatur von 100 °C hydriert das Aluminiumoxid zu $Al(OH)_3$ und $Al_2O_3 \cdot 3H_2O$, diese formen eine Schicht und können abblättern. Die dadurch verursachte Korrosion beträgt weniger als 1 µm/a. Wenn ein solcher Behälter an der Oberfläche Defekte aufweist, so können diese unter Last zu einem Bruch führen. Daher sollten die Behälter einer akustischen Qualitätskontrolle unterzogen werden, die sicherstellen würde, dass diese Defekte nicht vorhanden sind und der Behälter somit eine Lebensdauer von mehreren hunderttausend Jahren haben würde. (Mattson 1980)

4.2.9 Glas

Gläser haben im Gegensatz zu Keramiken eine amorphe Struktur, sie haben also keine Langreichweitenordnung (Zallen 1983). In der Regel sind Gläser transparent, diese Eigenschaft und die thermischen Eigenschaften lassen sich durch die Zusammensetzung der Gläser beeinflussen. (Scholze 1988) Glas entsteht durch das schnelle Abkühlen einer schmelzflüssigen Substanz, dies verhindert, dass sich eine geordnete Kristallstruktur bildet. Ein klassisches Beispiel ist Silikatglas, welches hauptsächlich aus Siliziumdioxid (SiO_2) besteht (Shelby 2005). Gläser zeigen keinen definierten Schmelzpunkt auf sondern erweichen über einen Temperaturbereich hinweg, die sogenannte Glasübergangstemperatur (Tg). Diese Temperatur markiert keinen Phasenwechsel. Sie ist stark von der chemischen Zusammensetzung des Glases abhängig. (Moynihan et al. 1974). Oberhalb der Tg fängt das Glas an zu fließen und die Viskosität fällt ab. Dies wird durch die Vogel-Fulcher-Tammann (VFT)-Gleichung modelliert, die das nicht-Arrhenius-Verhalten des viskosen Fließens in unterkühlten Flüssigkeiten, einschließlich Glas, beschreibt. (Angell 1991)

Gläser sind für ihre gute chemische Resistenz gegenüber vielen oxidierenden und reduzierenden Stoffen bekannt und werden daher in einer weiten Reihe von Anwendungen in chemischen Laboren angewendet. Gläser unterliegen über längere Zeiträume der sogenannten Glaskorrosion. Gläser können bezüglich ihrer Eigenschaften in Wasserbeständigkeitsklassen, Säurebeständigkeitsklassen und Laugenbeständigkeitsklassen unterteilt werden. Diese Klassen werden durch genormte Prüfverfahren DIN 12116, ISO 695 festgestellt. Bei einer durch anorganische Säuren verursachten Korrosion entsteht auf der Oberfläche des Glases eine kieselsäurehaltige Gel-Schicht. Wird die Korrosion durch Laugen verursacht wird die Glasoberfläche langsam abgetragen, steigt die Temperatur so erhöht sich auch die Korrosionsrate. Gläser mit einem hohen Si-Gehalt haben eine höhere Beständigkeitsklasse (1-2), dies sind z.B. Quarz und Borosilikatgläser. Gläser mit geringeren Beständigkeitsklassen sind z.B. Trinkgläser oder alte Kirchenfenster (Klasse 3-4). Diese Gläser enthalten relativ hohe Anteile an K_2O und CaO welche in der Reaktion mit Schwefelsäure zu dünnen Gips-Schichten führen, diese sind Wasserlöslich und können bei Fenstern zu einer dickeren Korrosionsschicht im unteren Bereich führen. (Hülsenberg 2013) Aber auch reines Wasser kann aufgrund seiner amphoteren Eigenschaften zur Korrosion von Gläsern und damit einer in Form einer porösen Oberfläche führen. In reinem Wasser liegen durch die Autoprotolyse des Wassers immer sowohl H_3O^+ als auch OH^--Ionen vor. Das Wasser kann dadurch sowohl als Base, durch die OH^-Ionen als auch als Säure reagieren. Die H_3O^+-Ionen wirken dabei als Protonendonatoren und damit als Säure. Im Fall von Natron-Kalk Glas können die im Wasser vorhandenen ‚von den H_3O^+ abgespaltenen, H^+-Ionen in das Glas eindringen während die Na^+ aus dem Glas herausgelaugt werden. Dieser Prozess läuft beispielsweise in der Zwischenschicht von undicht gewordenen doppelt verglasten Fenstern statt. Die zwischen den Fensterscheiben befindliche Feuchtigkeit hat dort genügend Zeit mit dem Glas zu reagieren. Die Reaktion läuft fort bis keine H^+ Ionen mehr vorhanden sind bzw. ein pH-Wert von etwa 9 erreicht ist. Darauf folgt eine

zweite Stufe der Glaskorrosion, die Ca^{+} Ionen werden aus dem Glas-Netzwerk herausgewaschen und es kommt zur Bildung von Calciumcarbonat-Ablagerungen durch die Reaktion mit CO_2 aus der Luft. Nach dieser Auswaschung ist die Glasoberfläche porös und durch die Calciumcarbonat-Ablagerungen wird das Glas an der Oberfläche trüb. Eine Fensterscheibe muss in diesem Fall ersetzt werden. (Katz 2018; Binnewies et al. 2016) Gläser können demnach sowohl durch aggressive Laugen oder Basen sowie über lange Zeiträume hinweg auch von reinem Wasser angegriffen und beschädigt werden.

Kleine Kratzer oder Risse können bei Glas unter thermischer, mechanischer oder einer kombinierten Belastung zu einem schrittweisen Anwachsen des Risses führen. Nach dem Erreichen eines kritischen Punktes kommt es zum Versagen des Glases welches auch als statischer Ermüdungsbruch bezeichnet wird. (Katz 2018)

Glas findet Anwendung für wiederverwendbare Verpackungen sowie in Haushalt und Laboren, da es inert ist und sich gut reinigen, wiederverwenden und recyclen lässt. (Thompson 2014; Varshneya und Mauro 2019)

4.2.10 Verbundmaterialien

Verbundmaterialien verbinden die Eigenschaften unterschiedlicher Werkstoffe zu einem Material. Grundwerkstoffe (Matrix) werden dabei verstärkt durch Fasern oder Partikel. Die Verstärkung kann durch Teilchen, Fasern, Schichten oder einen Durchdringungsverbund zustande kommen. Beispielsweise werden Polymere durch Fasern verstärkt oder Metallfolien auf Pappe kaschiert. Die Kombination der Werkstoffe kann durch ein Einbringen eines Werkstoffes in den anderen erfolgen oder aber durch das Aufbringen auf dessen Oberfläche. Durch die Kombination der Werkstoffe und die Fertigungsverfahren können auch anisotrope Eigenschaften im Verbundwerkstoff erreicht werden. In einem faserverstärkten Spritzguss richten sich die Fasern beispielsweise nach der Flussrichtung des Gusswerkstoffes aus. (Thompson 2014)

Es bestehen folgende Kombinationen:

MMC: Metal Matrix Composite / Metall- Keramik (Partikel, Fasern)

PMC: Polymer Matrix Composite / Polymer- Faser (versch. Fasern)

CMC: Ceramic Matrix Composite / Keramik-Keramik

In diesem Kapitel soll nicht weiter auf Verbundwerkstoffe eingegangen werden. Da diese aus einzelnen Werkstoffen bestehen und erst durch Fertigungsverfahren hergestellt werden können, die diese Grundwerkstoffe verbinden und damit die Eigenschaften jener kombinieren bzw. verbessern.

4.3 Übersicht der Werkstoffeigenschaften in Bezug auf die Eignung für einen Endlagerbehälter

Tabelle 22 zeigt eine Übersicht der erarbeiteten Parameter aufgrund deren sich die Werkstoffe bewerten lassen. Die höchste Dichte weisen die Wolframlegierungen auf. Generell haben die Metalle die höchste Dichte unter den Werkstoffgruppen. Aber auch technische Keramik wie z.B. Wolframcarbid hat mit 10,5 -10,6 kg/m^3 eine hohe Dichte. Bei den Eisenbasislegierungen sind die Unterschiede bezüglich der Dichte vergleichbar gering. Beton hat sogar nur eine Dichte von 2,3-2,6 kg/m^3. Beton kann in seinen Mischungsverhältnissen stark variieren, daher ist es wichtig, dass der im Strahlenschutz verwendete Beton eine geprüfte und angepasste Zusammensetzung aufweist. Dem Beton können Beispielsweise Eisengrieß, Baryt oder Boride zugefügt werden. (Schmidt 1969) Diese Werkstoffe qualifizieren sich also aufgrund ihrer hohen Dichte für die Abschirmung von Gammastrahlung. Als typischer Werkstoff der Strahlenabschirmung wird auch Blei eingesetzt, beispielsweise als optionale Innenschicht des MOSAIK®-Behälters (GNS 2023b).

Polymere zeigen die geringste Dichte auf, sie eignen sich wie auch in der Werkstoffbeschreibung erläutert für die Abschirmung von Neutronenstrahlung, sind nicht als Hauptbestandteil eines Endlagerbehälters geeignet, da sie Zerfallsprozessen, wie der Hydrolyse oder Radiolyse unterliegen. Sollten sie als Neutronenabsorber im Behälter verbaut werden, so müssten diese Prozesse weiter untersucht und deren Auswirkungen auf das eWG angewendet werden.

Um eine Überkritikalität im Behälter zu vermeiden ist eine hohe Wärmeleitfähigkeit notwendig. Diese findet sich nicht nur bei Metallen wie beispielsweise Aluminium, Kupfer sondern auch den Technischen Keramiken. (Tabelle 14 mit weiteren Wärmeleitfähigkeitsdaten findet sich im Anhang)

Die Korrosionsdaten der Corrosion Data Survey 1985 stellen eine große Sammlung an Korrosionsdaten mit Varianz in der Konzentration und der Temperatur der Korrosionsversuche dar. Aus den Daten geht nicht hervor um welche Art der Korrosion es sich handelt. Ob die Korrosion beispielsweise flächig aufgetreten ist oder ob es sich um Lochfraßkorrosion handelt. Die Daten für NaCl 20 % zeigen damit, dass die Korrosionsrate bei Aluminium, Silber, Zirkonium und rostfreiem Stahl geringer sind als bei den anderen Metallen. Es existieren viele weitere Korrosionsdaten zu anderen spezifischen Elektrolyten beispielsweise in der Dechema Datenbank oder über den Kupferverband.[3] Zwecks der Darstellung könnten auch andere korrosive Medien angenommen werden, die Corrosion Data Survey würde dennoch nur einzelne Elektrolyte und keine Endlagerbedingungen widerspiegeln. Daher sind für die Bewertung der Korrosionsdaten Experimentelle Untersuchungen mit Referenzelektrolyten notwendig. In diesen Experimenten könnten zudem nicht nur die Korrosion von Metallen sondern auch das Verhalten von Beispielsweise Keramiken und Gläsern untersucht werden. Auch die Auswirkungen von Wärmebehandlungen und Beschichtungen sollten untersucht werden.

Zusätzlich zu den verglichenen Parametern kann die Duktilität betrachtet werden. Im Falle einer Verschiebung im einschließenden Gebirge oder im Falle eines Sturzes des Behälters während der Einlagerung würde ein Behälter aus einem duktilen Werkstoff weniger Schaden nehmen, als ein Behälter aus einem nicht duktilen Material. Keramiken und Gläser sind keine duktilen Werkstoffe, daher sollten sie nur eingesetzt werden, wenn die Belastung sicher

[3] https://kupfer.de/wp-content/uploads/2020/02/DKI_Bestaendigkeitstabellen_DE.pdf
https://ac.dechema.de/dwt+.html

geringer ist als die Bruchfestigkeit, denn ein Bruch des Behälters führt zu einer Undichtigkeit, somit könnten Radionuklide in freigesetzt werden und in das Grundwasser und die weitere Umwelt gelangen. Die Schutzfunktion des Behälters wäre damit nicht mehr erfüllt.

Tabelle 22 Werkstoffe und ihre messbaren Parameter nach den Anforderungen aus Kap. 3

Werkstoffgruppe	Beispielhafter Werkstoff	Streckgrenze [4] (MPa)	Dichte (kg/m^3) [5]	Wärmeleitfähigkeit (W/(m*K) [6]	Korrosion (mm/Jahr) in 20% NaCl Lösung bei Raumtemperatur[7]
Duroplaste	Acrylonitrilbutadienstyren (ABS)	133	1 - 1,2	0,19 - 0,34	
	Cellulosepolymere (CA)	5,3-131	0,98 - 1,30	0,13 - 0,3	
	Ionomer (I)	/	0,93 – 0,96	0,24 - 0,28	
	Polyamid (Nylon, PA)	2,2-807	1,1	0,23 - 0,25	
	Polycarbonat (PC)	0,4 -228	1,1 - 1,2	0,19 - 0,22	
	Polyetheretherketon (PEEK)	/	1,3	0,24 - 0,26	
	Polyethylen (PE)	8-210	0,94 – 0,96	0,4 - 0,44	
	Polyethylenterephthalat (PET)	0,4-228	1,3 - 1,4	0,14 - 0,15	
	Polymethylmethacrylat (Acryl, PMMA)	2,59-83	1,2	0,084 - 0,25	
	Polyoxymethylen (Acetal, POM)	25-140	1,4	0,22 - 0,35	
	Polypropylen (PP)	2,1-298	0,89 – 0,91	0,11 - 0,17	
	Polystyrol (PS)	2,413-133	1 – 1,1	0,12 - 0,13	
	Polytetrafluoroethylen (Teflon, PTFE)	2,76-120	2,1 - 2,2	0,24 - 0,26	
	Polyurethane (tpPUR)	/	1,1 - 1,2	0,23 - 0,24	
	Polyvinylchloride (tpPVC)	0,121-150	1,3 - 1,6	0,15 - 0,29	
Thermoplaste	Epoxide	2,8 -80	1,1 - 1,4	0,18 - 0,5	
	Phenole	/	1,2 - 1,3	0,14 - 0,15	
	Polyester	0,4 -228	1 - 1,4	0,29 - 0,3	
Polymerschäume	Flexibler Polymerschaum (LD)	/	0,38 – 0,70	-110 - -13	
	Flexibler Polymerschaum (MD)	/	0,70 - 120	-110 - -13	
	Fester Polymerschaum (HD)	/	0,170 – 0,470	67 - 170	
	Fester Polymerschaum (LD)	/	0,36 – 0,70	67 - 170	
Eisenbasismetalle	Gusseisen, duktil (0.7050)	≥ 290	7,1	29 - 44	1,27
	Gusseisen, grau (5.1301)	165-228	7,2	40 - 72	0,508
	Stahl mit hohem Kohlenstoffanteil (1.0950)	≥ 340	7,76 - 7,86	47 - 53	-
	Niedriglegierter Stahl (1.7225)	320-1554.8	7,76 - 7,86	34 - 55	-
	Stahl mit geringem Kohlenstoffanteil (1.0038)	≥ 165	7,76 - 7,86	49 - 54	0,66 bei 5%[8]
	Stahl mit mittlerem Kohlenstoffanteil (C45)	≥ 230	7,76 - 7,86	45 - 55	0,66 bei 5%[9]
	Korrosionsbeständiger Stahl (X5CrNi18-10)	≥ 190	7,61-8,1	12 - 24	0,50 – 0,508
Nichteisen-Legierungen und Metalle	Aluminium rein (3.0255)	20-60	2,6-2,9	76 - 240	0,50
	Kupfer (2.0060)	40-366,7	7,5-9,3	160 - 390	0,508
	Blei	5,5[10]	11,35	33[11]	0,508
	Magnesium (AZ91)	171,9-185,9	1,7	50 - 160	-
	Nickellegierungen (Inconel 625)	275,8-765	4,4-8,44	67 - 91	0,508
	Silber	50-55[12]	10 – 10,1	430	0,50
	Zinn	-	2,3-9,1	60 - 62	-
	Titanlegierungen (Titan Grade 1)	180	4,3-5,1	22,6	≤ 0.051 gesättigte Lösung[13]
	Wolframlegierungen (**DENSIMET 170 - D170)**	≥ 517	16,85-17,25	100 - 140	-
	Zinklegierungen (Zamak 3)	221	6,6-7,1	113	-
	Zirkonium		3,2 – 6,9	5,5 - 22	0,0501[14]
Glas	Borosilikatglas	-	2,2 - 2,3	1 - 1.3	
	Quarzglas	-	2,2	1.4 - 1.5	
	Soda-Kalkglas	-	2,4 - 2,5	2,4 - 2,5	
Keramik	Aluminumoxid	-	3,8 - 4	26 - 39	
	Aluminumnitrid	-	3,3	140 - 200	
	Siliziumoxid	-	2,3 - 2,4	140 - 150	
	Siliziumcarbid	-	3,1 - 3,2	80 - 130	
	Wolframcarbid	-	10,5 – 10,6	55 - 88	
	Ziegel	-	1,6 - 2,1	0.46 - 0.73	
	Beton	-	2,3 - 2,6	0,8 – 2,4	

Für Keramiken und Gläser können keine Streckgrenzen ermittelt werden, da sie keine DUKTILEN Eigenschaften aufweisen. Sie brechen also ohne, dass eine plastische Verformung auftritt. Ist die Last durch das ewG zu hoch, treten Scherbelastungen auf oder kommt es bei der Einlagerung zu einem Sturz des Behälters, so müsste die Auslegung für den Behälter diese Fälle mit einbeziehen um ein Brechen des Behälters zu vermeiden. Bei Metallen hingegen kommt es zunächst zu einer plastischen Verformung, bis zur Streckgrenze ist diese reversibel. Und selbst nach dem Erreichen der Streckgrenze folgt nicht direkt der Bruch, sondern zunächst die irreversible Verformung.

Die Qualitätsprüfung der hergestellten Behälter spielt bei der Werkstoffauswahl ebenfalls eine Rolle. Denn nach der Fertigung muss sichergestellt werden, dass der Endlagerbehälter genau

[4] Ermittelt über totalmateria.com
[5] Ermittelt über totalmateria.com
[6] Ermittelt über totalmateria.com
[7] Corrosion Data Survey 1985 Sofern nicht anders angegeben
[8] Stainless Steel in Contact with Other Metallic Materials / Euro Inox - The European Stainless Steel Development Association / Materials and Applications Series, Volume 10
[9] Stainless Steel in Contact with Other Metallic Materials / Euro Inox - The European Stainless Steel Development Association / Materials and Applications Series, Volume 10
[10] https://material-properties.org/lead-properties-applications-price-production/
[11] https://matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=ebd6d2cdfdca4fc285885cc4749c36b1&ckck=1
[12] ASM International. (1998). *Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials*, ASM Handbook, Vol 2
[13] Corrosion resistance tables, metals, plastics, nonmetallics, and rubbers / Philip A. Schweitzer / Marcel Decker Inc. / 1976
[14] Corrosion resistance tables, metals, plastics, nonmetallics, and rubbers / Philip A. Schweitzer / Marcel Decker Inc. / 1976

die Eigenschaften aufweist, mit denen er ausgelegt worden ist. Nur so kann die Langzeitsicherheit garantiert werden. Für Metalle eigenen sich dabei Standardmethoden der zerstörungsfreien Prüfung wie Ultraschallprüfung und Radiographie, da Metalle eine hohe Dichte und gleichmäßige Struktur aufweisen. Bei der Ultraschallprüfung reflektieren die Wellen an Fehlstellen wie z.B. Rissen. (Krautkrämer und Krautkrämer 1990; Schiebold 2015)

Für Keramiken müssen hingegen spezialisiertere Verfahren angewendet werden. Hierzu zählen die Thermografie und die Schallemissionsprüfung. Die Thermografie, ein Verfahren welches auf Infrarot oder Laser zurückgreift, ist jedoch auch nicht für alle Keramiken geeignet, da sie eine effektive Wärmeleitfähigkeit erfordert. Ist diese zu gering, so kann das Verfahren nicht angewendet werden. (Roemer et al. 2018; Drozdov 2014)

Es stehen also für die Prüfung der Keramiken weniger geeignete Verfahren zur Verfügung, zudem muss geprüft werden, wann die Prüfung des Behälters erfolgt. Während des Transportes des Endlagerbehälters in das Endlager könnten Schäden an einem Keramikbehälter auftreten. Der Behälter müsste also für eine Qualitätssicherung an seinem endgültigen Standort erneut geprüft werden. Inwiefern dies logistisch möglich ist hängt von der Auslegung des Behälters und Endlagers ab. Für einen Endlagerbehälter, der aus einem Metall gefertigt wird ist eine Prüfung am Endgültigen Standort im Endlager jedoch nicht mehr zwingend notwendig. Nach dem Verschluss in der heißen Zelle kann der Behälter dort auch der Endgültigen Qualitätsprüfung unterzogen werden.

Aus den Eigenschaften der Werkstoffe ist also nicht auszuschließen einen Behälter aus Keramik zu fertigen. Es muss dafür jedoch sichergestellt werden, dass dieser den Lasten des ewG entsprechend ausgelegt ist, und dass dieser zum Zeitpunkt der Einlagerung vor Ort geprüft werden kann. Die Korrosion von Keramik schreitet im Vergleich zu Metallen langsamer voran. Da die Metallatome in ihren oxidierten Zuständen im Werkstoff vorliegen sind sie in den meisten Umgebungen als inert zu betrachten. Es treten dennoch Degradationserscheinungen auf, die beispielsweise zur Auswaschung von Spezies und einer porösen Oberfläche führen können (Sōmiya 2003).

Ein Behälter der aus Metall gefertigt wird kann im Gegensatz dazu Scherbelastungen des ewG leichter standhalten. Er kann die vom Inventar erzeugte Wärme besser ableiten. Mit der Ausnahme von Wolframcarbid haben fast alle Metalle eine höhere Dichte als die Keramiken und können damit leichter einen Schutz vor der ionisierenden Strahlung bieten. Die Korrosionsraten unterscheiden sich unter den Metallen stark. Sie können grob in leicht passivierende und schlecht passivierende Metalle eingeteilt werden. Je nachdem welcher Gruppe sie angehören neigen sie zu anderen Korrosionsarten. Schlecht passivierende Metalle neigen eher zu Flächenkorrosion. Leicht passivierende eher zu Lochfraßkorrosion. Korrosion. (Schweitzer 2009; Pohl und Forchhammer 2014; Fraenkel 1998) Für die Berechnung der Langzeitsicherheit und der damit verbundenen Auslegung des Behälters ist es wichtig die Korrosion mit einzuberechnen. Mit einer einheitlichen Flächenkorrosionsrate ohne die Gefahr von Lochfraßkorrosion ist diese Berechnung leichter durchzuführen. Es ist daher abzuwägen, ob korrosionsresistentere Werkstoffe, die zu Lochfraßkorrosion neigen oder weniger korrosionsresistente Werkstoffe mit einer gleichmäßigen Flächenkorrosion für den Endlagerbehälter geeigneter sind.

Tabelle 23 gibt eine Übersicht darüber welche Werkstoffe in welchen Ländern für einen Endlagerbehälte bisher in Erwägung gezogen wurden oder verwendet werden. Dies Zeigt, das zum überwiegenden Teil Eisenbasiswerkstoffe und reines Kupfer genutzt werden sollen. Legierungen und andere metallische Werkstoffe sowie Keramiken werden fast nicht betrachet. Auch Keramische oder Emaille-Beschichtungen sind bisher nicht in Erwägung gezogen worden.

Tabelle 23 In Endlagerbehältern eingesetzte Strukturelle- und Korrosionsschutz-Werkstoffe

	Polymere	Gusseisen	unlegierter Stahl	hoch legierter Stahl	Kupfer	Kupferlegierungen	Nickellegierungen	Aluminium	Titan	Titanlegierungen	Cobaltlegierungen	Zirconium	Keramik	Glas/Emaille
Belgien			x	x										
Canada			x		x									
China			x	x										
Deutschland		x	x	x										
Finnland		x	x		x				x					
Frankreich			x	x										
Japan			x											
Norwegen				x										
Russland			x	x										
Schweden		x	x		x				x				x	
Schweiz		x	x	x	x									
Spanien			x											
Südkorea					x	x								
Tschechien				x										
USA			x	x			x		x					

Neben den Werkstoffeigenschaften sollten jedoch auch die Fertigungsmethoden für diese Werkstoffe betrachtet werden. Denn allein ein geeigneter Werkstoff ermöglicht noch keine Produktion des Behälters.

Im folgenden Kapitel zunächst Fertigungsmethoden für einen Behälterkorpus vorgestellt werden.
Der folgende Teil beschränkt sich auf die Herstellung eines metallenen Grundkorpus, da technische Keramiken in der Regel nur in Zentimeter großen Dimensionen hergestellt werden. Gerade größere Keramikteile sind aufgrund der inneren Eigenspannungen, die durch ungleichmäßige Sinterung oder Abkühlung auftreten können, anfällig für Risse. Die präzise Kontrolle dieser Spannungen ist entscheidend, um die strukturelle Integrität zu gewährleisten. Technisch ist es aber möglich größere Keramikteile wie z.B. Hochtemperaturrohre und Wärmetauscher zu fertigen. (Kingery et al. 1976; Riedel 2000) Die Größenordnung eines Endlagerbehälters würde diese Dimensionen jedoch übersteigen. Die Fertigung in diesen Dimensionen ist technisch nicht auszuschließen, sie wird jedoch nach Stand der Technik nicht praktisch durchgeführt. Die Methoden der keramischen Fertigung eines Grundkorpus werden deshalb im folgenden Kapitel nicht weiter behandelt. Sie sollten jedoch in zukünftigen Arbeiten und Berichten betrachtet werden um diese Werkstoffgruppe nicht voreilig aus dem Pool der möglichen Werkstoffe für den Endlagerbehälter auszuschließen. Neben den Fertigungsmethoden für den Grundkorpus werden zum Ende des Kapitels hin auch Beschichtungen betrachtet. An dieser Stelle sollen keramische Beschichtungen und Emaille Erwähnung finden.

Zunächst sollen aber die Fertigungsmethoden für einen Grundkorpus aus einem metallenen Werkstoff beschrieben und erörtert werden. Soweit bekannt werden Fertigungs- und Beschichtungsmethoden in den internationalen Kontext der Endlagerbehälterentwicklung eingeordnet.

4.4 Recherche der Produktionstechnik

Produktionstechnik und Werkstoffwahl und Konstruktion können nicht getrennt voneinander betrachtet werden. Denn nicht jeder Werkstoff ist für jede Produktionstechnik geeignet und nicht jede Konstruktion kann in jedem Werkstoff umgesetzt werden (vgl. Abb. 15)

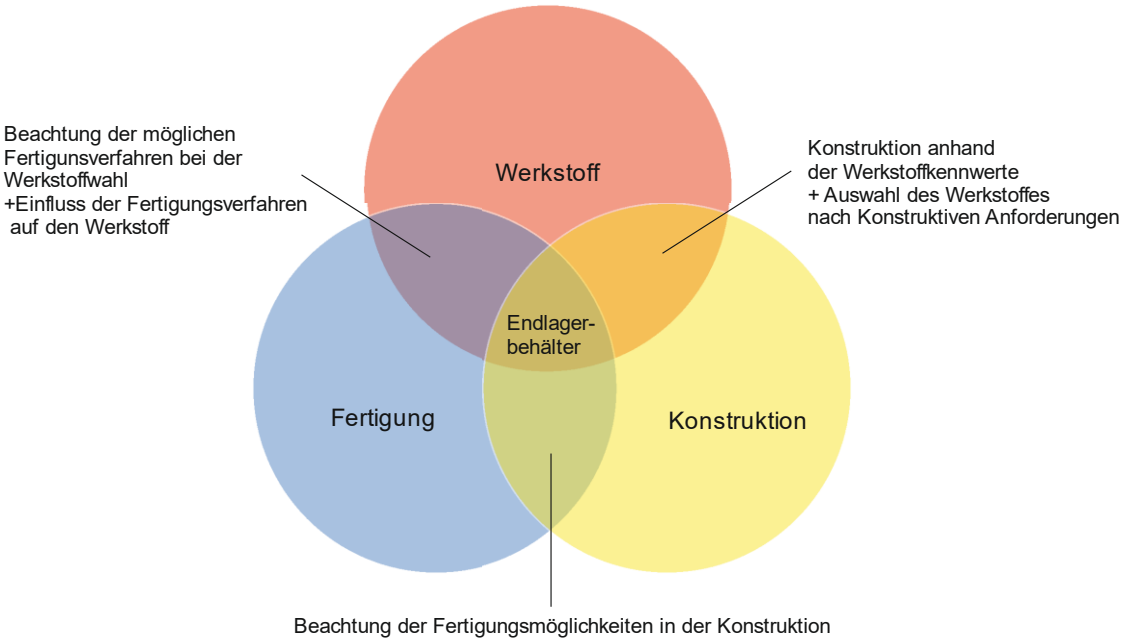


Abbildung 11 Zusammenhänge zwischen Werkstoff Fertigung und Konstruktion

Die im ersten Teil des Berichtes erarbeiteten Anforderungen an die Fertigung beinhalten die Herstellung, also die Verarbeitbarkeit der Werkstoffe und die Dichtigkeit, des Verschlusses bzw. die Stoffschlüssigkeit des Behälterverschlusses.

Dies bedeutet, die Herstellung muss technisch umsetzbar sein. Da nicht nur ein Behälter gefertigt werden muss, soll die Herstellung in einem industriellen Maßstab umsetzbar sein. Der Verschluss des Behälters muss vollautomatisiert in der heißen Zelle durchführbar und prüfbar sein. Wie zum Ende des vorhergehenden Kapitels der Werkstoffe beschrieben werden hier nun zunächst die Fertigungsmethoden für einen Grundkorpus für einen Endlagerbehälter aus einem metallenen Werkstoff beschrieben.

4.4.1 Gießen

Das Gefüge kann nach dem Gießen Poren aufweisen, die Anzahl und Größe kann durch das Gussverfahren beeinflusst werden. Die Mikrostruktur kann durch Wärmebehandlungen beeinflusst werden. Das Gussverfahren hat zudem einen Einfluss auf die Oberflächenbeschaffenheit. Bei rauen Oberflächen ist die Angriffsfläche für korrosive Medien größer als bei glatten Oberflächen. Die Oberfläche kann nach dem Guss bearbeitet bzw. beschichtet werden, um die Korrosion zu verringern. Die Verteilung von Legierungselementen sollte gleichmäßig sein, da evtl. eine unterschiedliche Anfälligkeit gegenüber den Korrosionsmedien besteht. (Campbell 1993)

Die Veränderung der Struktur z.B. durch Oberflächen- oder Wärmebehandlungen führen zu einer Veränderung der Korrosionseigenschaften. Für Ti und Mg- Legierungen führt eine Verfeinerung der Struktur zu einer verbesserten Korrosionsresistenz. Für andere Metalle kann eine solche allgemeingültige Aussage nicht getroffen werden. Diese Verfahren sollten also nur

unter Kenntnis der Auswirkungen auf das Korrosionsverhalten durchgeführt werden. (Ralston und Birbilis 2010)

Der belgische Supercontainer, welcher Glaskokillen enthalten wird, soll aus einem Stahlguss in einem Betonmantel bestehen. Welches Gussverfahren für die Fertigung des Behälters angewendet werden soll ist nicht bekannt. Der Betonmantel soll auf der Stahlgussoberfläche eine passivierende Oxidschicht erzeugen.(Bollingfehr et al. 2020, S. 17; Kinet et al. 2016)

Auch der schwedische und finnische Behälter greift auf Gussverfahren zurück. Der strukturelle Gusseiseneinsatz wird gegossen. Aus Kupfer wird die Hülle nicht gegossen, sondern es werden Kupferblöcke verarbeitet, welche dann durch u.a. Schmieden zu Röhren weiterverarbeitet werden. Deckel und Boden werden dann angeschweißt. (Svensk Kärnbränslehantering AB 2007)

Sandguss
Für das Gießen des Metalls wird eine Form benötigt, diese besteht bei diesem Verfahren aus Sand, einer verlorenen Form. Im Sandguss ist die Oberfläche des Werkstückes teilweise uneben. Die Qualität des Werkstückes wird durch seine Porosität beeinflusst. Diese lässt sich minimieren indem Parameter des Verfahrens angepasst werden. Die Temperatur des Werkstoffes muss so angepasst werden, dass sie nicht zu hoch bzw. zu tief ist (Campbell 2011) . Zudem sollte die Form so gestaltet sein, dass sich das geschmolzene Metall gut darin verteilen kann. Im Sand bzw. Bentonit enthaltene Bindemittel können so optimiert werden, dass entstehende Gasbläschen durch den Sand entweichen können und sich nicht an der Oberfläche sammeln (Vijayaram 2018). Zudem kann das schmelzflüssige Metall entgast werden. Hierzu werden Gasspül- und Vakuumtechniken angewendet (Stefanescu 2002). Die Oberfläche kann durch die Wahl eines passenden Abrasivs für die nachgelagerte Veredelung verbessert werden. Dadurch wird die Oberflächenrauheit reduziert und die Oberfläche wird geglättet. Eine glattere Oberfläche verringert die Anzahl der Mikrorisse und Vertiefungen, in denen sich Feuchtigkeit und korrosive Medien ansammeln können, welche zu lokaler Korrosion führen können. (Ghosh 1988) Angewendet wird Sandguss im Bau, und der Automobilindustrie. Gegossen werden z.B. Motorblöcke oder Rohrleitungselemente. Das Sandgussverfahren wird oft mit Schmieden, Fräsen und Schweißen kombiniert um das Herstellen komplexerer Geometrien zu ermöglichen. Für den Sandguss eignen sich Eisenbasislegierungen und nicht-Eisenbasislegierungen. Am häufigsten werden Eisen, Stahl, Kupferlegierungen, Aluminiumlegierungen und Magnesiumlegierungen verwendet. (Thompson 2014)

Ein Behälter mit ausreichender Wandstärke kann durch Sandguss gefertigt werden. Die Porosität ist in Betracht der Empfindlichkeit gegenüber Korrosion ein erheblicher Nachteil. Der Castorbehälter wird als monolithischer Körper in Sphäroguss (Kugelgraphit) hergestellt. (GNS 2023a; Rundman und Iacoviello 2016)

Druckguss eignet sich für die Herstellung komplexer dreidimensionaler Teile. Es gibt verschiedene Methoden des Druckgusses, die mit hohem, niedrigem Druck oder der Schwerkraft arbeiten. Ähnlich wie beim Spritzguss von Polymeren müssen beim Druckguss und der Erstellung der Form viele Aspekte beachtet werden um das gleichmäßige Füllen der Form zu erreichen. Aufgrund seiner Komplexität und den damit verbundenen hohen Kosten werden meist nur Teile bis zu einem Gewicht von 9 kg gegossen. Gegossen werden können nur Nichteisenmetalle wie Aluminium, Zink, Kupfer, Blei und Zinn, da die Schmelztemperaturen von Eisenbasislegierungen für diesen Prozess zu hoch sind, da die Werkzeuge daraus gefertigt sind. Das Oberflächenfinish ist beim Druckguss besser als beim Sandguss. Da der Gussprozess durch den Druck erhöht ist, ist auch die Porosität geringer. Angewendet wird der Druckguss in der Automobilindustrie und der Herstellung von Küchengeräten. (Thompson 2014) Da es sich bei einem Endlagerbehälter voraussichtlich nicht

um eine geometrisch komplexe Form handelt und der Behälter allein Aufgrund der Materialstärke und Größe ein Gewicht von 9 kg weit überschreiten wird ist der Druckguss als ungeeignetes Verfahren zu betrachten. Zudem führt auch dieses Verfahren nicht zu einem porenfreien Produkt.

Das Metallspritzgussverfahren ist nicht geeignet da es hauptsächlich für kleine Komponenten mit einem Gewicht von bis zu 100 g angewendet wird. Das Verfahren ist pulverbasiert, ähnelt dem Spritzgussverfahren für Polymere und Keramik. Das Metallpulver wird mit Wachs und Bindemitteln vermengt und in die Form eingespritzt. Nach dem Entfernen aus der Form wird das Werkstück gesintert. Nach diesem Schritt hat das Metall eine nur sehr geringe Porosität und isotrope Eigenschaften, dadurch ist es sehr duktil. (Thompson 2014)

4.4.2 Additive Fertigung

Additive Fertigung lässt sich auf eine Bandbreite von Werkstoffen anwenden, von Polymeren und Beton und Keramik bis zu Metallen. Für die Verarbeitung von Metallen werden verfahren zugehörig zu den „direct energy deposition“ (DED)- Verfahren genutzt. Dazu zählen das selektives Laserschmelzen (SLM) Elektronenstrahlschmelzen (EBM) Laserauftragsschweißen (DLD) und Wire Arc Manufacturing (WAAM) eingesetzt. SLM und EBN unterscheiden sich hauptsächlich in der Form der Energiezuführung. SLM verwendet einen Laser, EBM einen Elektronenstrahl. Beide sind Verfahren die in einem Pulverbett ausgeführt werden. In jeder Schicht wird der Laser bzw. Elektronenstrahl auf die Punkte konzentriert die zusammengeschmolzen werden sollen. Im Falle des Elektronenstrahls wird der Prozess im Hochvakuum ausgeführt. Ist das Teil fertiggestellt, so muss es aus dem Pulverbett herausgelöst und Stützstrukturen entfernt werden. Für EBM eignen sich Stähle, Titan- und CoCr-Legierungen welche in Pulverform benötigt werden. (Grote et al. 2018; Thompson et al. 2015)

Das WAAM Verfahren ist einfach ausgedrückt ein 3D-Druckverfahren für Metalle. Die Metalle werden durch Schmelzschweißverfahren geschmolzen und aufgetragen. Es können Lichtbogenschweißverfahren(z.B. MSG, WIG oder Plasmaschweißen) mit Cu-, Ti-, Al-Legierungen und Stähle verarbeitet werden. (Henckell 2024)

Lee et al. (2024) untersuchten in einer Studie die Möglichkeit für das koreanische Endlager einen Prototypen eines Endlagerbehälters Mittels WAAM aus Cu, Cu-Sn, und Cu-Ni zu fertigen (Abb. 16). Die Behälterform ist an das Schwedische KBS-3 Konzept angelehnt. Eine Mikrostrukturanalyse der Proben konnte keine Defekte wie Poren, Risse oder Ausscheidungen aufzeigen. Die Behälter wurden unter simulierten Endlagerbedingungen auf Korrosionsfestigkeit getestet die Werte entsprachen denen von kommerziell erhältlichem Kupfer. Wie diese Bedingungen definiert wurden und welche Spezifischen Korrosionsfestigkeiten bestanden wird in dem Bericht nicht erwähnt. Die Korrosionsresistenz wird als äquivalent mit kommerziellem Kupfer beschrieben.

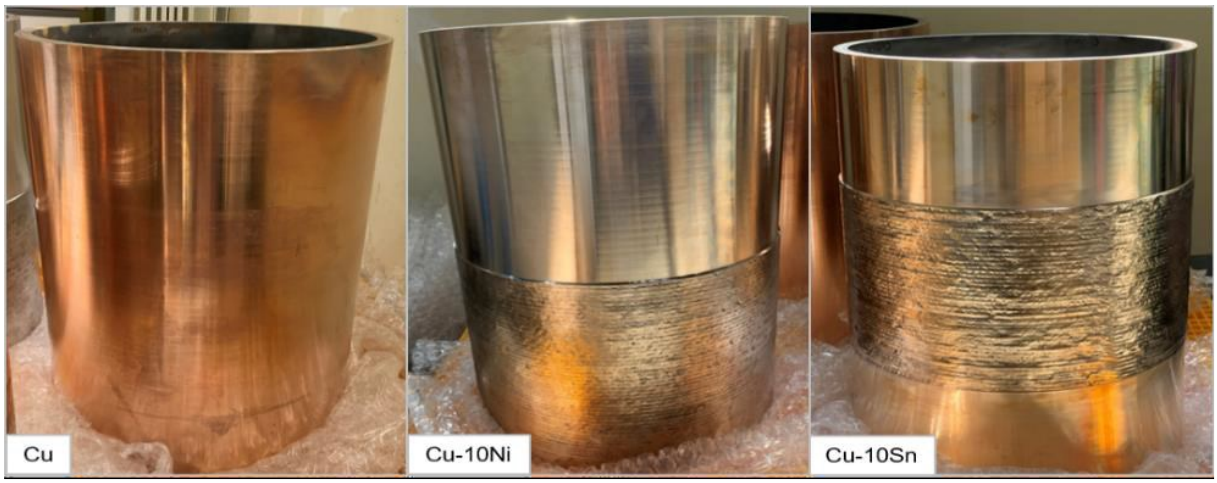


Abbildung 12 WAAM-Gefertigte Prototypen für den Koreanischen Endlagerbehälter (Lee et al. 2024)

Der Prozess des Lasersinterns ist vergleichbar, mit dem Unterschied, dass nahezu alle schmelzbaren Werkstoffe in Pulverform verwendet werden können, die Temperatur an der Auftrittstelle wird so eingestellt, dass das Pulver nicht schmilzt, sondern lediglich gesintert wird. (Grote et al. 2018)

4.4.3 Umformen

4.4.3.1 Tiefziehen

Diese werden zunächst an den Seiten eingeklemmt, dann drückt ein Stempel, angetrieben durch eine hydraulische Presse, den Rohling in die Form. Je nach Materialtyp und Blechstärke können Teile mit einer Materialstärke von weniger als 0,5 bis zu 6 mm gefertigt werden. Die Blechstärke ist vom Werkstoff und der Ausrüstung abhängig. Aluminium kann bis zu 6 mm tiefgezogen werden uns Stahlbleche problemlos bis zu 3 mm. Anwendungen finden sich in der Luft und Raumfahrtindustrie, der Automobilindustrie und der Verpackungsindustrie. (Thompson 2014; Kalpakjian 2022) Bei einer kalten Umformung wird die Festigkeit und Härte des Werkstückes an der Stelle der Umformung erhöht, dies ist durch die entstehenden Eigenspannungen zu erklären. Durch die Spannungen ist das Risiko für einen Spannungsrisskorrosion erhöht. Wärmebehandlungen wie Spannungsarmglühen können die entstandenen Spannungen reduzieren und damit das Werkstück vor Korrosion schützen. (Adam 1998) Aufgrund der geringen Werkstoffstärke ist das Tiefziehen für die Fertigung eines Endlagerbehälters als ungeeignet einzuordnen.

4.4.3.2 Schmieden

Ursprünglich wurde von Handwerkern geschmiedet indem sie Metall erhitzten und das glühende Metall durch Hämmern und mit Hilfe eines Ambos in die gewünschte Form brachten. Heutzutage gibt es verschiedene Arten zu schmieden, das heiße Metall wird gehämmert, gepresst oder gewalzt. Beim Gesenkschmieden wird das erhitzte Werkstück mit hohem Druck in seine Form gepresst. Es wird zwischen offenem und geschlossenem Gesenk unterschieden. Der obere Teil des Gesenks kann den benötigten Druck durch Fallen auf das Werkstück oder durch kontinuierliches Pressen erreichen. Der Walzschmiedeprozess wird genutzt um fortlaufende Profile zu fertigen, u.a. auch Hohlprofile wie Rohre. Durch den Schmiedevorgang wird die Kornstruktur im Werkstoff verfeinert, die Körner orientieren sich in Fließrichtung des Metalls. Spannungen an Ecken und Kanten des fertigen Werkstückes werden reduziert und Poren werden reduziert. Die Toleranzen der Werkstückfertigung liegen bei großen Teilen bei bis zu 5 mm, daher werden Gesenk geschmiedete Produkte häufig noch maschinell nachbearbeitet. Dies ist möglich ohne die Kornstruktur stark zu verändern. Kaltgeschmiedet werden in der Regel nur Werkstücke mit einem Gewicht von weniger als 10 kg. Zum Schmieden eignen sich die meisten eisenhaltigen Metalle, z.B. Kohlenstoffstahl und

Edelstähle, aber auch Titan, Kupfer und Aluminium lassen sich Schmieden. In Automobil und Raumfahrtindustrie werden geschmiedete Teile eingesetzt, sowie in für Werkzeuge und schwere Maschinen. (Thompson 2014; Groover 2002)

Dadurch dass das Werkstück nach dem Schmiedevorgang eine verbesserte Mikrostruktur, wenig Eigenspannungen und nur minimale Poren aufweist wird der Werkstoff durch die Fertigung verbessert und ist ebenfalls besser vor Korrosion geschützt. (Campbell 2013)

Für Behälterprototypen wurden in Schweden der Kupferdeckel, der Korpus und der Boden geschmiedet. (Svensk Kärnbränslehantering AB 2007)

4.4.4 Stoffschlüssiges Fügen

Diese Verfahren sind nicht nur für die Fertigung des Behälterkorpus von Bedeutung, sondern im Besonderen für den stoffschlüssigen Verschluss des Behälters in der heißen Zelle. Denn ein dichter Behälter ist ohne stoffschlüssigen Verschluss über die geforderten Zeiträume der Endlagerung nicht möglich. Nicht nur der Behälter selbst, sondern auch die Fügestellen müssen den Anforderungen an den Behälter gerecht werden.

Der Verschluss muss vollautomatische ausgeführt werden um das Personal vor der ionisierenden Strahlung zu schützen.

Beim Fügen ist zu beachten, dass dies stoff-, kraft- oder formschlüssig erfolgen kann (Grote et al. 2018). Für einen Endlagerbehälter ist eine stoffschlüssige Fügestelle erforderlich, damit die Nuklide nicht aus dem Endlagerbehälter entweichen können. Diese Stoffschlüssigkeit muss garantiert werden. Dazu müssen die Fügestellen mit zerstörungsfreien Prüfmethoden automatisiert geprüft werden können. Nur so kann sichergestellt werden, dass auch die Fügestelle die Werskstoffparameter aufweist mit der sie ausgelegt worden ist und somit die Langzeitsicherheit gegeben ist.

Die Schweißverfahren werden nach DIN 8580 in Presschweißverfahren und Schmelzschweißverfahren unterteilt. DIN 8593-6 und DIN 1910-100:2008-02 unterteilen die Kategorien weiter in die spezifischen Prozesse. Bisher sind keine Pressschweißverfahren bekannt, die für Endlagerbehälter in Frage gekommen sind, daher sollen diese in diesem Bericht nicht weiter besprochen werden. Die Unterteilung der Verfahren nach DIN 1910-100:2008-02 ist in Abb. 17 dargestellt.

Demnach sollen in dieser Reinfolge hier das Rührreibschweißen, das Lichtbogenschweißen, und das Laser- und Elektronenstrahlschweißen vorgestellt werden.

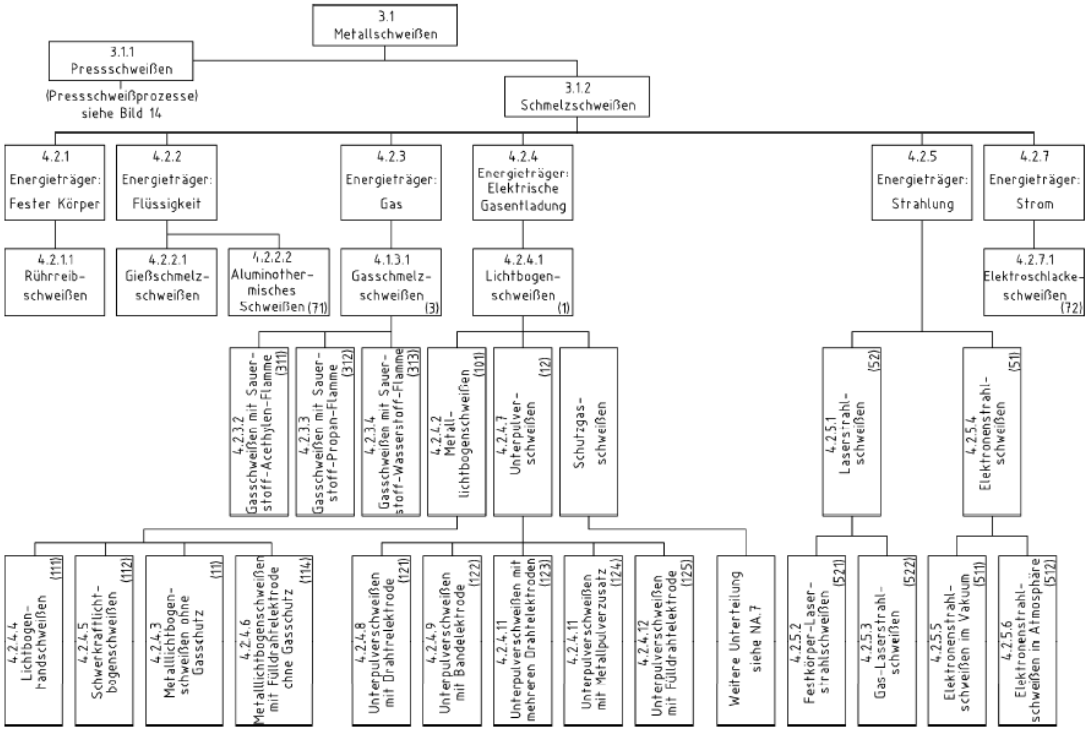


Abbildung 13 Einteilung der Schmelzschweißverfahren DIN 1910-100:2008-02

Der kanadische Endlagerbehälter soll nach dem Beladen durch Schweißen verschlossen werden, dies soll automatisiert erfolgen (Abb. 18). Es wird in Naserifard et al. (2021) nicht spezifiziert welches Schweißverfahren angewendet werden soll. Der mit Kupfer beschichtete Kohlenstoffstahlbehälter wird dazu zunächst vorgewärmt. Im Anschluss findet eine automatisierte Inspektion statt. Diese findet im Wechsel mit einer dreischrittigen Wärmebehandlung statt, welche die Duktilität des Kupfers erhöhen soll.

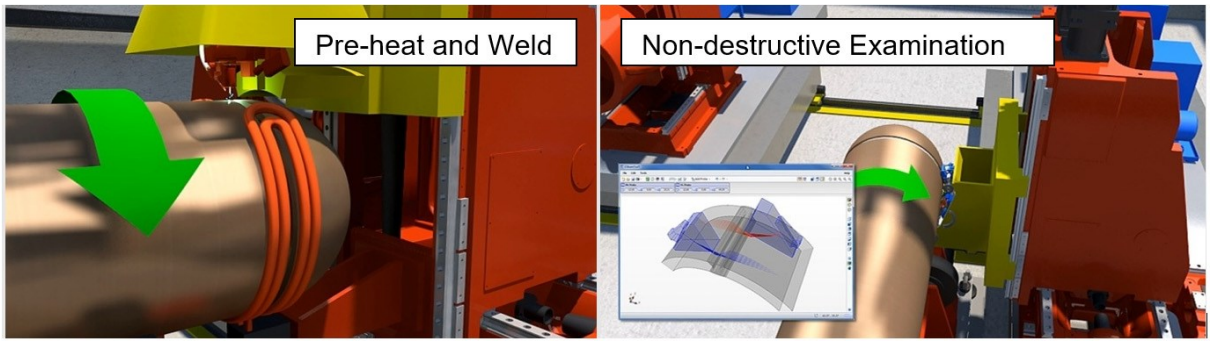


Abbildung 14 Kanadisches Konzept zum automatisierten Schweißen und Inspektion (Naserifard et al. 2021)

4.4.4.1 Rührreibschweißen

Das Rührreibschweißen (Friction Stir Welding, FSW) ist ein Festkörper-Fügeprozess, der in den 1990er Jahren entwickelt wurde. FSW nutzt die Reibungswärme, die durch ein rotierendes Werkzeug auf die Werkstoffe aufgebracht wird, um diese plastisch zu verformen und zu verschweißen, ohne sie zu aufzuschmelzen. (Thomas et al. 2005) Das Rührreibschweißen gehört zu den Pressschweißverfahren (DIN 1910-100:2008-02; DIN EN 14610:2004). Die Schweißtemperatur bei Reibschweißverfahren liegt nur bei etwa 0,5-0,8 der Schmelztemperatur und es können ohne Schweißzusatzstoffe stoffschlüssige Verbindungen hergestellt werden. (Feldmann et al. 2013)

Deckel und Boden des schwedischen bzw. finnischen Endlagerbehälters sollen mittels Rührreibschweißen mit dem Korpus verbunden werden. (Svensk Kärnbränslehantering AB 2007)

4.4.4.2 Lichtbogenschweißen.

Zum Lichtbogenschweißen gehören die Schutzgas-Schweißprozesse MIG, MAG, WIG, UP und Plasmaschweißen. Für das dickwandige Schweißen eignen sich hier besonders Engspaltprozesse. (Schuler und Twrdek 2024)

MIG-Schweißen ist ein Lichtbogenschweißverfahren, bei dem ein kontinuierlich zugeführter Draht als Elektrode und gleichzeitig als Schweißzusatzwerkstoff unter einer inerten Schutzgasatmosphäre verwendet wird. Das inerte Gas z.B. Argon oder Helium, schützt den Lichtbogen und das Schweißbad vor atmosphärischer Kontamination. Dieses Verfahren eignet sich besonders zum Schweißen von Nichteisenmetallen wie Aluminium und Kupfer und höher legierten Stählen. Es wird oft in der Automobilindustrie und im Schiffbau eingesetzt. (Schuler und Twrdek 2024)

MAG-Schweißen ähnelt dem MIG-Verfahren, verwendet jedoch stattdessen aktive Schutzgase oder Gasgemische, oft auf Basis von CO2 oder Argon mit Zusatzgasen wie Sauerstoff. Diese aktiven Gase beeinflussen den Schweißprozess und die mechanischen Eigenschaften der Schweißnaht positiv, insbesondere bei unlegierten und niedriglegierten Stählen. Dieses Verfahren ist äußerst flexibel und weit in der industriellen Fertigung verbreitet, z.B. im Maschinenbau und im Bauwesen. (Schuler und Twrdek 2024)

Beim WIG-Schweißen wird eine nicht abschmelzende Wolframelektrode verwendet, die unter einem Schutzgas aus Argon oder Helium arbeitet. Der Schweißzusatz wird manuell oder mechanisch zugeführt. Dieses Verfahren zeichnet sich durch hochwertige Schweißnähte und die Möglichkeit, dünne Bleche und nichtrostende Stähle präzise zu schweißen, aus. Es wird bevorzugt dort eingesetzt, wo hochwertige und saubere Schweißverbindungen benötigt werden, beispielsweise in der Luft- und Raumfahrttechnik. (Fahrenwaldt 2013)

Das Unterpulverschweißen (UP) ist ein automatisiertes Schweißverfahren, bei dem der Lichtbogen unter einer Schicht von Schweißpulver brennt. Das Pulver schützt das Schweißbad und bildet eine Schlacke, die die Naht bedeckt. Dieses Verfahren bietet hohe Abschmelzleistungen und wird für dicke Bleche im Schiffbau, im Brückenbau und in der Herstellung von Großrohren verwendet. Es eignet sich besonders für lange, gerade Nähte bei unlegierten und niedriglegierten Stählen. (Schuler und Twrdek 2024)

Wie beim WIG Schweißen enthält der Plasma-Brenner eine Wolfram Elektrode. Als Wärmequelle dient das Plasma, es wird stark durch eine Düse fokussiert. Das Plasma entsteht durch die Teilionisierung eines Gases (N, H, He, A oder eine Mischung daraus) durch einen Lichtbogen. Es wird zwischen Plasmabrennern mit und ohne übertragende Lichtbögen unterschieden. Wird der Lichtbogen nicht übertragen, so ist im Plasmabrenner eine Kathode verbaut. (Römpp-eLexikon; RÖMPP-Redaktion 2002d)

4.4.4.3 Elektronenstrahlschweißen

Beim Elektronenstrahlschweißen wird ein Elektronenstrahl erzeugt und durch elektromagnetische Linsen auf das Werkstück fokussiert. Der Fokuspunkt an der Oberfläche kann sehr präzise und mit einem Fokusdurchmesser von unter 0,1 mm genau und tiefenwirksam erhitzt werden. (Grote et al. 2018) Der Elektronenstrahl hat ausreichend Energie um eine Dampfkapillare tief in den Werkstoff hinein zu formen. Den Kern der Kapillare bildet überhitzter Metalldampf umgeben von zähflüssigem Werkstoff. Der dadurch entstehende Druck bestimmt die Einschweißtiefe. Aluminium kann bis zu einer Stärke von 350 mm geschweißt werden andere Metalle bis zu einer Stärke von 260 mm. (Schuler und Twrdek

2024) Elektronenstrahlen werden aufgrund der sonst erfolgenden Energieverluste im Hochvakuum angewendet, wobei immer Röntgenstrahlung entsteht. (Grote et al. 2018)

Neben dem Rühreibschweißen wurde in Schweden auch das Elektronenstrahlschweißen für die Befestigung des Kupferbehälterbodens und Deckels erwogen. (Svensk Kärnbränslehantering AB 2007) Zunächst war von der SKB nur das Elektronenstrahlschweißen untersucht worden, die Versuche begannen bereits in den 1990er Jahren. Zu dieser Zeit war das Rührreibschweißen noch nicht entsprechend weit entwickelt. Das Rührreibschweißen zeigt inzwischen jedoch einen gut kontrollierbaren Schweißprozess und Schweißnähte. (Ronneteg 2018)

4.4.4.4 Auftragschweißen

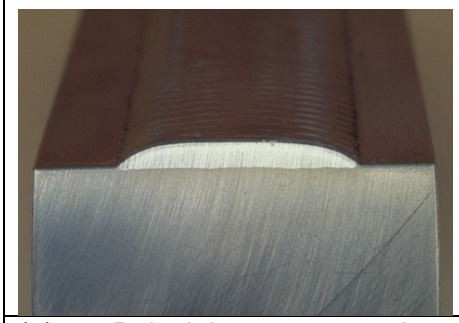
Das Ziel des Beschichtens durch Auftragschweißen ist die Schaffung einer funktionalen Oberfläche eines Werkstücks, das dadurch an die Anforderungen in der eingesetzten Umgebung angepasst wird. Im Wesentlichen ist dies die Verbesserung des Widerstands gegen Verschleiß und Korrosion. Neben dem Verfahren des thermischen Spritzens sowie den CVD- und PVD-Verfahren werden verschiedene Schweißprozesse eingesetzt. Da Schweißen zu den Fügeprozessen zählt, die im Stande sind eine einwandfreie metallurgische Bindung zwischen Legierung und Substrat zu gewährleisten, können die Oberflächen durch eine Vielzahl von Schweißverfahren aufgetragen werden. Das Beschichten eines Werkstücks durch Schweißen wird als Auftragschweißen bezeichnet. Das Aufmischen der Werkstückoberfläche mit dem aufzuschmelzenden Zusatzwerkstoff ermöglicht eine hervorragende Haftung der Schichten, Porenfreiheit sowie einen exzellenten Wärmeübergang von der Beschichtung in den Substratwerkstoff und unterscheidet das Auftragschweißen zugleich von den thermischen Spritzverfahren, bei denen die Werkstückoberfläche nicht über die Schmelztemperatur erwärmt wird (Fahrenwaldt 2013; Deuis et al. 1998; Dilthey 2006; Haefer 1987). Je nach verwendetem Schweißzusatz wird zwischen Auftragschweißen zu Reparaturzwecken und Auftragschweißen zur Erzeugung eines Werkstoffverbundes mit bestimmten Funktionen unterschieden. Neben der Instandsetzung verschlissener Oberflächen dient das Auftragschweißen in erster Linie zum Panzern (Verschleißschutz) und Plattieren (Korrosionsschutz) von Bauteiloberflächen. Außerdem wird es zum Puffern, d.h. zur Herstellung gradierter Schichteigenschaften zwischen Substrat und Deckschicht, eingesetzt.

Als Verfahren des Auftragschweißens sind prinzipiell alle Schmelzschweißverfahren einsetzbar:

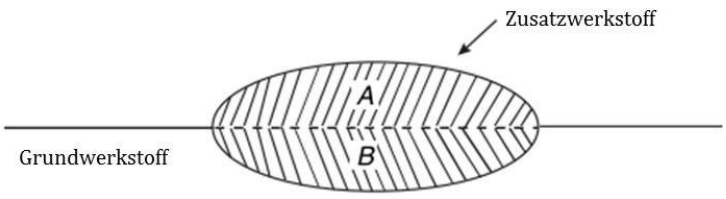
- Autogenes Auftragschweißen
- Open Arc Auftragschweißen (OA)
- Unterpulver-Auftragschweißen (UP)
- Elektroschlacke-Auftragschweißen (Resistance Electro Slag Welding)
- Metall-Schutzgas-Auftragschweißen (MSG)
- Plasma-MIG-Auftragschweißen
- Plasma-Pulver-Auftragschweißen (PPA; engl.: plasma transferred arc (PTA))
- Plasma-Heißdraht-Auftragschweißen
- Laserauftragschweißen (engl.: laser transferred arc (LTA))
- E-Hand Auftragschweißen (Lichtbogenhandschweißen)
- etc.

Beim Beschichten wird der Lichtbogen in Pendelbewegungen über die Oberfläche des Bauteils bewegt oder aber das Bauteil wird unter dem feststehenden oder pendelnden Schweißbrenner bewegt, um Schichtdicken von 1 mm und mehr zu erreichen. Die aus Legierungen oder aus Verbundwerkstoffen bestehenden Auftragswerkstoffe sind je nach Verfahren in unterschiedlichen Formen, wie Schweißstäben, endlos gespulten Schweißdrähten, Fülldrähten, Bändern, Pasten und Pulvern verfügbar (Fahrenwaldt 2013; Dilthey 2006; Haefer 1987).

Gegenüber anderen Verfahren zeichnet sich das Auftragschweißen durch die hohe Haftfestigkeit zwischen Schicht und Grundwerkstoff sowie der Porenfreiheit der Schutzschicht aus (Sudha et al. 2008). Die metallische Bindung zwischen Schicht- und Basiswerkstoff bedingt allerdings eine Vermischung der eingesetzten Werkstoffe. Je nach gewähltem Verfahren besteht die geschweißte Raupe aus unterschiedlichen Anteilen von aufgeschmolzenem Grundwerkstoff und abgeschmolzenem Zusatzwerkstoff. Der sogenannte Grad der Aufmischung des Zusatzwerkstoffs mit dem Grundwerkstoff, dem Substrat, ist neben der Abschmelzleistung der unterschiedlichen Schweißprozesse entscheidend für das Erreichen der gewünschten Eigenschaften der Auftragschicht, da sich diese meist zunehmend mit steigendem Aufmischungsgrad verschlechtern. Nach Definition wird der Aufmischungsgrad, wie in Abb. 20(b) dargestellt, als Verhältnis von Auftrag- (Fläche AA) und Einbrandfläche (Fläche AB) im Querschliff in Prozent angegeben.



(a) Beispiel einer Werkstückbeschichtung mittels PTA-Schweißens



(b) Definition des Aufmischungsgrades nach Mellor (2006) [48, 60, 102]

Abbildung 15: Darstellung der Aufmischung A mittels PTA-Schweißens

$$A = \frac{A_B}{A_A + A_B} * 100\%$$

Die Aufmischung ist also definiert als das Verhältnis von aufgeschmolzenem Bereich des Substrats zur gesamten Schmelzzone (Mellor 2006; Fahrenwaldt 2013; Dilthey 2006). Eine gewisser Grad der Aufmischung ist unverzichtbar, damit an der Grenzfläche zwischen Auftragschweißschicht und Substratwerkstoff eine metallische Bindung zwischen beiden entstehen kann. Allerdings sinkt die Widerstandskraft der Oberflächenbeschichtung gegen Korrosion und Oxidation mit zunehmendem Grad der Vermischung. So sind beispielsweise die in Ni- und Co-Basis-Legierungen enthaltenen Laves-Phasen besonders anfällig für das Ausmaß der Aufmischung (Mellor 2006).

Vor allem die Verfahren des MSG-Auftragschweißens, des Lichtbogenhandschweißens und des WSG-Schweißens werden aufgrund ihrer leichten Handhabung, der geringen Investitionskosten und der kurzen Rüstzeiten und der damit einhergehenden hohen Flexibilität häufig zum Auftragschweißen eingesetzt, um schnelle Reparaturen durchführen zu können. Der unregelmäßige und recht tiefe Einbrand sorgt jedoch im Vergleich mit anderen Verfahren für einen hohen Aufmischungsgrad. Dagegen ermöglichen die Verfahren des PTA-

Schweißens und des Laser-Auftragschweißens aufgrund der halbautomatischen und automatischen Verfahrensabläufe geringe Aufmischungsgrade von ca. 5% bei einer sehr guten Kontrollierbarkeit der Prozessparameter.

Bei den Beschichtungswerkstoffen können je nach Beschichtungsverfahren reine Hartstofflegierungen oder heterogene hartstoffhaltige Legierungen eingesetzt werden. Zu den reinen Hartstoffbeschichtungen zählen Titancarbid oder Titannitrit, die mittels PVD- oder CVD-Verfahren aufgetragen werden. In der Auftragschweißtechnik wer- den typischerweise heterogene Hartstofflegierungen angewendet. Je nach Einsatzgebiet werden Cobalt-, Nickel- oder Eisen-Basis-Werkstoffe mit arteigenen oder artfremden Hartstoffen verwendet. Verbreitet sind Co-Basis-Legierungen (Stellite) mit einer hohen Warmfestigkeit und Korrosionsbeständigkeit, Nickel-Chrom-Bor-Silicium-Legierungen (NiCrBSi) unterschiedlicher Härte sowie Nickel-Bor-Silicium-Legierungen mit Zusatz Wolframschmelzcarbid oder Eisen-Chrom-Legierungen (FeCr) mit bis zu 30% Chromgehalt.

Die verwendeten Zusatzwerkstoffe, die beim Auftragschweißen verwendet werden, sollten einen Schmelzpunkt aufweisen, der nahe dem des Grundwerkstoffs oder aber darunter liegt, da die Temperatur des als Beschichtung verwendeten Werkstoffs während des Schweißvorgangs auf den Schmelzpunkt steigt, um dann auf dem Substrat erstarren zu können. Liegt der Schmelzpunkt des Substrats weit unter dem des Zusatzwerkstoffs, schmilzt das Substrat sehr schnell auf und vermischt sich in hohem Maß mit dem zugeführten Werkstoff.

Der Wirkungsgrad der Auftragschweißung ist zum einen abhängig vom Verfahren selbst und zum anderen von der Zusammensetzung der aufgebrachten Schicht. Der Prozess ist dahingehend zu optimieren, eine hohe Abscheidungsrate, eine hohe thermische Leistungsfähigkeit, eine geringe Vermischung mit dem Substratmaterial sowie eine hervorragende Kontrolle über die Zusammensetzung der Schicht und über die Dicke der Beschichtung zu erreichen. Das Auftragschweißen zeigt hier ein enormes Potenzial, da die Beschichtungen im Vergleich zum thermischen Spritzen nur geringe Produktionskosten und eine höhere Produktivität, sowie eine einfachere Bedienung und keine Notwendigkeit einer speziellen Oberflächenvorbehandlung aufweisen. Darüber hinaus ermöglicht die Technik die Herstellung von qualitativ hochwertigen Beschichtungen mit einer guten metallurgischen Bindung bei gleichzeitig nur sehr geringer Porosität sowie hoher Flexibilität bezüglich der möglichen Zusatzwerkstoffe bestehend aus Metall-Matrix und Hartmetallphasen. Die Beschichtungen mittels Auftragschweißen zeichnen sich durch Merkmale, wie der geringe Grad der Verformung, die geringe Wärmeeinflusszone und das feine Mikrogefüge aus. (Badisch und Roy 2013; Gatto et al. 2004; Liu et al. 2007; Zhang et al. 2008).

4.4.4.5 Löten

Durch Löten lassen sich Metalle, Keramiken und Gläser miteinander verbinden. Die Schmelztemperatur der zu verbindenden Werkstücke muss dabei immer höher sein, als die des verwendeten Lotes. Ob der Prozess als Weichlöten oder als Hartlöten bezeichnet wird hängt von der Schmelztemperatur des Lotes ab. Unter 450 °C wird das Verfahren als Löten bezeichnet bei entsprechend höheren Temperaturen als Hartlöten. Für den Arbeitsvorgang spielen vier Parameter eine besondere Rolle: das Lot, das Flussmittel, die Methode zur Erhitzung des Lotes und die Spaltbreite bzw. -Tiefe in welche das Lot durch Kapillarkräfte hineingezogen wird.

Das Lot muss metallurgisch mit dem Werkstück kompatibel sein, d.h. es muss überprüft werden wie die Metalle miteinander interagieren. Gibt es eine hohe Potentialdifferenz so kann dies später zu Korrosion an der Lotstelle führen. Traditionell wurde für das Weichlöten meist Lot auf Bleibasis verwendet, welches aufgrund seiner Toxizität zunehmend durch Zinn, Kupfer und Silber ersetzt wurde. Aufgrund der höheren Schmelztemperatur sind hartgelötete

Verbindungen in der Regel stärker als gelötete. Die Wahl des Flussmittels ist abhängig von der Wahl des Lotes. Das Flussmittel sorgt für eine oxidfreie saubere Oberfläche, sodass das Lot die Werkstücke miteinander verbinden kann. Um keramische Werkstoffe besser Löten zu können werden sie häufig galvanisch mit einer dünnen Metallschicht beschichtet. Die drei meistangewandten Methoden zu Erhitzung des Lotes bzw. des Werkstückes sind der Lötkolben, Gasbrenner oder das Erhitzen des Werkstücks mit einer aufgebrachten Lötpaste in einem Ofen. Es kann jedoch auch mit Induktion und Lichtbogen gelötet werden. Lötkolben werden zum Löten angewendet, Gasbrenner meist zum Hartlöten. In Gasbrennern wird zum Hartlöten typischerweise ein Acetylen-Sauerstoff-Gemisch verwendet, zum Löten ein Gas mit niedrigeren Brenntemperatur wie z.B. Propan. Beim Hartlöten zieht sich das Lot durch Kapillarwirkung in einen Spalt zwischen den Werkstücken. Dieser Spalt muss entsprechend um 0,05 mm dimensioniert sein, ist er zu klein kann das Lot nicht in den Spalt fließen, ist er zu groß kann die Stärke der Verbindung negativ beeinflusst werden. Das Aufbringen einer Lötpaste und der Flussmittel mittels Siebdruckes gefolgt vom Erhitzen in einem Ofen ist ein Prozess, der sich sehr gut automatisieren lässt und mit dem sich eine große Anzahl von Teilen miteinander verbinden lässt. Anstelle eines Ofens kann auch ein Wärmeelement verwendet werden welches das Werkstück während des Erhitzens aber nicht berühren darf. Flussmittel werden eingesetzt um Verunreinigungen und Oxide von der Werkstoffoberfläche zu entfernen, um eine weitere Oxidation zu verhindern sowie die Oberflächenspannung des flüssigen Lotes so zu reduzieren, dass eine gute Benetzung durch das Lot stattfinden kann. Somit kann das Lot durch die Kapillarwirkung in den Spalt eindringen. Aber auch die Verfahren mit Gasbrenner oder induktiver Wärmequelle eignen sich zur Automatisierung. Da die Temperatur der Werkstücke beim Löten und Hartlöten nicht die Schmelztemperatur des Werkstoffes überschreitet und die Wärmeeinflusszone nur gering ist kommt es nur zu geringen metallurgischen Veränderungen. Es eignen sich fast alle Metalle um durch Löten verbunden zu werden. Besonders häufig wird das Verfahren für Aluminium, Kupfer, Kohlenstoffstahl, Edelstähle, Nickel und Titan angewendet. Auch Keramiken und Glas können durch Löten mit Metallen und untereinander verbunden werden. Typische Anwendungen finden sich in der Herstellung von Elektronik, z.B. das Anlöten von Komponenten auf eine Platine, aber auch Schmuck oder Küchenutensilien werden können gelötet werden. (Thompson 2014)

Werden Flussmittelrückstände nicht entfernt oder besteht eine hohe Differenz zwischen dem chemischen Potential des Lotes und des Werkstoffes so kann dies zu Korrosion führen. Die Auswirkungen dieser Einflüsse lassen sich durch das Reinigen der Lötstellen und die Wahl von Lot mit geringer Potentialdifferenz zum Werkstoff verringern. (Schuler und Twrdek 2024)

4.4.5 Mechanisches Fügen

4.4.5.1 Schrauben

Schrauben ist eine der meistgenutzten formschlüssigen Fügetechniken. Schraubverbindungen existieren in fast allen Größenordnungen. Um die Schraubverbindung kontrolliert umzusetzen sollte eine Messung des Drehmoments erfolgen. Es können auch andere Parameter, wie Drehwinkel, Reibwerte oder eine Steuerung über die Streckgrenze angewendet werden. Schraubköpfe und Gewinde bestehen in unterschiedlichen Ausführungen ausgeführt in einer Reihe von Metallen und Legierungen. Je nach Anwendung, können so die passenden Schrauben ausgewählt werden. (Feldmann et al. 2013) Bei der Konstruktion muss beachtet werden, dass die Schrauben erreichbar sind um angezogen werden zu können. Durch Schrauben werden kraftschlüssige Verbindungen erzielt.

Schraubverbindungen lassen sich vollautomatisiert ausführen. Und haben den Vorteil, dass die Verbindung sich leicht wieder lösen lässt. (Feldmann et al. 2013) Mit einer Schraube lassen sich bei entsprechender Konstruktion mehr als zwei Teile miteinander verbinden. Für viele Anwendungen gibt es Spezialschrauben, die genau auf ihren Einsatz abgestimmt sind, die an dieser Stelle aber nicht einzeln erwähnt werden können.

An Schraubverbindungen kann Spaltkorrosion auftreten. Die eingeschränkte Sauerstoffzufuhr in den Spalten kann zu einer sauerstoffarmen Umgebung führen, wo anodische Korrosionsreaktionen begünstigt werden. Dieses Phänomen wird durch Unterschiede in der Sauerstoffkonzentration zwischen dem Spaltinneren und der umgebenden Fläche weiter vorangetrieben. Besonders gefährdet sind korrosionsfeste Werkstoffe wie Edelstahl. (Revie und Uhlig 2011) Soll also eine Schraubverbindung für den Verschluss oder die Konstruktion eines Endlagerbehälters angewendet werden, so müssen eventuell verwendete Schmiermittel auf ihre Langzeitauswirkungen auf die Verbindung und die Korrosion unter den zu erwartenden Bedingungen untersucht werden. Überstehende Schraubenköpfe bieten zudem eine zusätzliche Angriffsfläche für Korrosion. Unterscheidet sich der Schraubenwerkstoff vom Behälterwerkstoff so gibt es eine Potentialdifferenz welche zu Korrosion führen kann. Zudem erleichtern Spalte zwischen Schraube und Gewinde das Eindringen von korrosiven Substanzen.

Schraubverbindungen finden sich in nahezu allen Bereichen des täglichen Lebens, vom Konsumentengüterbereich über Bauwesen, Elektronik- und Industrieanwendungen.

Die französische ASND und IRSN haben Anforderungen an Schrauben für den Transport und die Lagerung von radioaktivem Inventar in Frankreich erarbeitet. Dabei soll besonders der Herstellungsprozess der Schrauben darauf ausgerichtet sein die Wasserstoffversprödung der Schrauben zu vermindern. Aspekte wie die Reihenfolge des Anziehens der Schrauben und Schmiermittel werden ebenfalls diskutiert. (Carcreff et al. 2020) Im Castorbehälter werden Schrauben verwendet um den Deckel zu verschließen. (GNS 2023a)

4.5 Anpassung der Werkstoffeigenschaften

Nach der Fertigung des ELB-Grundkorpus können durch die Fertigung im Metall Spannungen aufgetreten sein die zu inhomogenen Eigenschaftsverteilungen des Metalls führen können. Um diesen Effekt zu minimieren, können entsprechend andere Fertigungsmethoden gewählt werden. Um die Eigenspannungen zu entfernen kann das Werkstück einer Wärmebehandlung unterzogen werden, beispielsweise dem Spannungsarmglühen. Auch andere Wärmebehandlungen können genutzt werden. Solange diese vor der Beladung des Endlagerbehälters mit dem radioaktiven Inventar erfolgen. Soll eine Wärmebehandlung nach der Beladung durchgeführt werden um z.B. Spannungen aus einer Schweißnaht des Verschlusses zu entfernen so muss darauf geachtet werden, dass das Inventar im Behälter keinen Schaden nehmen und dass es beispielsweise nie zu einem überkritischen Zustand kommen kann.

4.6 Korrosionsschutz

Nach der Fertigung des Behälterkorpus können Maßnahmen zum Korrosionsschutz ergriffen werden. Der Korrosionsschutz kann als zusätzliche Werkstoffschicht auf den Behälter aufgebracht werden oder die Werkstoffeigenschaften durch chemische Behandlungen beeinflusst werden.

Es wird zwischen aktivem und passivem Korrosionsschutz unterschieden. Der aktive Korrosionsschutz nimmt direkten Einfluss auf den Korrosionsprozess. Der Passive Korrosionsschutz hingegen stellt eine Schicht auf der Oberfläche des Werkstoffes dar, welcher verhindern soll, dass das korrosive Medium mit dem Werkstoff in Kontakt tritt. Der aktive katodische Schutz wird häufig in Wasser an Schiffen angewendet ist aber auch im Boden möglich. Der aktive Korrosionsschutz verhindert bzw. verringern das Auftreten des chemischen Vorgangs der Korrosion. Dies geschieht durch die das Anlegen eines Potentials. Der zu schützende Werkstoff ist dabei als Kathode gepolt. Wird eine Opferanode genutzt ist keine Stromquelle notwendig. An Booten können beispielsweise Opferanoden aus Zink

angebracht werden, diese müssen sobald sie aufgebraucht sind ersetzt werden. Wird eine externe Spannung angelegt ist das Austauschen der Anoden nicht notwendig, erfordert für den Zeitraum in dem der Korrosionsschutz aufrechterhalten werden soll aber eine Spannungsquelle. (Roberge 2008) In besonders aggressiven Umgebungen wie z.B. einem Tank für Schwefelsäure kommt ein anodischer Schutz zum Einsatz, dieser nutzt wie der kathodische Schutz eine Potentialdifferenz welche den Korrosionsprozess verhindert. (Perez 2004)

Die Anwendungs- und Einsatzgebiete von Beschichtungen in den unterschiedlichen Industriezweigen sind sehr vielfältig gelagert. Somit muss die Beschichtung nicht nur an die Prozesse angepasst werden, sondern auch die sehr unterschiedlichen Medien spielen eine entscheidende Rolle.

Tabelle 24: Anwendungs- und Einsatzgebiete sowie Produktionsprozesse betroffener Bauteile und Komponenten

Industrie	Anwendungen	Produktionsprozess	Medien
Automobilbau Bergbau Landwirtschaft Energieerzeugung Zementindustrie Schiffsbau Zellstoff- & Papierindustrie Stahlindustrie Abfall & Receycling Öl & Gas Straßenbau Flugzeugbau Glasindustrie Petrochemie	Auskleidungen Baumaschinen Betonpumpen Förderschnecken Keramikmaschinen Kohlemahlanlagen Kugelmühlen Lagerungen Mahl- und Schredderanlagen Mineralienaufbereitung Mischer und Trockner Erdbaumaschinen Bohrschnecken und Schneckenförderer Strangführungswalzen Mühlen u Prallmühlen Pumpenteile Rohrleitungen Sichter und Zyklone Siebanlagen Strahlmühlen Vertikal Horizontalmühlen Wasseraufbereitung Looper- u. Prismenrollen Werkzeuge Zementanlagen Ziegeleimaschinen Brecher und Zerkleinerer Rotorreiser und Rotorscheren Messer und Messerhalter Führungsbuchsen- und hülsen Formen und Schmiedegesenke Extruderschnecken Kugelventile Dichtflächen von Keilschieberplatten Ventilsitze und -kegel Turbinenschaufeln Lauf- und Dichtflächen an Armaturen Pressformen Plunger und Formen	Aufbereiten Fördern Aufbereiten Fördern Granulieren Kollergänge Kompaktieren Mischen Mahlen Sichten Sieben Trocknen Zerkleinern Verdichten	Asphalt Beton u. Porenbeton Biomasse Chemikalien Erz Feuerfestmassen Formsand, Kernsand Gestein Gips Glas Kalk Keramik Kohle Mörtel, Zement u. Putze Recyclingmaterial Sand Schrott Stahl und Eisen Ton Wasser und Schmutzwasser Ziegel Baumaterialien Wasser Säure

4.6.1 Anstriche und Lacke

Anstriche und Lacke können auf die Oberfläche mittels Pinsel, Rollen oder durch Spritzen aufgebracht werden. Sie enthalten Bindemittel, die meist auf Alkylharz- oder PU-Basis sind und damit in die Gruppe der Polymerwerkstoffe fallen. Zudem enthalten Lacke Lösungsmittel,

Pigmente, Füllstoffe und Additive. Sie können auf fast alle Werkstoffe aufgetragen werden. (Thompson 2014)

Grundsätzlich können sie vor Korrosion schützen indem sie eine Barriere zwischen dem zu schützenden Metall und korrosiven Umweltbedingungen bilden. Sie stellen also eine Möglichkeit des passiven Korrosionsschutzes dar. Zudem können die Lacke Korrosionsinhibitoren enthalten oder mit Grundierungen kombiniert werden, welche korrosionshemmende Pigmente enthalten. Durch elastische Eigenschaften der Lacke können sie mechanischen Belastungen besser standhalten.

Die Lebensdauer einer Korrosionsschutzlackierung ist abhängig von der Oberflächenvorbereitung, ist diese unzureichend so kann die Haftung beeinträchtigt sein und korrosive Medien können unter die Lackierung an das zu schützende Metall gelangen. Der Lack kann mechanisch beschädigt werden, Umwelteinflüsse wie UV-Strahlung, Temperaturschwankungen, oder die chemische Umgebung können zu Alterungserscheinungen des Lackes führen und die Schutzbarriere ebenfalls beschädigen. Wie lange die Lackierung ihre Schutzfunktion erfüllen kann hängt von der Zusammensetzung des Lackes und den Umständen seines Einsatzes, und der Eignung für diesen Einsatzzweck ab. (Thompson 2014)

Polymerwerkstoffe werden erst seit ihrer Entwicklung Anfang des 20 Jh. verwendet und die Formulierungen unterschiedlicher Lacke sind demnach noch nicht über lange Zeiträume unter Endlagerbedingungen getestet worden. Aufgrund der Eigenschaften der Polymere, welche im Kapitel der Werkstoffe beschrieben sind, sollten Lacke und Anstriche nicht für den Korrosionsschutz an einem Endlagerbehälter angewendet werden.

4.6.2 Pulverbeschichtungen:

Pulverbeschichtungen auf Polymerbasis werden hauptsächlich zum Korrosionsschutz von Aluminium und Stahl angewendet. Ein elektrostatisch aufgeladenes Polymerpulver wird auf ein geerdetes Werkstück aufgebracht. In einem zweiten Schritt wird das Werkstück bei ca. 200 °C für 30 Minuten erwärmt. Thermoplaste bilden durch die Temperaturerhöhung neue Bindungen aus und es entsteht so eine vernetzte Beschichtung. Duroplaste hingegen schmelzen nicht. Das aufgebrachte Pulver festigt sich durch eine chemische Reaktion, welche durch das Erhitzen initiiert wird. Anwendungen finden sich in der Automobilindustrie, Bauindustrie und Haushaltsgeräten. (Thompson 2014; Tracton 2006)

Da auch in diesem Prozess Polymere verwendet werden kann er nicht als alleiniger Korrosionsschutz für einen Endlagerbehälter verwendet werden.

4.6.2.1 Emaille

Unter Emaillieren versteht man das Aufbringen eines fest haftenden anorganischen-oxidischen Überzugs (der sogenannten Emaillierung) in einer oder mehreren Schichten auf Metall oder Glas. Nach DIN 50902 ist Emaillieren das Aufbringen von glasig-silicatischem Materials (des Emails) auf ein vorbehandeltes Metall. Auf ein zunächst aufgeschmolzenes Grundemail werden ein oder mehrere Deckschichten aufgebracht.

- **Emailfritte**: Unter Emailfritte wird das durch – in der Regel nicht völlig homogenisierende – Schmelzen oder Sintern eines Rohstoffgemenges entstandene, abgekühlte (abgeschreckte), meist glasig erstarrte und inhomogene Email verstanden. Die Emailfritte fällt je nach Technologie in Form von Granalien, Flocken oder Schuppen an. (Größe von Emailfritten < 10 µm).
- **Emailschlicker**: Der aus der Mühle kommende Schlicker stellt eine Dispersion mit sahniger Beschaffenheit von Feststoffen (Fritte, Ton, z. T. Quarz) in Wasser mit gelösten Salzen dar.

- **Bestandteile des Emails**: Je nach Anwendung und Verfahren setzt sich ein Email in unterschiedlichen Konzentrationen aus den folgenden Stoffen zusammen: Quarz, Feldspat, Soda, Borax, Haftoxide, Flussspat, Oxidationsmittel, Kryolith, Trübungsmittel. Wird ein Werkstück mit einer Emaillierung beschichtet, wird dadurch seine Oberfläche wirksam vor Korrosion, Oxidation und Verschleiß geschützt, Gleiteigenschaften sowie Isolationsfähigkeit verbessert sowie die Hitze-, Säure- und Laugenbeständigkeit des Bauteils erhöht. Außerdem dient eine Emaillierung oft optischen Gesichtspunkten (Dekor).

Grundoperationen zur Emaillierung

Emaillieren ist ein relativ aufwendiges Verfahren, das nur von Experten mit der richtigen Ausrüstung durchgeführt werden kann. Es umfasst folgende Arbeitsschritte:

- **Herstellung der Emailfritte** aus den Rohstoffen: Quarz, Feldspat und Soda werden zusammen mit den anderen Bestandteilen gemahlen und vermischt. Dem anschließenden Schmelzen der Mischung in einem Trommel- oder Konti-Ofen bei etwa 1200° C folgt ein rasches Abschrecken der Schmelze in Wasser oder zwischen gekühlten Stahlrohren.
- **Vorbehandlung der Oberfläche** des Werkstückes: Die Bedingung einer absoluten Sauberkeit der Oberfläche für eine einwandfreie Emaillierung wird durch eine Nassbehandlung in Bädern in bis zu 14 (!) Arbeitsschritten erreicht. Im Wesentlichen handelt es sich um Entfetten, Beizen (z. B. mit 10%iger Schwefelsäure), Nachfetten, dem Tauchen in ein Nickelbad (bei einer Einschichtemaillierung), das Passivieren mit 3 bis 5%iger Natriumnitrid-Lösung und dem abschließenden Trocknen. Die Abfolge der Arbeitsschritte ist in modernen Anlagen automatisiert. Die genauen Zusammensetzungen der Bäder, ihre Aufeinanderfolge und Funktionen sind von den Trägerstoffen abhängig. Gusseiserne Werkstoffe werden häufig nur trocken geputzt und sandgestrahlt.
- **Herstellung des Emailschlickers**: Emailfritte, Ton, Farbkörper und Trübungsmittel werden zusammen, meist nass, in Kugelmühlen vermahlen. Durch die anschließende Hinzugabe eines Stellmittels, welches die Fließeigenschaften des Versatzes verbessert, entsteht der fertige Emailschlicker.
- **Emailauftrag** auf den Trägerstoff: Hierzu gibt es zwei unterschiedliche Verfahren:
    - Nassauftragen (mit Emailschlicker)
      Es wird der passend eingestellte Schlicker durch Tauchen, Fluten, Begießen oder bei Hohlkörpern durch Hereinsaugen mittels Vakuum direkt auf die zu emaillierende Oberfläche aufgebracht.
    - Trockenemaillierung (mit Frittenpuder)
      Bis vor wenigen Jahren war fast ausschließlich die Emaillierung von Graugussteilen technisch möglich. Das Emailpulver wird je nach Verfahren heiß oder kalt aufgestäubt, aufgeblasen, mittels Aufbau eines elektrostatischen Feldes aufgebracht oder das Werkstück selbst wird in den Puder getaucht. Mit der Trockenemaillierung entstehen sehr glatte und hochglänzende Emailschichten.
- **Emailbrand**: Nach dem Auftragen der Emaillierung wird das Werkstück in einem Kammer- oder Durchlauftunnelofen bei ca. 780° C bis 900° C (Stahlbleche und Gusswerkstoffe) gebrannt. Die Brenndauer richtet sich nach der Größe des Werkstückes und beträgt in der Regel zwischen 10 und 30 Minuten. Nach dem ersten Brennen erfolgt die Kontrolle der Beschichtung und eventuell das Anbringen eines Dekors bevor eventuell (je nach Emailsorte) noch ein zweiter Brand erfolgt.

Schichtaufbau

Hinsichtlich des Schichtaufbaus einer Emaillierung wird unterschieden in:

- Konventionelle Emaillierung bei der zuerst das Grundemail aufgebracht, getrocknet und eingebrannt wird. In einem zweiten Verfahrensschritt erfolgt der Auftrag und Einbrand der Deckemaillierung.
- Direktemaillierverfahren: Hier wird gleich nach einem einzigen, einschichtigen Emailauftrag eingebrannt.
- Kombiniertes Verfahren (two coat-one fire) bei dem der Deckemail auf ein zuvor noch nicht eingebranntes Grundemail aufgetragen wird.

Die Grundemailschichtdicke beträgt dabei ca. 0,2-0,3 mm und das Deckemail hat eine Schichtdicke von 1-2 mm

Eigenschaftsprofil von Emaille

Emaille hat eine glasartige, amorphe Struktur und eine sehr hohe Resistenz gegen Korrosionsangriff, insbesondere auch saurer Medien. Das macht das Material sehr beliebt in der chemischen Industrie. So gibt es z.B. riesige Tanks, welche komplett emailliert sind und zur Lagerung von alkalische Chemikalien verwendet werden.

Hoher Verschleißwiderstand gegen abrasiv wirkende Medien mit hoher Kratzfestigkeit. Dazu kommt die glatte, porenfreie Oberfläche, welche das Reinigen von Emaille- Geschirr sehr einfach gestaltet.

Ein Charakteristikum ist die Stoßempfindlichkeit bei punktueller NBelastung durch die spröden glasartigen Werkstoffeigenschaften des Emails.

Das Material ist sehr hitzebeständig bis zu Temperaturen von 400°C.

Die Oberfläche ist absolut geschmacksneutral. Auch bei hoher Erhitzung können sich keine giftigen und gesundheitsschädigende Dämpfe oder Partikel bilden.

Emaille ist Glas und somit empfindlich auf schnelle Temperaturwechsel. Ein rapider Temperatursturz kann zu Absplitterungen führen.

Beispielhaft besteht eine Grundemaille aus

- 34 % Borax
- 28 % Feldspat
- 5 % Fluorid
- 20 % Quarz
- 6 % Soda
- 5 % Natriumnitrat
- je 0,5 bis 1,5 % Cobalt-, Mangan- und Nickeloxid.

Eine Deckemaille hingegen weist eine leicht andere Zusammensetzung auf, da diese andere Eigenschaften haben muss. Z.B.:

- 23 % Borax
- 52 % Feldspat
- 5 % Fluorid
- 5 % Quarz
- 5 % Soda
- 2,5 % Natriumnitrat
- je 0,5 bis 1,5 % Cobalt-, Mangan- und Nickeloxid
- 6,5 % Kryolith

Je nach Emaille-Mischung ist der Schmelzpunkt bei 500 bis 900°C.

Anwendung im Behälter- und Rohrleitungsbau

Emaillebeschichtungen werden industriell im Bereich der chemischen Industrie eingesetzt und sind an Großbauteilen keine Seltenheit, wenn Korrosionsschutz und Verschleißschutz gefordert sind (Abb. 19). Dabei sind die Schichten sowohl an der Behälteraußenseite, als auch im Behälterinneren anwendbar. Beschichtet werden können dabei Gusseisen sowie nahezu alle Stahllegierungen, wobei sich dabei die Zusammensetzung des Emaille ändern kann. Ebenfalls kann die Zusammensetzung der Emaille hinsichtlich der Anforderungen an die jeweilig zu leistende Eigenschaft angepasst werden. (Jiang et al. 2023)

Abbildung 16: Emaillierte Rührbehälter und Reaktoren (Quelle: THALETEC GmbH; https://thaletec.com/produkte/emaillierte-ruehrbehaelter-und-reaktoren)

Dabei sind Emaille Schichten reparierbar, indem erneut der Werkstoff auf beschädigte Stellen aufgebracht und aufgeschmolzen wird.

Im Bereich voremaillierter Rohre besteht zudem die Möglichkeit des Schweißens der Rohrverbindung, wobei die Emaille aber an der Schweißstelle entfernt werden muss, da es sonst zu einer Schädigung kommen kann. Anschließend ist die vollständig wiederherstellbar, indem der Schweißnahtbereich erneut emailliert wird. (Ryabova et al. 2021)

Für Reparaturen ist dabei eine große Toleranz möglich, da z.B. Schweißnähte nicht aufwändig geglättet werden müssen. Die Emailleschicht passt sich bei Reparaturen nachweislich sehr gut der Topographie der Reparaturstelle an. (Sternadelova 2023)

4.6.3 Galvanische Beschichtungen

Um eine galvanische Beschichtung aufzubringen wird das Werkstück in eine galvanische Zelle eingetaucht, darin befindet sich ebenfalls ein Elektrolyt mit den gewünschten Ionen, die auf die Oberfläche aufgebracht werden sollen. Durch das Anlegen einer Spannung werden die Ionen auf der Werkstückoberfläche angelagert. Die spezifischen Reaktionen und Verfahren unterscheiden sich je nach Beschichtungswerkstoff. Galvanische Beschichtungen können zum Aufbringen von Zn, Ni und Cr angewendet werden.

4.6.4 Kathodischer Schutz

: Entsprechend DIN 50900-2 ist der kathodische Korrosionsschutz ein Verfahren bei dem der zu schützende Werkstoff zu einer Kathode gemacht wird. Dies kann durch die Anwendung einer Opferanode, einer Gleichstromquelle oder Streustromableitung erfolgen. Das Metall einer Opferanode muss unedler sein als die des zu schützenden Teils. Die Anode wird elektrisch leitend verbunden. Kommt es zu einem korrosiven Angriff, so führt dies nicht zu Korrosion am zu schützenden Teil, sondern die Elektronen werden zur Opferanode geleitet

und diese korrodiert an dessen Stelle indem sich deren Metallkörper auflöst. Mit der Zeit verbraucht sie sich und muss ersetzt werden, um den Schutz aufrecht zu erhalten. Meist werden Stähle oder andere Eisenbasislegierungen geschützt. Als Opferanoden werden Zink, Aluminium oder Magnesiumlegierungen verwendet.

Ein kathodischer Korrosionsschutz mit Opferanode wird z.B. an Offshore Windenergieanlagen, Schiffen und Bojen angewendet um die metallischen Trägermaterialien unter Wasser vor der Korrosion zu schützen. (Holze und Behler 2013)

Ein kathodischer Korrosionsschutz ist für einen Endlagerbehälter theoretisch möglich, praktisch aber nur schwer umzusetzen. Bei der Anwendung einer Gleichstromquelle müsste diese verlässlich für den Einlagerungszeitraum betrieben werden. Da es sich um sehr lange Zeiträume ohne direkte Beobachtungs- und Eingriffsmöglichkeit handelt, ist dies nicht zu garantieren. Opferanoden müssten so ausgelegt werden, dass sie für den gesamten Zeitraum ausreichend sind. Da sie in einem verschlossenen Tiefenlager nicht ausgetauscht werden können und die auf ihrer Oberfläche entstehenden Oxidschichten, den weitern Ausgleich der Potentialdifferenz behindern, wäre ihre Konstruktion mit vielen Herausforderungen verbunden.

4.6.5 Eloxieren

Titan und Aluminium und Magnesium können elektrochemisch mit einer Oxidschicht versehen werden. Diese Oxidschicht schützt sie vor weiterer Korrosion. Das Werkstück wird zunächst gereinigt und geätzt. Dann wird das Werkstück in eine Galvanische Zelle gegeben. Es bildet die Anode. Als Elektrolyt wird meist eine verdünnte Schwefelsäure verwendet. Eine Spannung wird angelegt und es entsteht Sauerstoff auf der Oberfläche des Werkstückes, dieser führt zur Oxidation der Oberfläche. Stärke und Dauer der angelegten Spannung beeinflussen die Dicke der Oxidationsschicht. (Thompson 2014)

4.6.6 Chemische Beschichtungen

Chemische Beschichtungen werden durch eine chemische Reaktion der Werkstoffoberfläche mit einem Reduktions oder Oxidationsmittel hergestellt. Dadurch bildet sich eine Schicht auf der Oberfläche des Werkstoffes.

4.6.7 Phosphatieren

Durch dieses Verfahren werden phosphathaltige Schichten auf dem Metall abgelagert. Es wird in vier Schritten durchgeführt. Zuerst wird der Eisenbasiswerkstoff mit einer Trititanphosphatlösung aktiviert, dann wird er in der Phosphatlösung phosphatiert, nachpassiviert und getrocknet. Die Phosphatlösungen haben je nach Anwendung unterschiedliche Zusammensetzungen, sie enthalten Phosphorsäure und beispielsweise Zinkphosphat, Manganphosphat für eine bessere Resistenz gegenüber alkalischen Medien oder Nickelphosphat für einen besseren Korrosionsschutz. Das Phosphatieren alleine ist kein Korrosionsschutz, es eignet sich als Grundlage zum Pulverbeschichten oder elektrotauchlackieren, es kann den Korrosionsschutz in Kombination mit diesen Verfahren verbessern. (RÖMPP-Redaktion 2002c) Da es sich beim Pulverbeschichten als auch beim Elektrotauchlackieren um Beschichtungen handelt die unter anderem Polymere enthalten, sind diese entsprechend nicht als bevorzugte Korrosionsschutzmaßnahme für einen Endlagerbehälter zu bewerten. Eventuell ließe sich das Phosphatieren mit anderen Beschichtungsverfahren kombinieren und würde im Zusammenhang mit diesen zu einem verbesserten Korrosionsschutz beitragen.

4.6.8 Vernickeln

Chemisches Vernickeln auch Autokatalytisches Vernickeln genannt, ist ein Beschichtungsverfahren, bei dem ein Nickel-Phosphor- oder Nickel-Bor-Überzug ohne elektrischen Strom auf ein Substrat aufgetragen wird. Es erfolgt die Metallabscheidung durch eine chemische Reaktion, bei der das zu beschichtende Teil in eine wässrige Lösung mit

Nickel-Ionen und einem Reduktionsmittel (oft Natriumhypophosphit) eingetaucht wird. Dieser Prozess führt zu gleichmäßigen Beschichtungen, unabhängig von der Geometrie des Teils (Mallory 1990). Es können gleichmäßige Schichtdicken erzielt werden. Die resultierende Nickelschicht ist hart und korrosionsbeständig, was sie für Anwendungen in der Automobil-, Luftfahrt- und Elektronikindustrie geeignet macht. Darüber hinaus kann das chemische Vernickeln ausgezeichnete Abnutzungsbeständigkeit und Reibungseigenschaften aufweisen, insbesondere wenn es durch Wärmebehandlung nach der Beschichtung verbessert wird. (Paunovic und Schlesinger 2011)

Chemisches Vernickeln wird als Innenbeschichtung des Castor-Behälters angewendet. (Behrens et al. 2012)

4.6.9 Thermisches Spritzen

Die thermischen Spritzverfahren lassen sich unterteilen in Drahtflammspritzen, Pulverflammspritzen, Hochgeschwindigkeitsflammspritzen, Lichtbogendrahtspritzen und Plasmaspritzen. Sie unterscheiden sich durch die Form des verwendeten Spritzzusatzes und des Brennstoffes (siehe Tabelle 12)

Tabelle 25 Thermisches Spritzen Überblick (Zoch und Spur 2015)

	Spritzzusatz	Gaszusammen-setzung	Partikel-geschwindigkeit max. m/s
Drahtflammspritzen	Draht, fast jeder Werkstoff der als Draht gezogen werden kann	Acetylen, Propan, Ethen, Methan, Erdgas, Wasserstoff, Sauerstoff	200
Pulverflammspritzen	Pulver (+ alle Thermoplaste)		50[15]
Hochgeschwindigkeits-flammspritzen	Pulver oder Draht	Propan, Ethen, H_2, Acetylen, Kerosin, Ethanol, Petroleum	350
Lichtbogendraht-spritzen	Draht	elektronisch	40-150[16]
Plasmaspritzen	Pulver	Elektronisch /Plasmagas	50[17]
Detonationsspritzen	Pulver	Acetylen/ Sauerstoff	900[18]

Das Pulverflammspritzen erzeugt homogenere Oberflächen als das Drahtflammspritzen und der Oxidgehalt ist geringer. Das Hochgeschwindigkeitsflammspritzen ersetzt das Detonationsspritzen, die Resultate sind vergleichbar. Das Hochgeschwindigkeitsflammspritzen erzeugt geringe Oberflächenrauheiten und Porosität von 1-5 % erreichen, die Oxidation ist gering und die Partikel durchgehen weitestgehend keine Phasenumwandlungen (Davis 2004). Die Porosität von thermisch gespritzten Beschichtungen variiert stark in Abhängigkeit vom Verfahren, den Prozessparametern und den verwendeten Materialien. Typische Porositätswerte für verschiedene thermische Spritzverfahren liegen im

[15] Kainer 2004.
[16] Friedrich und Müller 2024.
[17] Kainer 2004.
[18] Kainer 2004.

Bereich von wenigen Prozent bis zu über 20 %. Bei konventionellen Flammspritzverfahren können Porositäten in der Größe von 5 % bis 15 % häufig auftreten, bedingt durch die vergleichsweise niedrigen Teilchengeschwindigkeiten und Temperaturen (Pawłowski 2008). Das Plasmaspritzen kann, abhängig von der Einstellung der Parameter, zu Porositäten im Bereich von etwa 2 % bis 10 % führen, wobei durch Optimierung des Prozesses, etwa durch Verwendung inert oder reduziert wirkender Atmosphären, die Porosität weiter reduziert werden kann (Davis 2004).

Durch die Porosität in der Beschichtung ist die Korrosionsschutzwirkung,gerade über die langen Zeiträume in denen sie für einen Endlagerbehälter benötigt wird, nicht gegeben, da damit nicht garantiert ewrden kann, dass die Schicht tatsächlich dicht ist. Das Lichtbogendrahtspritzen nutzt zwei Drähte, welche den Beschichtungswerkstoff darstellen, diese müssen elektrisch leitfähig sein. (Rodriguez Diaz et al. 2023) Nichtleitende Materialien können als Kaltdraht zugeführt und verarbeitet werden. Mittels eines Gases (Argon, Stickstoff, Luft etc.) werden die abschmelzenden Drähte verspritzt. Die Verwendung von inerten Schutzgasen minimiert die Oxidation. In diesem Prozess werden keine Brenngase oder -stoffe benötigt, sie können als Zerstäubergase zu Verbesserung der Schichtqualität eingesetzt werden. Mittels Plasmaspritzen können hochschmelzende Werkstoffe wie z.B. technische Keramiken verarbeitet werden. (Zoch und Spur 2015)

Kupferbasislegierungen können als Beschichtungen aufgebacht werden, dies erfolgt durch Lichtbogen-, Laserauftragsschweißenschweißen oder thermisches Spritzen. Durch den Lichtbogen können Silizium-, Phosphor- und Aluminiumbronzen aufgebracht werden. Diese Legierungen weisen eine geringe Korrosionsfestigkeit und sind anfällig für abrasiven Verschleiß. Durch thermisches Spritzen können Aluminiumbronzen und Kupfer-Zinn-Legierungen aufgetragen werden, welche zur Vermeidung von Adhäsionsverschleiß, Reibungsverschleiß und Kavitationsverschleiß dienen. (Davis 2001)

4.6.9.1 Kaltgasspritzen

Bei diesem Beschichtungsverfahren wird ein Metallpulver mittels eines vorgeheizten Trägergases wie Helium oder Stickstoff durch eine De-Laval-Düse beschleunigt. Die Temperatur des Gases beträgt beispielsweise für Titan 1000 °C (Binder et al. 2011). Der Gasverbrauch ist im Vergleich zu thermischen Spritzverfahren höher. Trifft das Pulver auf die zu beschichtende Oberfläche so findet eine Kaltverschweißung der Partikel statt, welche fast ausschließlich auf die kinetische Energie der Partikel zurückzuführen ist. (Zoch und Spur 2015)

Die Partikelgeschwindigkeit beim Kaltgasspritzen beträgt über 500 m/s. (Kainer 2004)

Es können nicht nur Metalle durch Kaltgasspritzen beschichtet werden, sondern auch Gläser und Verbundwerkstoffe. Vorteile des Kaltgasspritzens ist die hohe Dichte, die durch dieses Verfahren erzielt werden kann. Auch die Bindungsstärke zwischen Substrat und Beschichtung ist gut. Schichten können in unterschiedlicher Stärke aufgetragen werden, auch dicke Schichten sind möglich, aber es können sich in der Beschichtung Eigenspannungen ausbilden. Daher wird das Kaltgasspritzen auch genutzt um Beschichtungen zu erstellen, welche sonst durch Elektroplattieren hergestellt werden. Da die Metallpartikel nicht geschmolzen werden können auch Schichten unterschiedlicher Werkstoffe wie z.B. Aluminium und Kupfer übereinandergeschichtet werden. Dies wäre mit anderen Spritzverfahren nicht möglich, da die Partikel dort zu heiß werden. Während des Auftrages können die Partikel nicht oxidieren, da Inertgas verwendet wird. Jeder Partikel weißt zwar eine dünne Oxidschicht auf, während sie vom Inertgas transportiert wird. Beim Aufprall auf das Substrat wird diese Oxidschicht abgesprengt und durch das Gas weggeblasen. Die Partikel binden nun an das Substrat. Die Korrosionsresistenz der kaltgasgespritzten Werkstoffe ist zum Teil höher, als die der Standardwerkstoffe (Borchers et al. 2003). Durch den kalten Auftrag verliert die Beschichtung

im Gegensatz zum Ursprünglichen Werkstoff an Duktilität, da die Partikel plastisch verformt werden. Die Duktilität kann durch Wärmebehandlungen wieder hergestellt werden. (Karthikeyan 2007)

Die Kupferbeschichtung des kanadischen Endlagerbehälters soll durch Kaltgasspritzen aufgetragen werden und im Nachgang durch Glühen Wärmebehandelt werden um eine duktile Beschichtung zu erhalten. (Naserifard et al. 2021)

5 Eignung von Fertigungsverfahren und Werkstoffen

Für die Anforderungen an den Endlagerbehälter wurden in der Endlagerbehälterforschung bekannte Werkstoffgruppen beschrieben und hinsichtlich der erarbeiteten Parameter Korrosionsfestigkeit, Streckgrenze, Wärmeleitfähigkeit und Dichte beschrieben und verglichen. Aufgrund lückenhafter relevanter Korrosionsdaten kann dieser Aspekt noch nicht ausschlaggebend für einen spezifisches Metall entschieden werden. Da sich Korrosion nicht direkt auf andere Werkstoffgruppen wie Gläser und Keramiken übertragen lässt können auch diese trotz ihrer guten chemischen Resistenz nicht direkt verglichen werden. Da Metalle abgesehen von Edelmetallen nicht in ihrer Reinform vorkommen streben sie danach in ein Gleichgewicht mir ihrer Umgebung zu kommen. Diese Reaktion führt in der Regel zu einer Oxidation des Metalls. Die Oxidationsstufen dürften denen entsprechen die in den Erzen des jeweiligen Metalls vorliegen. Gerade über einen Zeitraum von 1 Mio. Jahren, welche für die Einlagerung des HAW vorgesehen ist, ist diese Gleichgewichtsrektion von Bedeutung, da sie auch bei einem sehr langsamen Ablauf einen relevanten Einfluss auf den Zustand des Behälters hat. Der Vorteil von Keramiken gegenüber Metallen ist in dieser Hinsicht offensichtlich, da diese meist schon in ihrer Oxidform vorliegen und daher weniger reaktionsfreudig gegenüber ihrer Umwelt sind. Polymere sind historisch relativ neue Werkstoffe, über deren Verhalten über Zeiträume vergleichbar mit der Einlagerung der HAW nur wenig bekannt ist. Es zeigt sich, dass die kovalenten Polymerbindungen unter gegebenen Umständen durch Hydrolyse zerfallen und einen porösen Werkstoff hinterlassen können. Aufgrund dieser Eigenschaften sind sie nicht als Hauptwerkstoff für einen Endlagerbehälter geeignet.

Hinsichtlich Druckfestigkeit, Dichte und Wärmeleitfähigkeit eignen sich sowohl die meisten Metalle als auch Keramiken Wird die Duktilität mit in Betracht gezogen so eignen sich Keramiken und Gläser weniger gut, da sie eher brechen als Metalle. Aufgrund dieser Vorauswahl bezieht sich die Recherche der Fertigungsmethoden hauptsächlich auf Fertigungsmethoden zur Verarbeitung von Metallen. Es werden Fertigungsmethoden zur Erstellung des Behälterkorpus, des Verschlusses und zu möglichen Beschichtungen vorgestellt.

Weiterhin untersucht werden sollte die Korrosion unter tatsächlichen Endlagerbedingungen. Dazu sollte eine weite Bandbreite von keramischen und metallischen Werkstoffen mit und ohne Korrosionsschutzbehandlungen geprüft werden. Zudem sollten die Auswirkungen dieser Korrosionsschutzbehandlungen auf die anderen Anforderungen an den Endlagerbehälter untersucht werden.

Nicht gezielt betrachtet wurde in diesem Projekt das Verhalten und die Anforderungen an die Werkstoffe in jeglichen außerplanmäßigen Situationen, wie z.B. einem Brand während der Beladung der Behälter oder während der Einlagerung in das Endlager. Die entsprechenden Parameter konnten im Rahmen dieses Berichtes nicht erarbeitet und angewendet werden.

Die erzielten Ergebnisse können als Anhaltspunkt für weitere Untersuchungen dienen und somit erweitert werden. Diese Informationsbasis kann letztlich für die Planung und Konstruktion eines Endlagerbehälters genutzt werden.

Es zeigt sich, dass die Herstellbarkeit, also die Produktionstechnik zur Herstellung eines endlagerfähigen Behälters entsprechend der Anforderungsbedingungen ein komplexer und von der Materialauswahl nicht unabhängiger Faktorist. Das heißt, das dieser Punkt von Begin der Behälterentwicklung mitgedacht werden muss, um weder an der Skalierbarkeit der geometrischen Dimension des Behälters noch an der Frage des hermetischen Verschlusses zu scheitern. Ohne diese Betrachtungen können sich Pfade, auf denen nur Teilentscheidungen getroffen werden, als Sackgassen entpuppen und bedürfen ggf. ein

Umsteuern an Stellen im Verfahren die zu großen Vertrauensverlusten und Akzeptanzproblemen führen.

Durch die Ergebnisse dieses und der erweiterten Untersuchung dieser Daten kann der Bevölkerung ein transparentes Bild über die verfügbaren Werkstoffe und ihre Eignung informiert werden. Zum Zeitpunkt der Entwicklung eines Endlagerbehälters kann die Argumentation für die Wahl des Werkstoffes und der Fertigungsmethoden mit der Recherche dieses Berichtes unterfüttert werden.

6 Literaturverzeichnis

Adam, Peter (1998): Fertigungsverfahren von Turboflugtriebwerken. Basel, s.l.: Birkhäuser Basel (Springer eBook Collection Computer Science and Engineering).

Ahn, Dong-Gyu (2013): Hardfacing technologies for improvement of wear characteristics of hot working tools: A Review. In: Int. J. Precis. Eng. Manuf. 14 (7), S. 1271–1283. DOI: 10.1007/s12541-013-0174-z.

Akao, Yoji (1990): Quality function deployment. Integrating customer requirements into product design. Cambridge, Mass.: Productivity Press.

Ambika, M. R.; Nagaiah, N.; Prashantha, K. (Hg.) (2020): Investigation of unsaturated polyester based polymer composite radiation shields. Inernational Conference on Advances in Materials Research. Bangalore, India, 25 - 27 July 2019 (2274 Issue 1). Online verfügbar unter https://doi.org/10.1063/5.0023047.

Ambika, M. R.; Nagaiah, N.; Suman, S. K. (Hg.) (2017): A new polyester based polymer composite for shielding soft gamma rays. AIP Conference Proceedings.

Angell, C.A (1991): Relaxation in liquids, polymers and plastic crystals — strong/fragile patterns and problems. In: Journal of Non-Crystalline Solids 131-133, S. 13–31. DOI: 10.1016/0022-3093(91)90266-9.

Antheunis, Harro; van der Meer, Jan-Cees; Geus, Matthijs de; Kingma, Wieb; Koning, Cor E. (2009): Improved Mathematical Model for the Hydrolytic Degradation of Aliphatic Polyesters. In: Macromolecules 42 (7), S. 2462–2471. DOI: 10.1021/ma802222m.

Armand, Gilles; Plas, Fréderic; Talandier, Jean; Dizier, Arnaud; Li, Xiang Ling; Levasseur, Severine (2023): Contribution of HADES URL to the development of the Cigéo project, the French industrial centre for geological disposal of high-level and long-lived intermediate-level radioactive waste in a deep clay formation. In: SP 536 (1), S. 237–256. DOI: 10.1144/SP536-2022-98.

Arnold, Bożena (2019): Zirkon, Zirkonium, Zirkonia - ähnliche Namen, verschiedene Materialien. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.

Ashby, Michael F. (2011): Materials selection in mechanical design. 4. ed. Amsterdam, Heidelberg: Butterworth-Heinemann, zuletzt geprüft am 16.01.2024.

Ashby, Mike (2013): Designing architectured materials. In: Scripta Materialia 68 (1), S. 4–7. DOI: 10.1016/j.scriptamat.2012.04.033.

Badisch, E.; Roy, Manish (2013): Hardfacing for Wear, Erosion and Abrasion. In: Manish Roy (Hg.): Surface Engineering for Enhanced Performance against Wear. Vienna: Springer Vienna, S. 149–191.

Bargel, Hans-Jürgen; Schulze, Günter (2018): Werkstoffkunde. 12., bearbeitete Auflage, korrigierter Nachdruck. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg (Lehrbuch).

BASE (2024): Salzgrus. Online verfügbar unter https://www.base.bund.de/SharedDocs/Glossareintraege/DE/S/salzgrus.html, zuletzt geprüft am 2024.

DIN EN 10020: Begriffsbestimmung für die Einteilung der Stähle.

Behrens, S.; Hassel, T.; Bach, Fr. W.; Steinwarz, W.; Dyllong, N.; Tragsdorf, I. M. (2012): Schutz durch Hochgeschwindigkeits-flammspritzschichten auf dickwandigen end- und zwischenlagerbauteilen zur reduktion von reparaturen korrosion und kosten - SHARK - Ein überblick zum abschluss des projektes. In: ATW - Internationale Zeitschrift fur Kernenergie 57 (4), S. 250–254.

Berns, Hans (1998a): Entstehung des Gefüges bei der Fertigung. In: Hans Berns (Hg.): Hartlegierungen und Hartverbundwerkstoffe. Gefüge, Eigenschaften, Bearbeitung, Anwendung. Berlin, Heidelberg, s.l.: Springer Berlin Heidelberg, S. 13–25. Online verfügbar unter https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-642-51505-7_2.

Berns, Hans (1998b): Hartlegierungen und Hartverbundwerkstoffe. Gefüge, Eigenschaften, Bearbeitung, Anwendung. Berlin, Heidelberg, s.l.: Springer Berlin Heidelberg.

Berns, Hans; Theisen, Werner (2006): Grundlagen der Eisenwerkstoffe. Stahl und Gusseisen ; mit 45 Tabellen. 3., vollst. neu bearb. und erw. Aufl. Berlin: Springer. Online verfügbar unter https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/3-540-29793-6.pdf, zuletzt geprüft am 21.02.2025.

BGE (2021): BGE Bericht Grundlegende Anforderungen an Endlagerbehälter für hochradioaktive Abfälle, zuletzt geprüft am 08.11.2023.

Binder, K.; Gottschalk, J.; Kollenda, M.; Gärtner, F.; Klassen, T. (2011): Influence of Impact Angle and Gas Temperature on Mechanical Properties of Titanium Cold Spray Deposits. In: J Therm Spray Tech 20 (1-2), S. 234–242. DOI: 10.1007/s11666-010-9557-1.

Binnewies, Michael; Finze, Maik; Jäckel, Manfred; Schmidt, Peer; Willner, Helge; Rayner-Canham, Geoffrey (2016): Allgemeine und anorganische Chemie. 3., vollständig überarbeitete Auflage. Berlin: Springer Spektrum (Lehrbuch).

Blaga, A. (1973): Properties and behaviour of plastics. In: Canadian Building Digest CBD-157. DOI: 10.4224/40000676.

BMU (2020): Bericht der Bundesregierung für die siebte Überprüfungskonferenz im Mai 2021 zur Erfüllung des Gemeinsamen Übereinkommens über die Sicherheit der Behandlung abgebrannter Brennelemente und über die Sicherheit der Behandlung radioaktiver Abfälle. Hg. v. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit. BMU. Bonn. Online verfügbar unter https://www.bmuv.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Nukleare_Sicherheit/jc_7_bericht_deutschland_bf.pdf, zuletzt geprüft am 09.11.2023.

BMU (2021): Report of the Federal Government of Germany for the Seventh Review Meeting in May 2021. Hg. v. BMU. IAEA. Bonn. Online verfügbar unter https://www.iaea.org/sites/default/files/germany-7rm.pdf, zuletzt geprüft am 13.11.2023.

Bollingfehr, Wilhelm; Filbert, Wolfgang; Lerch, Christian; Tholen, Marion (2011): Endlagerkonzepte. Bericht zum Arbeitspaket 5 ; vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben. Hg. v. Gesellschaft für Anlagen und Reaktorsicherheit (GRS) mbH. Köln, Garching bei München (GRS, GRS-272). Online verfügbar unter https://www.grs.de/sites/default/files/publications/GRS-272_neu.pdf, zuletzt geprüft am 07.11.2023.

Bollingfehr, Wilhelm; Prignitz, Sabine; Wunderlich, Ansgar; Herold, Christian; Orellana Pérez, Teresa; Völzke, Holger; Wolff, Dietmar (2020): Abschlussbereicht zum FuE-Verbudvorhaben KoBrA. Anforderungen und Konzepte für Behälter zur Endlagerung von Wärme entwickelnden radioaktiven Abfällen und ausgedienten Brennelementen in Steinsalz, Tonstein und Kristallingestein. Berlin, Peine (BGE TEC 2020-19 BAM3.4/3205-1). Online verfügbar unter https://www.bge-technology.de/fileadmin/user_upload/FuE_Berichte/KoBrA/2020-FuE-Vorhaben_KoBrA_Abschlussbericht.pdf, zuletzt geprüft am 09.11.2023.

Bonka, Hans; Narrog, Jürgen (2012): Asse. Hg. v. F. Böckler, B. Dill, G. Eisenbrand, F. Faupel, B. Fugmann, T. Gamse, et al.: Thieme Gruppe. Online verfügbar unter https://roempp.thieme.de/lexicon/RD-01-03519.

Borchers, C.; Gärtner, F.; Stoltenhoff, T.; Assadi, H.; Kreye, H. (2003): Microstructural and macroscopic properties of cold sprayed copper coatings. In: Journal of Applied Physics 93 (12), S. 10064–10070. DOI: 10.1063/1.1573740.

Briggs, Scott (Hg.) (2023): Technical Program for Long-Term Management of Canadas Used Nuclear Fuel 2023-05. Hg. v. nwmo. Toronto (Canada) (NWMO-TR-2023-01). Online verfügbar unter https://www.nwmo.ca/-/media/Reports-MASTER/Technical-reports/NWMO-TR-2023-01-Technical-Program-for-Long-Term-Management-of-Canadas-Used-Nuclear-Fuel-2023-05.ashx?sc_lang=en, zuletzt geprüft am 30.11.2023.

Brockmann, W. (1988): Durabilité de l'adhésion entre métaux et polymères. In: Matériaux & Techniques 76, S. 33–36. DOI: 10.1051/mattech/198876120033s.

Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (2007): Endlagerung radioaktiver Abfälle in Deutschland. Untersuchung und Bewertung von Regionen mit potenziell geeigneten Wirtsgesteinsformationen. Hg. v. BGR. Online verfügbar unter https://www.pebs-

eu.de/DE/Themen/Endlagerung/Downloads/Charakterisierung_Wirtsgesteine_geotech_Barrieren/4_Wirtsgesteinsuebergreifend/2007-04-00_BGR_wirtsgest_dtl.pdf?__blob=publicationFile&v=4, zuletzt geprüft am 08.11.2023.

Callister, William D. (2001): Fundamentals of materials science and engineering. An interactive e.text. 5. ed. New York: Wiley. Online verfügbar unter http://www.loc.gov/catdir/description/wiley035/00050455.html.

Campbell, Flake C. (Hg.) (2013): Metals fabrication. Understanding the basics. Ohio: ASM International.

Campbell, J._ (1993): Invisible macrodefects in castings. In: J. Phys. IV France 03 (C7), C7-861-C7-872. DOI: 10.1051/jp4:19937135.

Campbell, John (2011): Complete Casting Handbook. Metal Casting Processes, Techniques and Design. 3rd ed. Oxford: Elsevier Science & Technology. Online verfügbar unter https://ebookcentral.proquest.com/lib/kxp/detail.action?docID=861226.

Carcreff, A.; Eckert, B.; Moutarde, M.; Monnot, B.; Hamoniaux, D.; Moniez-Perrin, C. et al. (Hg.) (2020): French requirements for the design, manufacture and use of bolts and screws equipping packages for the transport and storage of radioactive material. 19th International Symposium on the. New Orleans LA; USA, August 4-9 2019. Online verfügbar unter https://hal.science/hal-02635650/document, zuletzt geprüft am 07.12.2024.

Carpen L.; Rajala P.; Bomberg M. (2018): Corrosion of Copper in Anoxic Ground Water in the Presence of SRB. In: Corrosion Science and Technology 17 (4), S. 147–153. DOI: 10.14773/CST.2018.17.4.147.

Cerrato, R.; Casal, A.; Mateo, M. P.; Nicolas, G. (2017): Dealloying evidence on corroded brass by laser-induced breakdown spectroscopy mapping and depth profiling measurements. In: Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy 130, S. 1–6. DOI: 10.1016/j.sab.2016.11.006.

Chandrasekhar, A.; Sridhara, S.; Suresh, K. (2022): Integrating material selection with design optimization via neural networks. In: Engineering with Computers 38, S. 4715–4730. Online verfügbar unter https://doi.org/10.1007/s00366-022-01736-0, zuletzt geprüft am 22.01.2024.

Choi, H. J.; Lee, J. Y.; Cho, D. K. (2022): Re-evaluation of the bentonite buffer dimension in a geological repository for spent nuclear fuel under the KURT conditions. In: Progress in Nuclear Energy 145, S. 104138. DOI: 10.1016/j.pnucene.2022.104138.

Corrosion Data Survey. Metals Section (1985). 6. ed. Houston, Tex.: Nat. Ass. of Corrosion Engineers.

d'Oliveira, A.S.C.M; Vilar, R.; Feder, C.G (2002): High temperature behaviour of plasma transferred arc and laser Co-based alloy coatings. In: Applied Surface Science 201 (1-4), S. 154–160. DOI: 10.1016/S0169-4332(02)00621-9.

Davis, Joseph R. (Hg.) (2000): Nickel, cobalt, and their alloys. ASM International. 1. printing. Materials Park, Ohio: ASM International (ASM specialty handbook).

Davis, Joseph R. (Hg.) (2001): Copper and copper alloys. ASM International. Materials Park, Ohio: ASM International (ASM specialty handbook).

Davis, Joseph R. (Hg.) (2004): Handbook of thermal spray technology. ASM International. Materials Park, OH: ASM International. Online verfügbar unter https://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&scope=site&db=nlebk&db=nlabk&AN=395867.

Design Council: Framework for Innovation. Double Diamond. Online verfügbar unter https://www.designcouncil.org.uk/our-resources/framework-for-innovation/, zuletzt geprüft am 14.01.25.

Deuis, R. L.; Yellup, J. M.; Subramanian, C. (1998): Metal-matrix composite coatings by PTA surfacing. In: Composites Science and Technology 58 (2), S. 299–309. DOI: 10.1016/S0266-3538(97)00131-0.

Dilthey, U. (2006): Auftragschweißen. In: Schweißtechnische Fertigungsverfahren 1. Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag (VDI-Buch), S. 203–221.

Diomidis, N.; King, F. (2022): Technical Report 20-01. Development of Copper Coated Canisters for the Disposal of SF and HLW in Switzerland. Online verfügbar unter https://nagra.ch/wp-content/uploads/2022/08/NTB-20-01.pdf, zuletzt geprüft am 21.02.2025.

Drossel, G. Friedrich, S.; Huppatz, W.; Kammer, C.; Lehnert, O.; Liesenberg, O.; Mader, W. et al. (Hg.) (2018): Aluminium Taschenbuch 2. Umformung, Gießen, Oberflächenbehandlung, Recycling. Deutsches Institut für Normung. 17. Auflage. Berlin, Wien, Zürich: Beuth Verlag GmbH (Beuth Praxis). Online verfügbar unter https://ebookcentral.proquest.com/lib/kxp/detail.action?docID=5399577.

Drozdov, A. V. (2014): Investigation on the Microcracking of Ceramic Materials Using the Acoustic Emission Method. In: Strength Mater 46 (1), S. 71–79. DOI: 10.1007/s11223-014-9517-y.

Edwards, K-L; Deng, Y.-M. (2007): Supporting design decision making when applying materials in combination. In: Materials & Design 28 (4), S. 1288–1297. Online verfügbar unter https://doi.org/10.1016/j.matdes.2005.12.009, zuletzt geprüft am 19.01.2024.

Environmental Protection Agency (1999): EPA Method 160.1. EPA. Washington D.C. USA, zuletzt geprüft am 19.02.2025.

ESK (2013): Empfehlung der Entsorgungskommission; ESK-Leitlinien für die Zwischenlagerung von radioaktiven Abfällen mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung (Revidierte Fassung vom 10. Juni 2013). Hg. v. Bundesministerium für Umwelt, naturschutz und Reaktorsicherheit. Bonn. Online verfügbar unter https://www.verwaltungsvorschriften-im-internet.de/bsvwvbund_22112013_ESK34LLAbf1730017.htm, zuletzt aktualisiert am 01.11.2023, zuletzt geprüft am 02.11.2023.

ESK (2017): ESK-Empfehlung: Anforderungen an Endlagergebinde zur Endlagerung Wärme entwickelnder radioaktiver Abfälle. Online verfügbar unter https://www.entsorgungskommission.de/sites/default/files/reports/epanlage1esk53hpred20170120.pdf, zuletzt geprüft am 08.11.2023.

ESK (2021): ESK Diskussionspapier zur Kontroverse um die Verwendung von kupferbeschichteten Behältern für die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle. Bundesamt für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung (ESK88_16042021). Online verfügbar unter https://www.entsorgungskommission.de/sites/default/files/reports/ESK_Diskussionspapier_Kupferbehaelter_ESK88_16042021.pdf, zuletzt geprüft am 08.11.2023.

ESK (2022): Zum 100 Grad Celsius Kriterium in § 27(4) des Standortauswahlgesetzes. Stellungnahme der Entsorgungskomission. Online verfügbar unter https://www.entsorgungskommission.de/sites/default/files/reports/ESK_Stellungnahme_100GradKriteriumStandortauswahlgesetz_ESK98-12052022.pdf, zuletzt geprüft am 13.11.2023.

Fahrenwaldt, Hans J. (2013): Praxiswissen Schweißtechnik. Werkstoffe, Prozesse, Fertigung. 5., vollständig überarbeitete Auflage. Wiesbaden: Springer Vieweg.

Feldmann, Klaus; Schöppner, Volker; Spur, Günter (Hg.) (2013): Handbuch Fügen, Handhaben und Montieren. München: Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG.

Féron, Damien; Macdonald, Digby D. (2006): Prediction of Long Term Corrosion Behaviour in Nuclear Waste Systems. In: MRS Proc. 932, S. 351. DOI: 10.1557/PROC-932-35.1.

DIN 8580, 2022: Fertigungsverfahren- Begriffe, Einteilung.

DIN 8593-6, September 2003: Fertigungsverfahren Fügen.

Foth, Hans-Jochen (2008): Wärmeleitfähigkeit. Hg. v. F. Böckler, B. Dill, G. Eisenbrand, F. Faupel, B. Fugmann, T. Gamse, et al.: Thieme Gruppe. Online verfügbar unter https://roempp.thieme.de/lexicon/RD-23-00084.

Fraenkel, J. (1998): Pitting Corrosion of Metals: A Review of the Critical Factors. In: J. Electrochemical Soc. 145 (2186), zuletzt geprüft am 20.02.2025.

Frens, Joep; Funk, Mathias; van Hout, Bastiaan; Le Blanc, Joep (2018): Designing the IoT Sandbox. In: Ilpo Koskinen, Youn-kyung Lim, Teresa Cerratto-Pargman, Kenny Chow und William Odom (Hg.): DIS '18, June 9-13, 2018, Hong Kong. Unter Mitarbeit von Ilpo Koskinen und Youn-kyung Lim. DIS '18: Designing Interactive Systems Conference 2018. Hong Kong China, 09 06 2018 13 06 2018. Association for Computing Machinery. New York, NY, USA: ACM, S. 341–354. Online verfügbar unter https://dl.acm.org/doi/pdf/10.1145/3196709.3196815, zuletzt geprüft am 15.01.2025.

Friedrich, Horst E.; Müller, Gerd (Hg.) (2024): Werkstoffe und Bauweisen in der Fahrzeugtechnik. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg (ATZ/MTZ-Fachbuch). Online verfügbar unter https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:bsz:31-epflicht-3155138.

Gatto, A.; Bassoli, E.; Fornari, M. (2004): Plasma Transferred Arc deposition of powdered high performances alloys: process parameters optimisation as a function of alloy and geometrical configuration. In: Surface and Coatings Technology 187 (2-3), S. 265–271. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2004.02.013.

AtG, vom 15.07.1985 (BGBl. I S. 1565) (23.12.1959): Gesetz über die friedliche Verwendung der Kernenergie und den Schutz gegen ihre Gefahren (Atomgesetz). Online verfügbar unter https://www.gesetze-im-internet.de/atg/AtG.pdf, zuletzt geprüft am 01.11.2023.

StandAG, vom 05.05.2017 (22.03.2023): Gesetz zur Suche und Auswahl eines Standortes für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle (Standortauswahlgesetz - StandAG). Online verfügbar unter https://www.gesetze-im-internet.de/standag_2017/StandAG.pdf, zuletzt geprüft am 02.11.2023.

Ghosh, S. K. (1988): Machinery's handbook. In: Journal of Mechanical Working Technology 16 (1), S. 102–103. DOI: 10.1016/0378-3804(88)90151-9.

Gitlin, B. C. (2008): EPA's Final Health and Safety Standard for Yucca Mountain. Congressional Research Service. Online verfügbar unter https://curie.pnnl.gov/system/files/EPAs_Final_Health_and_Safety_Standard_for_YM_CRS.pdf, zuletzt geprüft am 20.02.2025.

ISO 695, Februar 1994: Glas - Beständigkeit gegen eine siedende wäßrige Mischlauge Prüfverfahren und Klasseneinteilung.

GNS (2023a): Castor V/52. Online verfügbar unter https://www.gns.de/media/socmgkor/castor_v52_produktinfo_2023_10_de_v01.pdf, zuletzt geprüft am 26.02.2025.

GNS (2023b): MOSAIK Produktinfo. Online verfügbar unter https://www.gns.de/media/f5kmjjdm/mosaik_produktinfo_2023_10_de_v01.pdf, zuletzt geprüft am 25.02.2025.

Groover, Mikell P. (2002): Fundamentals of modern manufacturing. Materials, processes, and systems. 2. ed. New York, NY, Weinheim: Wiley. Online verfügbar unter http://www.loc.gov/catdir/bios/wiley042/2002278462.html.

Grote, Karl-Heinrich; Bender, Beate; Göhlich, Dietmar (2018): Dubbel - Taschenbuch für den Maschinenbau. 25., neu bearbeitete und aktualisierte Auflage. Berlin, Germany: Springer Vieweg.

Gubner, R.; Andersson, U. (2007): Corrosion resistance of copper canister weld material. SKB. Stockholm (TR-07-07). Online verfügbar unter https://skb.com/publication/1469580/TR-07-07.pdf, zuletzt geprüft am 25.02.2025.

Gurumoorthy, K.; Kamaraj, M.; Rao, K. Prasad; Rao, A. Sambasiva; Venugopal, S. (2007): Microstructural aspects of plasma transferred arc surfaced Ni-based hardfacing alloy. In: Materials Science and Engineering: A 456 (1-2), S. 11–19. DOI: 10.1016/j.msea.2006.12.121.

Haefer, René A. (1987): Auftragschweißen und Plattieren. In: Bernhard Ilschner und René A. Haefer (Hg.): Oberflächen- und Dünnschicht-Technologie, Bd. 5. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg (WFT Werkstoff-Forschung und -Technik), S. 242–254.

Hagström, J. (2023): Microstructure, crystallography and CSL grain boundaries in copper canisters for nuclear waste disposal (TR-23-12). Online verfügbar unter https://skb.com/publication/2513131/TR-23-12.pdf, zuletzt geprüft am 25.02.2025.

Hassel, Thomas; Mintzlaff, Volker; Stahlmann, Joachim; Röhlig, Klaus-Jürgen; Eckhardt, Anne (2021): Sicherheitsrelevante Barrieren bei der Endlagerung: Ungewissheiten aus der Perspektive der Ingenieurwissenschaften. Unter Mitarbeit von MyCoRe Community. Online verfügbar unter https://www.transens.de/fileadmin/Transens/images/Ver%C3%B6ffentlichungen_SC/TRANSENS-Bericht-04_zurPublikation_SVS.pdf#page=12, zuletzt geprüft am 18.02.2025.

Henckell, Philipp (2024): Charakterisierung der Wärmeführung beim wire arc additive manufacturing (WAAM) unter Einsatz des Metall-Schutzgasschweißprozesses. Universitätsverlag Ilmenau. Online verfügbar unter https://www.db-thueringen.de/servlets/MCRFileNodeServlet/dbt_derivate_00064360/ilm1-2023000497.pdf, zuletzt geprüft am 12.09.2024.

Höland, Wolfram (2012): Glass-Ceramics, zuletzt geprüft am 24.02.2025.

Hölting, Bernward; Coldewey, Wilhelm Georg (2013): Hydrogeologie. Einführung in die allgemeine und angewandte Hydrogeologie. 8. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer Spektrum.

Holze, Rudolf; Behler, Ansgar (2013): kathodischer Korrosionsschutz. Hg. v. F. Böckler, B. Dill, G. Eisenbrand, F. Faupel, B. Fugmann, T. Gamse, et al.: Thieme Gruppe. Online verfügbar unter https://roempp.thieme.de/lexicon/RD-11-00642.

Hornbogen, Erhard; Eggeler, Gunther; Werner, Ewald (2019a): Werkstoffe. Aufbau und Eigenschaften von Keramik-, Metall-, Polymer- und Verbundwerkstoffen. 12., aktualisierte Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg (Lehrbuch).

Hornbogen, Erhard; Warlimont, Hans; Skrotzki, Birgit (2019b): Metalle. Struktur und Eigenschaften der Metalle und Legierungen. 7., aktualisierte und überarbeitete Auflage. Berlin: Springer Vieweg (SpringerLink Bücher).

Hsieh, C. C.; Chen, J.-H.; Huang, F.-T.; Wu, W. (2013): Sliding wear performance of Fe-, Ni- and Co-based hardfacing alloys for PTA cladding. In: International Journal of Materials Research (3), S. 293–300. Online verfügbar unter doi/10.3139/146.110859.

Hua, F.; Mon, K.; Pasupathi, P.; Gordon, G. (2004): A Review Corrosion of TI Grade 7 and Other TI Alloys in Nuclear Waste Repository Environments. Online verfügbar unter https://doi.org/10.2172/837505, zuletzt geprüft am 09.10.2014.

Hülsenberg, Dagmar (2013): Glaskorrosion. Hg. v. F. Böckler, B. Dill, G. Eisenbrand, F. Faupel, B. Fugmann, T. Gamse, et al. Stuttgart: Thieme Gruppe. Online verfügbar unter https://roempp.thieme.de/lexicon/RD-07-02996.

HWN Titan: Titan Datenblätter.

IAEA (2020): Design Principles and Approaches for Radioactive Waste Repositories. In: IAEA Nuclear Energy Series (No. NW-T-1.27), zuletzt geprüft am 16.11.2023.

Ikäläinen, T.; Saario T; Que, Z. (2023): Creep of Cu-OFP in presence of sulphides. SKB (TR-23-19). Online verfügbar unter https://skb.com/publication/2512620/TR-23-19.pdf, zuletzt geprüft am 25.02.2025.

Jahan, A.; Edwards, K. L. (2013): Multi-criteria decision analysis for supporting the selection of engineering materials in product design. Amsterdam, Heidelberg: Elsevier.

Jiang, Y. F.; Li, H. Y.; Chen, J.; Shi, X. Q.; Zhu, Y. X. (2023): Study on Composition Design of Enamel Coating and Its Resistance to Active Metal Vapor Corrosion. In: C. Liu (Hg.): Study on Composition Design of Enamel Coating and Its Resistance to Active Metal Vapor Corrosion, Bd. 283. Singapore: Springer Nature Singapore (Proceedings of the 23rd Pacific Basin Nuclear Conference, Volume 1).

Johansson, F.; Zetterström, P.; Spahiu, K. (2024): Criticality effects of long-term changes in material compositions and geometry in disposal canisters with insert Rebus Concept 1 P355N and P460N. Online verfügbar unter https://skb.com/publication/2513224/TR-23-26.pdf, zuletzt geprüft am 21.02.2025.

Johansson A. J. Svensson, D.; Gordon A.; Pahverk, H.; Karlsson, O.; Brask, J.; Lundholm, M. et al. (2020): Corrosion of copper after 20 years exposure in the bentonite field tests LOT S2 and A3 (TR-20-14). Online verfügbar unter https://www.skb.com/publication/2496000/TR-20-14_low_23MB.pdf, zuletzt geprüft am 25.02.2025.

Kainer, Karl U. (Hg.) (2004): Metallische Verbundwerkstoffe. Weinheim: Wiley-VCH. Online verfügbar unter http://onlinelibrary.wiley.com/book/10.1002/3527602062.

Kalasouskaya, Y. (2017): Aufbau von Lasten- und Pflichtenheften in der industiellen Praxis. Juristisches IT-Projektmanagement. Institut für Informatik Ludwig-Maximilians-Universität München. München.

Kalb, P. D.; Heiser, J. H.; Colombo, P. (1991): Polyethylene Encapsulation of Nitrate Salt Wastes: Waste Form Stability, Proces Scale and Economics. Radiological Sciences Division Department od Nuclear Energy Brookhaven National Laboratory, associalted Universities. Upton, NY (US). Online verfügbar unter https://www.osti.gov/servlets/purl/5430977-xNiR6m/, zuletzt geprüft am 27.08.2024.

Kalb, P. D.; Lageraaen, P. R. (1994): Polyethylene Encapsulation Full Scale Technology Demonstration. Polymer Solidification National Effort CH321202. Environmental & Waste Technology Center Department of Advanced Technology Brookhaven National Laboratory. Springfield, VA (US) (BNL52478). Online verfügbar unter https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/27/029/27029633.pdf?r=1, zuletzt geprüft am 27.08.2024.

Kalpakjian, Serope (2022): Manufacturing Processes for Engineering Materials in SI Units. 6th Edition. Harlow: Pearson. Online verfügbar unter https://elibrary.pearson.de/book/99.150005/9781292254418.

Kammer, C. (1995): Aluminium Taschenbuch. Band 1 Grundlagen und Werkstoffe. 15. Auflage: Aluminium Zentrale Düsseldorf.

Kammer, Catrin (2014): Aluminium Taschenbuch. Band 3. Weiterverarbeitung und Anwendung. 17., vollständig überarb. Aufl. Berlin, Wien, Zürich: Beuth (Aluminium Taschenbuch, 3).

Karana, Elvin; Hekkert, Paul; Kandachar, Prabhu (2008): Material considerations in product design: A survey on crucial material aspects used by product designers. In: Materials & Design 29 (6), S. 1081–1089. DOI: 10.1016/j.matdes.2007.06.002.

Karthikeyan, J. (2007): The advantages and disadvantages of the cold spray coating process. In: The Cold Spray Materials Deposition Process: Elsevier, S. 62–71.

Kashani, H.; Amadeh, A.; Ghasemi, H. M. (2007): Room and high temperature wear behaviors of nickel and cobalt base weld overlay coatings on hot forging dies. In: Wear 262 (7-8), S. 800–806. DOI: 10.1016/j.wear.2006.08.028.

Kashani, H.; Amadeh, A.; Vatanara, M. R. (2008): Improvement of wear resistance of hot working tool steel by hardfacing Part 2 – Case study. In: Materials Science and Technology 24 (3), S. 356–360. DOI: 10.1179/174328407X166731.

Katz, R. Nathan (2018): Environmental Degradation of Advanced Ceramics and Glasses. In: Myer Kutz (Hg.): Handbook of environmental degradation of materials. Third edition. Kidlington, Oxford, Cambridge, MA: William Andrew an imprint of Elsevier, S. 207–223, zuletzt geprüft am 19.11.2024.

Kelley, D.; Brunkow, W.; Pokhitonov, Y.; Starchenko, V. (Hg.) (2003): Application_of_High_Technology_Polymers. WM'03 Conference. Tucson, AZ. Pacific World Trade, Inc., Indianapolis, IN, USA; The Chamberlain Group, Lynchburg, VA, USA; V.G. Khlopin Radium Institute, St. Petersburg, Russia (US). Online verfügbar unter https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/100664005/192-libre.pdf?1680595104=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DApplication_of_High_Technology_Polymers.pdf&Expires=1724744654&Signature=OIDaQ2WoDjuqxDmCObfoS91A05C1RmAPM7DZYqGNF1Kr-Zqntmb1Zcw~a3wR97hnY6XW2t7ygohc3aCENC52ztebZN41BKU883eXl28nDjeIedTeOZhhnYojaE7l5LXJ1Y1eQLdfQxLZWU9euQXe12CMuQvdx9B2p~eIoD3jRMoAXdKUIlXrH1XjxUlDkExk3Gge-Lc7LMQISySjRTYTGFWerYxlx9mCejqGrftQZTOrtuy95wQ~hxAxj2emJtOHlqN6NpJguFu5cpsxyNAHGX7LyEApdSjeuHEEYcPVG31rxJLCHTKheZN2j~UW4unYzuEhEDzVrfovJEcLf~YNRg__&Key-Pair-Id=APKAJLOHF5GGSLRBV4ZA, zuletzt geprüft am 27.08.2024.

Kennametal Stellite GmbH: Cobalt Alloys; Powder, Wire, Rod, Electrodes. Online verfügbar unter http://www.stellite.com/, zuletzt geprüft am 24.02.2024.

Kerry Thomas, J. (2007): Fundamental aspects of the radiolysis of solid polymers, crosslinking and degradation. In: Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms 265 (1), S. 1–7. DOI: 10.1016/j.nimb.2007.08.021.

Kinet, Damien; Chah, Karima; Gusarov, Andrei; Faustov, Alexey; Areias, Lou; Troullinos, Ioannis et al. (2016): Proof of Concept for Temperature and Strain Measurements with Fiber Bragg Gratings Embedded in Supercontainers Designed for Nuclear Waste Storage. In: IEEE Transactions on Nuclear Science 3 (63), S. 1955–1962. Online verfügbar unter https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=7497644, zuletzt geprüft am 13.11.2023.

King, Fraser (2012): Waste Containers. In: Comprehensive Nuclear Materials 5, S. 421–450. Online verfügbar unter https://doi.org/10.1016/B978-0-08-056033-5.00131-2, zuletzt geprüft am 07.12.23.

King, Fraser (2020): 6.14 - Canister Materials for the Disposal of Nuclear Waste. In: Comprehensive Nuclear Materials (Second Edition) 6. Online verfügbar unter https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803581-8.11764-3, zuletzt geprüft am 07.12.2023.

Kingery, W. David; Bowen, Harvey K.; Uhlmann, Donald R. (1976): Introduction to ceramics. 2. ed. New York: Wiley (Wiley series on the science and technology of materials).

Koets, K.; Erkan, D.; Meiksane, A.; Mantzanas, A.; Bregman, J. (2022): Safe Spent Research Reactor Fuel Disposal. TU Delft. Delft. Online verfügbar unter https://www.covra.nl/nl/downloads/onderzoeksprogramma/, zuletzt geprüft am 29.11.23.

Köhler, A.; Hassel, T.; Saliah Kurt, Ö. (2019): Das ENCON-Behaelterkonzept - Generische Behältermodelle zur Einlagerung radioaktiver Restrstoffe für den interdisziplinären Optionenvergleich. Hg. v. Institut für Werkstoffkunde Leibniz Universität Hannover. Hannover (ENTRIA Arbeitsbericht 16). Online verfügbar unter https://www.irs.uni-hannover.de/fileadmin/irs/entria/Dokumente/Arbeitsberichte/ENTRIA-Arbeitsbericht-16_Hassel_Das_ENCON-Behaelterkonzept.pdf, zuletzt geprüft am 09.11.2023.

Konarski, Piotr; Cozzo, Cédric; Khvostov, Grigori; Ferroukhi, Hakim (2021): Spent nuclear fuel in dry storage conditions - current trends in fuel performance modeling. In: Journal of Nuclear Materials 555, S. 153138. Online verfügbar unter https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2021.153138, zuletzt geprüft am 29.01.2024.

DIN EN ISO 8044: Korrosion von Metallen und Legierungen - Grundbegriffe (ISO 8044:2020).

Krautkrämer, Josef; Krautkrämer, Herbert (1990): Ultrasonic testing of materials. Unter Mitarbeit von W. Grabendörfer. 4th fully revised edition, translation of the 5th revised German edition. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag. Online verfügbar unter https://ebookcentral.proquest.com/lib/kxp/detail.action?docID=3099756.

Krohn, J.; Spieth-Achtnich, A.; Schütte, S.; Mbah, M.; Lampke, A.; Hünecke, K. (2024): Unterstützung des BASE bei der Prozessanalyse des Standortauswahlverfahrens (PaSta). Hg. v. BASE. Berlin. Online verfügbar unter https://www.base.bund.de/SharedDocs/Downloads/BASE/DE/fachinfo/fa/pasta_abschlussbericht.pdf?__blob=publicationFile&v=3, zuletzt geprüft am 14.08.2024.

Krüger, J. (2003): Von der Bronzezeit zum Informationszeitalter - Stationen der Entwicklung. In: Metall 57 (4), S. 215–221. Online verfügbar unter https://kupfer.de/wp-content/uploads/2019/10/Von-der-Bronzezeit-zum-Informationszeitalter.pdf, zuletzt geprüft am 22.08.2024.

Leal, Luiz C.; Guber, K. H.; Arbanas, G.; Wiarda, D.; Koehler, P. E.; Kahler, A. (Hg.) (2011): Resonance Evaluation of 48Ti Including Covariance for Criticality Safety Applications. 9. International Conference on Nuclear Criticality Safety. Edinburgh, 19-22 September 2011. Online verfügbar unter http://info.ornl.gov/sites/publications/files/Pub31209.pdf, zuletzt geprüft am 09.10.2024.

Lee, K. L.; Cho, D. K.; Yoon, S.; Lee, C. S. (Hg.) (2024): Design and Evaluation of a Korean-Style High Efficiency Disposal System for Domestic Waste. IAEA-CN-16. Wien. Korea Atomic Energy Research Institute. Online verfügbar unter https://media.superevent.com/documents/20240611/47aa2332e2c3589a60d7f6754b78e8f4/id16_lee.pdf, zuletzt geprüft am 12.09.2024.

Lehtonen, Markku (2021): Das Wunder von Onkalo? Zur unerträglichen Leichtigkeit der finnischen Suche nach dem Endlager. In: Aus Politik und Zeitgeschichte 71 (21-23/2021), S. 32–37. Online verfügbar unter https://www.bpb.de/shop/zeitschriften/apuz/333370/endlagersuche/#content-index, zuletzt geprüft am 17.11.2023.

Lehtonen, Markku; Kojo, Matti; Jartti, Tuija; Litmanen, Tapio; Kari, Mika (2020): The roles of the state and social licence to operate? Lessons from nuclear waste management in Finland, France, and Sweden. In: Energy Research & Social Science 61, S. 101353. DOI: 10.1016/j.erss.2019.101353.

Li, Bowen; Hwang, Jiann-Yang; Drelich, Jaroslaw; Popko, Domenic; Bagley, Susan (2010): Physical, chemical and antimicrobial characterization of copper-bearing material. In: JOM 62 (12), S. 80–85. DOI: 10.1007/s11837-010-0187-3.

Liu, Y. F.; Mu, J. S.; Xu, X. Y.; Yang, S. Z. (2007): Microstructure and dry-sliding wear properties of TiC-reinforced composite coating prepared by plasma-transferred arc weld-surfacing process. In: Materials Science and Engineering: A 458 (1-2), S. 366–370. DOI: 10.1016/j.msea.2006.12.086.

Loyer, C.; Régnier, G.; Duval, V.; Richaud, E. (2021): Multiscale study of poly(butylene terephthalate) hydrolysis. In: Polymer Degradation and Stability 192, S. 109690. DOI: 10.1016/j.polymdegradstab.2021.109690.

Lukens, Wayne W.; Saslow, Sarah A. (2017): Aqueous Synthesis of Technetium-Doped Titanium Dioxide by Direct Oxidation of Titanium Powder, a Precursor for Ceramic Nuclear Waste Forms. In: Chem. Mater. 29 (24), S. 10369–10376. DOI: 10.1021/acs.chemmater.7b03567.

Macdonald, D. D.; Sharifi-Asl, S. (2011): Is Copper Immune to Corrosion When in Contact With Water and Aqueous Solutions? (2011:09). Online verfügbar unter https://www.osti.gov/etdeweb/servlets/purl/1013169, zuletzt geprüft am 12.09.2024.

Mallory, Glenn O. (Hg.) (1990): Electroless plating. Fundamentals and applications. American Electroplaters and Surface Finishers Society. Orlando, Fla.: American Electroplaters and Surface Finishers Soc.

Marcos, N.; Haverkamp, B.; Bertrams, Niklas; Nordman, H.; Hellä, P. Wanne, T. (2022): Generic Safety Assessment for the Norwegian National Facility. Hg. v. Mitta Engineering Oy. Vantaa (Finland). Online verfügbar unter https://www.norskdekommisjonering.no/wp-content/uploads/2022/12/COO11_report_final.pdf, zuletzt geprüft am 29.11.2023.

Mattson, Einar (1980): Aluminium oxide as an encapsulation material for unreprocessed nuclear fuel waste — evaluation from the viewpiont of corrosion (TR-80-15). Online verfügbar unter https://skb.com/publication/3043/TR80-15webb_OCR.pdf, zuletzt geprüft am 25.02.2025.

Mattsson, Einar (1981): Canister materials proposed for final disposal of high level nuclear waste — a review with respect to corrosion resistance (TR-81-05). Online verfügbar unter https://skb.com/publication/3059/TR81-05webb_OCR.pdf, zuletzt geprüft am 25.02.2025.

Mayyas, Abdelraoof; Shen, Qin; Mayyas, Ahmad; abdelhamid, Mahmoud; Shan, Dongri; Qattawi, Ala; Omar, Mohammed (2011): Using Quality Function Deployment and Analytical Hierarchy Process for material selection of Body-In-White. In: Materials & Design 32 (5), S. 2771–2782. DOI: 10.1016/j.matdes.2011.01.001.

McCauley, Ronald A. (2013): Corrosion of ceramic materials. 3. ed. Boca Raton, Fla.: CRC Press Taylor & Francis Group (Corrosion technology).

Mellor, B. G. (2006): Surface coatings for protection against wear. Boca Raton, Cambridge: CRC Press; Woodhead Publ (Woodhead Publishing in materials).

Mengel, Kurt; Röhlig, Klaus-Jürgen; Geckeis, Horst (2012): Endlagerung radioaktiver Abfälle. In: Chemie in unserer Zeit 46 (4), S. 208–217. DOI: 10.1002/ciuz.201200582.

Milodowski, A. E.; Styles, M. T.; Horstwood, M. S. A., Kemp, S. J. (2002): Alteration of uraniferous and native copper concretions in the Permian mudrocks of south Devon, United Kingdom. A Natural analogue study of the corrosion of Copper canisters and radiolysis effects in a repository for spent nuclear fuel. SKB (TR-02-09). Online verfügbar unter https://inis.iaea.org/records/qwjjj-q9e29.

More, Chaitali V.; Alsayed, Zainab; Badawi, Mohamed S.; Thabet, Abouzeid A.; Pawar, Pravina P. (2021): Polymeric composite materials for radiation shielding: a review. In: Environmental chemistry letters 19 (3), S. 2057–2090. DOI: 10.1007/s10311-021-01189-9.

Moynihan, Cornelius T.; Easteal, Allan J.; Wilder, James; Tucker, Joseph (1974): Dependence of the glass transition temperature on heating and cooling rate. In: J. Phys. Chem. 78 (26), S. 2673–2677. DOI: 10.1021/j100619a008.

Nachrichten des Kupferverband. Kupferreserven sind angewachsen: Verfügbarkeit langfristig gesichert. Neues Factsheet veröffentlicht (2024). In: Werkstoffe (3), S. 8–9, zuletzt geprüft am 22.08.2024.

Naserifard, N.; Lee, A.; Birch, A.; Chiu, A.; Zhang, X. (2021): Deep Geological Repository Conceptula Design Report Crystalline / Sedimentary Rock. Hg. v. nwmo (APM-REP-00440-0211-R000). Online verfügbar unter https://www.nwmo.ca/-/media/Reports-MASTER/Technical-reports/APM-REP-00440-0211-DGR-Conceptual-Design-Report-Crystalline-and-Sedimentary-Rock---2021-09.ashx?sc_lang=en, zuletzt geprüft am 30.11.2023.

Neretnieks, Ivars (2024): Saline groundwaters counteract up-flow of contaminants- implications for radionuclide repositories? In: Journal of contaminant hydrology 262, S. 104309. DOI: 10.1016/j.jconhyd.2024.104309.

Oelkers, Benjamin (2023): Zirkonium. Hg. v. F. Böckler, B. Dill, G. Eisenbrand, F. Faupel, B. Fugmann, T. Gamse, et al.: Thieme Gruppe. Online verfügbar unter https://roempp.thieme.de/lexicon/RD-26-00494.

Oerlicon Metco: Pulverwerkstoffe für Plasma-Auftragschweißen (PTA). Online verfügbar unter https://www.oerlikon.com/metco/de/produkte-services/beschichtungswerkstoffe/ laser- pta - und - auftragsschweissen / pulverwerkstoffe- fuer- plasma - auftragsschweissen-pta/, zuletzt geprüft am 24.02.2025.

Ojovan, Michael I.; Steinmetz, Hans J. (2022): Approaches to Disposal of Nuclear Waste. In: Energies 15 (20), Artikel 7804. DOI: 10.3390/en15207804.

Pascault, Jean-Pierre; Williams, Roberto J. J. (2013): Thermosetting Polymers. In: Enrique Saldívar-Guerra und Eduardo Vivaldo-Lima (Hg.): Handbook of polymer synthesis, characterization, and processing. Hoboken, New Jersey: Wiley, S. 519–533.

Patel, R.; Punshon, C.; Nicholas J.; Bastid P. Zhou, R.; Schneider, C.; Bagshaw, N. et al. (2012): Technical Report 12-06. Canister Design Concept for Disposal of Spent Fuel and High Level Waste. Wettingen, Schweiz. Online verfügbar unter https://www.osti.gov/etdeweb/servlets/purl/22145939, zuletzt geprüft am 17.06.2024.

Paul Wersin; Daniel Grolimund; Sirpa Kumpulainen; Leena Kiviranta; Jocelyne Brendlé; Margit Snellman (2010): Titanium alloys as alternative material for the supercontainer shell in the KBS-3H concept - A preliminary Ti-clay interaction study (R-10-51). Online verfügbar unter https://www.skb.com/publication/2255828/R-10-51.pdf, zuletzt geprüft am 25.02.2025.

Paunovic, Milan.; Schlesinger, Mordechay. (2011): Modern electroplating. 5th ed. (The ECS series of texts and monographs, 52). Online verfügbar unter https://permalink.obvsg.at/.

Pawłowski, Lech (2008): The science and engineering of thermal spray coatings. Second edition. Chichester, England, Hoboken, NJ: Wiley. Online verfügbar unter https://onlinelibrary.wiley.com/doi/book/10.1002/9780470754085.

Perez, Nestor (Hg.) (2004): Electrochemistry and Corrosion Science. Boston, MA: Kluwer Academic Publishers.

Poenitz, Erik; Walther, Clemens (2017): Calculation of Dose Rates at the Surface of Storage Containers for High-Level Radioactive Waste. In: Radiation protection dosimetry 177 (4), S. 361–372. DOI: 10.1093/rpd/ncx054.

Pohl, Michael; Forchhammer, Peter (2014): Korrosionsschäden an metallischen Werkstoffen ohne mechanische Belastung. In: Günter Lange und Michael Pohl (Hg.): Systematische Beurteilung technischer Schadensfälle: Wiley, S. 251–276.

Prado J, Valeria; Vidal A, Roberto; Durán T, Claudia (2012): Aplicación de la capacidad bactericida del cobre en la práctica médica. In: Revista medica de Chile 140 (10), S. 1325–1332. DOI: 10.4067/S0034-98872012001000014.

DIN 69901-5:2009-01: Projektmanagement.

DIN 12116, März 2001: Prüfung von Glas - Beständigkeit gegen eine siedende wässrige Salzsäurelösung - Prüfverfahren und Klasseneinteilung. Online verfügbar unter https://nautos-1de-1m0ed8nd938b0.shan01.han.tib.eu/M5J/search/item-detail/DE45756224, zuletzt geprüft am 12.11.2024.

Pusch, Roland (2001): The Buffer and Backfill Handbook. Part 2: Materials and techniques (TR-02-12). Online verfügbar unter https://skb.com/publication/19918/TR-02-12.pdf, zuletzt geprüft am 24.02.2025.

Pusch, Roland (2002): The Buffer and Backfill Handbook. Part 1: Definitions, basic relationships, and laboratory methods (TR-02-20). Online verfügbar unter https://skb.com/publication/20411/TR-02-20.pdf, zuletzt geprüft am 24.02.2025.

Ralston, K. D.; Birbilis, N. (2010): Effect of Grain Size on Corrosion: A Review. In: CORROSION 66 (7), 075005-075005-13. DOI: 10.5006/1.3462912.

Rechard, Rob P.; Voegele, Michael D. (2014): Evolution of repository and waste package designs for Yucca Mountain disposal system for spent nuclear fuel and high-level radioactive waste. In: Reliability Engineering & System Safety 122, S. 53–73. DOI: 10.1016/j.ress.2013.06.018.

Reddy, Bharti; Padovani, Cristiano; Rance, Andrew P.; Smart, Nick R.; Cook, Angus; Haynes, Haydn M. et al. (2021): The anaerobic corrosion of candidate disposal canister materials in compacted bentonite exposed to natural granitic porewater containing native microbial populations. In: Materials & Corrosion 72 (1-2), S. 361–382. DOI: 10.1002/maco.202011798.

Reuter, Martin (2021): Methodik der Werkstoffauswahl. Der systematische Weg zum richtigen Material. 3. Aufl. München: Hanser. Online verfügbar unter https://www.hanser-elibrary.com/doi/book/10.3139/9783446468542, zuletzt geprüft am 18.01.2024.

Revie, R. Winston; Uhlig, Herbert Henry (2011): Uhlig's corrosion handbook. 3rd ed. (Electrochemical Society series). Online verfügbar unter https://permalink.obvsg.at/.

Riedel, Ralf (2000): Handbook of ceramic hard materials. Weinheim: Wiley-VCH.

Roberge, Pierre R. (2008): Corrosion engineering. Principles and practice. New York: McGraw-Hill, zuletzt geprüft am 13.02.2025.

Rodriguez Diaz, Manuel; Hassel, Thomas; Hölscher, Lennart Vincent; Szafarska, Maik; Gustus, René; Möhwald, Kai; Maier, Hans Jürgen (2023): Thermal spraying in oxygen-free environment: Meltoff and atomisation behaviour of twin-wire arc spraying processes in silane-doped inert gases. In: Thermal Spray Bulletin 1 (1), S. 24–30. DOI: 10.53192/TSB20230124.

Roemer, Jakub; Pieczonka, Łukasz; Uhl, Tadeusz (2018): Laser Spot Thermography of Ceramic Materials. In: Anna Timofiejczuk, Bogusław Edward Łazarz, Fakher Chaari und Rafał Burdzik (Hg.): Advances in technical diagnostics. Proceedings of the 6th International Congress on Technical Diagnostic, ICDT2016, 12-16 September 2016, Gliwice, Poland, Bd. 10. Cham: Springer (Applied Condition Monitoring, volume 10), S. 159–167.

Römpp-eLexikon.

RÖMPP-Redaktion (2002a): Kohlenstoff-Stähle. Hg. v. F. Böckler, B. Dill, G. Eisenbrand, F. Faupel, B. Fugmann, T. Gamse, et al.: Thieme Gruppe. Online verfügbar unter https://roempp.thieme.de/lexicon/RD-11-01506.

RÖMPP-Redaktion (2002b): Kupfer-Legierungen. Hg. v. F. Böckler, B. Dill, G. Eisenbrand, F. Faupel, B. Fugmann, T. Gamse, et al.: Thieme Gruppe. Online verfügbar unter https://roempp.thieme.de/lexicon/RD-11-02448.

RÖMPP-Redaktion (2002c): Phosphatieren. Hg. v. F. Böckler, B. Dill, G. Eisenbrand, F. Faupel, B. Fugmann, T. Gamse, et al.: Thieme Gruppe. Online verfügbar unter https://roempp.thieme.de/lexicon/RD-16-01882.

RÖMPP-Redaktion (2002d): Plasmabrenner. Hg. v. F. Böckler, B. Dill, G. Eisenbrand, F. Faupel, B. Fugmann, T. Gamse, et al.: Thieme Gruppe. Online verfügbar unter https://roempp.thieme.de/lexicon/RD-16-02661.

Ronneteg, U. (Hg.) (2018): Friction stir Welding of copper and its NDT- From Novelty to highly developed! 12th ECNDT. SKB. Online verfügbar unter https://www.ndt.net/article/ecndt2018/papers/ecndt-0156-2018.pdf, zuletzt geprüft am 26.02.2025.

Rundman, K. B.; Iacoviello, F. (2016): Cast Irons. In: Saleem Hashmi (Hg.): Reference module in materials science and materials engineering. Amsterdam: Elsevier. Online verfügbar unter https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/48024007/203-libre.pdf?1471101959=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DCast_Irons.pdf&Expires=1740581740&Signature=PZWPL5aM6qoGgy~OuYwf3wtoRh9ufF2GuMgl~nfqQ1d0z~ZzEHP-d5mY5LyKe4FZOHFx5xdNZnoX7Cb~2jYcjmUfEQZQ0m2FYID5BJ2gBX1Tw4clhFS-87IsNBHKOaoH1RxJv~ibgqMnkLday2nOuxPM1EHWLX62DhYSOiACcDxcA1~yhIYjG-QvOcr06wuomW9~zIcBdPjvkAdZslrcC1MJzzBbEEvwhoKabQDWsZiVR37zhEPn0fzcirKUuuZY2cN6rOnF1Ee~~Nt~sDl88Zx4PChph3mP~Uj5VeYfPzl3ct9~5V8BGV6Djd5~Mi0avWg4ymrVG6Ua2DBU6dETBw__&Key-Pair-Id=APKAJLOHF5GGSLRBV4ZA, zuletzt geprüft am 26.02.2025.

Ryabova, A. V.; Yatsenko, E. A.; Klimova, L. V.; Fanda, A. Yu. (2021): Development of a weld enamel technology for the installation of steel pipelines with an internal silicate-enamel coating. In: Materials Today: Proceedings 38, S. 1491–1494. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.08.135.

Sacklén, Nina (2017): Results of Monitoring at Olkiluoto in 2014 - Foreign Materials. Hg. v. Posiva Oy. Eurajoki, Finnland.

Sanders, W.T.M.; Zeeman, G.; Lettinga, G. (2002): Hydrolysis kinetics of dissolved polymer substrates. In: Water Science and Technology 45 (10), S. 99–104. DOI: 10.2166/wst.2002.0301.

Sathasivam, Kamalasekaran; Wang, Mei-Ya; Anbalagan, Aswin kumar; Lee, Chih-Hao; Yeh, Tsung-Kuang (2023): Novel photocatalytic coating for corrosion mitigation in 304LSS of dry storage canisters. In: Front. Mater. 10, Artikel 1129886. DOI: 10.3389/fmats.2023.1129886.

Scheller, Piotr R. (2009): hochlegierter Stahl. Hg. v. F. Böckler, B. Dill, G. Eisenbrand, F. Faupel, B. Fugmann, T. Gamse, et al.: Thieme Gruppe. Online verfügbar unter https://roempp.thieme.de/lexicon/RD-08-01486.

Schiebold, Karlheinz (2015): Zerstörungsfreie Werkstoffprüfung - Durchstrahlungsprüfung. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.

Schmidt, F.A.R. (1969): Analytical radiation shielding calculations for concrete — formulas and parameters. In: Nuclear Engineering and Design 10 (3), S. 308–324. DOI: 10.1016/0029-5493(69)90067-3.

Scholze, Horst (1988): Glas. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.

Schuler, Volkmar; Twrdek, Jürgen (2024): Praxiswissen Schweißtechnik. Werkstoffe, Prozesse, Fertigung. 7., überarbeitete und aktualisierte Auflage. Wiesbaden: Springer Vieweg.

DIN 1910-100:2008-02, 02.2008: Schweißen und verwandte Prozesse - Begriffe - Teil 100: Metallschweißprozesse mit Ergnzungen zu DIN 14610-2005, zuletzt geprüft am 13.02.2025.

DIN EN 14610:2004, Februar 2005: Schweißen und verwandte Prozesse - Begriffe für Metallschweißprozesse; Dreisprachige Fassung.

Schweitzer, P. A. (2009): Fundamentals of Corrosion. Mechanisms, Causes and Preventative Methods: CRC Press.

Seidel, Wolfgang W.; Hahn, Frank (2018): Korrosion und Korrosionsschutz. In: Wolfgang W. Seidel und Frank Hahn (Hg.): Werkstofftechnik. München: Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, S. 278–297.

Seiphoori, A. (2015): Thermo-Hydro-Mechanical Characterisation and Modelling of Wyoming granular bentonite (TR- 15-05). Online verfügbar unter https://www.researchgate.net/profile/Ali-Seiphoori/publication/319734187_Thermo-hydro-mechanical_characterisation_and_modelling_of_Wyoming_granular_bentonite/links/59bb3b2b458515e9cfc36dd6/Thermo-hydro-mechanical-characterisation-and-modelling-of-Wyoming-granular-bentonite.pdf, zuletzt geprüft am 24.02.2025.

Senior, N.; Martino, T. (2022): Technical Report 22-07. Nuclear Waste Consortium Research Programme on Corrosion and Gas Generation Phase 1 Final Report. Online verfügbar unter https://nagra.ch/wp-content/uploads/2022/12/NTB-22-07.pdf, zuletzt geprüft am 21.02.2025.

Shelby, James E. (2005): Introduction to glass science and technology. 2. ed. Cambridge: Royal Society of Chemistry. Online verfügbar unter https://watermark.silverchair.com/bk9780854046393-...., zuletzt geprüft am 25.02.2025.

Shin, Jong-Choul; Doh, Jung-Man; Yoon, Jin-Kook; Lee, Dok-Yol; Kim, Jae-Soo (2003): Effect of molybdenum on the microstructure and wear resistance of cobalt-base Stellite hardfacing alloys. In: Surface and Coatings Technology 166 (2-3), S. 117–126. DOI: 10.1016/S0257-8972(02)00853-8.

Silenius, K. (2024): Chemistry and Sorption capacity of two alternative bentonites for use in the Finnish spent nuclear fuel repository. Masters Thesis. Online verfügbar unter https://helda.helsinki.fi/server/api/core/bitstreams/4531df64-cd7d-4e3e-a37c-c62007840109/content, zuletzt geprüft am 24.02.2025.

Simo, Eric; Herold, Philipp; Jobmann, Michael; Müller-Hoeppe, Nina; Gruner, Matthias (2024): The role of bentonite in the repository concepts for radioactive waste in Germany: a review. In: Geoenergy 2 (1), Artikel geoenergy2023-019. DOI: 10.1144/geoenergy2023-019.

Simpson, J. P. (1989): Technical Report 89-19. Experiments on Container Materials for Swiss High-Level Waste Disposal Projects Part IV. NAGRA. Online verfügbar unter https://nagra.ch/wp-content/uploads/2022/08/e_ntb89-019.pdf, zuletzt geprüft am 21.02.2025.

Singh, V. P.; Stober, Ingrid; Bucher, Kurt (2000): Hydrogeology of Crystalline Rocks. Dordrecht: Springer (Springer eBook Collection, 34).

Sitaram, S. P.; Stoffer, J. O.; O'Keefe T. J. (1997): Application of conducting polymers in corrosion protection. In: Journal of Coatings Technology 69 (866), S. 65–69. Online verfügbar unter https://doi.org/10.1007/BF02696146, zuletzt geprüft am 23.08.2024.

Sitzmann, Helmut (2004): Aluminium-Legierungen. Hg. v. F. Böckler, B. Dill, G. Eisenbrand, F. Faupel, B. Fugmann, T. Gamse, et al.: Thieme Gruppe. Online verfügbar unter https://roempp.thieme.de/lexicon/RD-01-01811.

Skidmore, T. Eric; Fondeur, F. (Hg.) (2013): Protective Coatings in Nuclear Materials/Waste Processing Environments*. Unter Mitarbeit von United States Department of Energy. United States: Savannah River Site (S.C.). Online verfügbar unter https://digital.library.unt.edu/ark:/67531/metadc841631/m2/1/high_res_d/1096418.pdf, zuletzt geprüft am 27.08.2024.

Skrotzki, Werner; Scheller, Piotr R. (2021): Festigkeit. Hg. v. F. Böckler, B. Dill, G. Eisenbrand, F. Faupel, B. Fugmann, T. Gamse, et al.: Thieme Gruppe. Online verfügbar unter https://roempp.thieme.de/lexicon/RD-06-00592.

Sōmiya, Shigeyuki (Hg.) (2003): Handbook of advanced ceramics. Amsterdam, San Diego, Calif: Academic Press. Online verfügbar unter https://www.sciencedirect.com/science/book/9780126546408.

Srivastava, A.; Singh, V.; Aggarwal, P.; Schneeweiss, F.; Scherer, U. W.; Friedrich, W. (2010): Optical Studies of insulation polymers for radiation dose monitoring. In: Indian Journal of Pure & Applied Physics 84, S. 782–786. Online verfügbar unter https://nopr.niscpr.res.in/bitstream/123456789/10478/1/IJPAP%2048%2811%29%20782-786.pdf, zuletzt geprüft am 26.08.2024.

SSM (30.01.2009a): The Swedish Radiation Safety Authority's Regulatory Code 2008:21. Online verfügbar unter https://www.stralsakerhetsmyndigheten.se/contentassets/ae39aa24d23443ac90330384a91b9775/ssmfs-200837-the-swedish-radiation-safety-authoritys-regulations-concerning-the-protection-of-human-health-and-the-environment-in-connection-with-the-final-management-of-spent-nuclear-fuel-and-nuclear-waste, zuletzt geprüft am 10.11.2023.

SSM (30.01.2009b): The Swedish Radiation Safety Authority's Regulations and General Advice Concerning the Protection of Human Health and the Environment in Connection with the Final Management of Spent Nuclear Fuel and Nuclear Waste. SSMFS 2008:37. Online verfügbar unter https://www.stralsakerhetsmyndigheten.se/contentassets/ae39aa24d23443ac90330384a91b9775/ssmfs-200837-the-swedish-radiation-safety-authoritys-regulations-concerning-the-protection-of-human-health-and-the-environment-in-connection-with-the-final-management-of-spent-nuclear-fuel-and-nuclear-waste, zuletzt geprüft am 10.11.2013.

Stefanescu, Doru Michael (2002): Science and Engineering of Casting Solidification. Boston, MA, s.l.: Springer US.

Sternadelova, K. (2023): Quality assessment of the vitreous enamel coating applied to the weld joint. In: MM Science Journal, S. 6333–6338.

STUK (2018): Disposal of Nuclear Waste. Guide YVL D.5, vom 13.02.2018. Online verfügbar unter https://www.stuklex.fi/en/ohje/YVLD-5.

Subramania, A.; Kalyanasundaram, N. T.; Sathiyapriya, R.; Muralidharan, V. S.; Vasudevan, T. (2004): Polymeric corrosion inhibitors - an overview. In: Bulletin of Electrochemistry 20 (2), S. 49–58. Online verfügbar unter https://core.ac.uk/download/34217579.pdf, zuletzt geprüft am 23.08.2024.

Sudha, C.; Shankar, P.; Rao, R. SubbaV.; Thirumurugesan, R.; Vijayalakshmi, M.; Raj, Baldev (2008): Microchemical and microstructural studies in a PTA weld overlay of Ni–Cr–Si–B alloy on AISI 304L stainless steel. In: Surface and Coatings Technology 202 (10), S. 2103–2112. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2007.08.063.

Sudheer Kumar, Ritwick; Podlech, Carolin; Grathoff, Georg; Warr, Laurence N.; Svensson, Daniel (2021): Thermally Induced Bentonite Alterations in the SKB ABM5 Hot Bentonite Experiment. In: Minerals 11 (9), S. 1017. DOI: 10.3390/min11091017.

Svensk Kärnbränslehantering AB: Long-term safety for the final repository for spent nuclear fuel at Forsmark - Main report of the SR-Site project - Volume III. Online verfügbar unter https://www.skb.com/publication/2345580/TR-11-01_vol3.pdf, zuletzt geprüft am 23.11.2023.

Svensk Kärnbränslehantering AB (2007): RD&D Programme 2007 – Programme for research, development and demonstration of methods for the management and disposal of nuclear waste. Stockholm (TR-07-12). Online verfügbar unter https://skb.com/publication/1578457/TR-07-12.pdf, zuletzt geprüft am 12.09.2024.

Svensk Kärnbränslehantering AB (2022): Post-closure safety for the final repository for spent nuclear fuel at Forsmark – Fuel and canister process report, PSAR version (TR-21-02). Online verfügbar unter https://skb.com/publication/2506399/TR-21-02.pdf, zuletzt geprüft am 25.02.2025.

Thomas, W. M.; Norris, I.M; Staines, D. G.; Watts, E. R. (Hg.) (2005): Friction Stir Welding -Process Developments and Variant Techniques. The SME Summit. Oconomowoc, Milwaukee, USA. Online verfügbar unter https://www.researchgate.net/profile/Wayne-Thomas-9/publication/228600743_Friction_Stir_Welding-Process_Developments_and_Variant_Techniques/links/53d228330cf2a7fbb2e97555/Friction-Stir-Welding-Process-Developments-and-Variant-Techniques.pdf, zuletzt geprüft am 26.02.2025.

Thompson, Rob (2014): Manufacturing processes for design professionals. Reprinted 2014; [Orig.-Ausgabe 2007]. London: Thames and Hudson.

Thompson, S. M.; Bian, L.; Shamsai, N.; Yadollahi, A. (2015): An Overview of Direct Laser Deposition for Additive manufacturing. Transport phenomena, modeling and diagnostics. In: Additive Manufacturing (8), S. 36–62, zuletzt geprüft am 26.02.2025.

Total Materia (2012): 5.3507 Physikalische Eigenschaften. Online verfügbar unter https://portal.totalmateria.com/de/search/quick/materials/1486098/physical, zuletzt aktualisiert am 27.09.2024, zuletzt geprüft am 30.09.2024.

Tracton, Arthur A. (Hg.) (2006): Coatings technology handbook. 3. ed. Boca Raton: CRC Taylor & Francis.

U.S. Geological Survey (2024): Mineral commodity summaries 2024 (Mineral Commodity Summaries). Online verfügbar unter https://pubs.usgs.gov/publication/mcs2024.

UNECE (2022): Carbon Neutrality in the UNECE Region: Integrated Life-cycle Assessment of Electricity Sources. Genf. Online verfügbar unter https://unece.org/sites/default/files/2022-04/LCA_3_FINAL%20March%202022.pdf, zuletzt geprüft am 22.08.2024.

van Konynenburg, R. A.; Halsey, W. G.; McCright, R. D.; Clarke, W. L., JR.; Gdowski, G. E. (1993): Selection of candidate container materials for the conceptual waste package design for a potential high level nuclear waste repository at Yucca Mountain. Online verfügbar unter https://doi.org/10.2172/138910, zuletzt geprüft am 09.10.2024.

Varshneya, Arun K.; Mauro, John C. (2019): Fundamentals of Inorganic Glasses. Third edition. Amsterdam, Oxford, Cambridge, MA: Elsevier. Online verfügbar unter https://www.sciencedirect.com/science/book/9780128162255.

Verhoef, E.; Neeft, Erika; Bartol, Jeroen; Vuorio, Marja; Scholten, Chiel; Buitenhuis, Alexander et al. (2020): Long Term Research Programme for Geological Disposal of Radioactive Waste. Hg. v. COVRA. Nieuwdorp (Niederlande). Online verfügbar unter https://www.covra.nl/nl/downloads/onderzoeksprogramma/.

EndlSiAnfV, vom 06.10.2020 (06.10.2020): Verordnung über Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle (Endlagersicherheitsverordnung - EndlSiAnfV). Online verfügbar unter https://www.gesetze-im-internet.de/endlsianfv/EndlSiAnfV.pdf, zuletzt geprüft am 01.11.2023.

StrlSchV (29.11.2018): Verordnung zum Schutz vor der schädigenden Wirkung ionisierender Strahlung (Strahlenschutzverordnung - StrlSchV). Online verfügbar unter https://www.gesetze-im-internet.de/strlschv_2018/StrlSchV.pdf, zuletzt geprüft am 01.11.2023.

Vijayaram, T. R. (2018): Advanced Casting Technologies. Erscheinungsort nicht ermittelbar: IntechOpen. Online verfügbar unter https://mts.intechopen.com/storage/books/6132/authors_book/authors_book.pdf, zuletzt geprüft am 26.02.2025.

Vu, H. L. (2022): The Effect of oxide ilm on the corrosion of nuclear waste disposal copper canisters. Masters. Aalto University. Online verfügbar unter https://aaltodoc.aalto.fi/server/api/core/bitstreams/29d046c7-774f-4510-8e58-4553734258f9/content, zuletzt geprüft am 19.02.2025.

Wall Colmony: Superior Performing Nickel and Cobalt Surfacing Alloys. Online verfügbar unter https://www.wallcolmonoy.com/products-capabilities/surfacing-alloys/, zuletzt geprüft am 24.02.2025.

Werme, Lars (1998): Design premises for canister for spent nuclear fuel. SKB. Online verfügbar unter https://skb.com/publication/15520/TR-98-08_OCR.pdf, zuletzt geprüft am 18.02.2025.

Wimmer, H.; Skrzyppek; Köbl, M. (2015): CASTOR and CONSTOR A well established system for the dry storage of spent fuel and high level waste. In: VGB PowerTech - International Journal for Electricity and Heat Generation (5). Online verfügbar unter https://www.gns.de/media/uafo4c5o/sonderdruck-vgb-2015.pdf, zuletzt geprüft am 27.08.2024.

Woo, Dahyeon; Lee, Youho (2022): Spent fuel simulation during dry storage via enhancement of FRAPCON-4.0: Comparison between PWR and SMR and discharge burnup effect. In: Nuclear Engineering and Technology 54 (12), S. 4499–4513. DOI: 10.1016/j.net.2022.08.003.

Wu, W.; Wu, L.-T. (1996): The wear behavior between hardfacing materials. In: Metallurgical and Materials Transactions A 27, S. 3639–3648. Online verfügbar unter DOI: Doi10.1007/ Bf02595455, zuletzt geprüft am 24.02.2025.

Zallen, R. (1983): The Formation of Amorphous Solids. In: Richard Zallen (Hg.): The Physics of Amorphous Solids: Wiley, S. 1–32.

Zhang, Limin; Sun, Dongbai; Yu, Hongying (2008): Effect of niobium on the microstructure and wear resistance of iron-based alloy coating produced by plasma cladding. In: Materials Science and Engineering: A 490 (1-2), S. 57–61. DOI: 10.1016/j.msea.2008.02.041.

Zhang, Qichao; Jiang, Yishan; Zhao, Xin; Song, Penglei; Kuang, Tingting; Chen, Juna et al. (2022): Hydrogen Permeation Behavior of Carbon Steel During Corrosion in Highly Pressed Saturated Bentonite. In: Front. Mater. 9, Artikel 848123. DOI: 10.3389/fmats.2022.848123.

Zoch, Hans-Werner; Spur, Günter (Hg.) (2015): Handbuch Wärmebehandeln und Beschichten. 2., vollständig neu bearbeitete Auflage. München: Hanser (Edition Handbuch der Fertigungstechnik, 4). Online verfügbar unter http://files.hanser.de/Files/Article/ARTK_LPR_9783446427792_0001.pdf, zuletzt geprüft am 12.09.2024.

7 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 Double Diamond (Design Council) 6
Abbildung 2 Prozess ElaBeMa 6
Abbildung 4 Generic Design (IAEA 2020, S. 24) 10
Abbildung 5 Regelwerkspyramide (BMU 2020) 14
Abbildung 6 Überblick über die Zeitpläne der europäischen Endlagerprojekte (Verhoef et al. 2020) 17
Abbildung 7 Klassifizierung der Abfälle und notwendige Tiefe der Lager (IAEA 2020) 20
Abbildung 8 Querschnitt Bentonitversatz Schweizer Konzept (Seiphoori 2015) 23
Abbildung 9 (King 2012) Ablauf der thermischen Phase Bentonit 23
Abbildung 10 Einteilung der Stähle nach DIN EN 10020 (Schuler und Twrdek 2024) 33
Abbildung 13 In Drift Waste Package for PA-93 (Rechard und Voegele 2014) 35
Abbildung 11 Einteilung der Gusseisenwerkstoffe 35
Abbildung 12 Schweißtechniken Eisengusswerkstoffe (Schuler und Twrdek 2024) 36
Abbildung 14: Industrielle Einsatzgebiete von Stellite (Kennametal Stellite GmbH) 51
Abbildung 15 Zusammenhänge zwischen Werkstoff Fertigung und Konstruktion 59
Abbildung 16 WAAM-Gefertigte Prototypen für den Koreanischen Endlagerbehälter (Lee et al. 2024) 62
Abbildung 17 Einteilung der Schmelzschweißverfahren DIN 1910-100:2008-02 64
Abbildung 18 Kanadisches Konzept zum automatisierten Schweißen und Inspektion (Naserifard et al. 2021) 64
Abbildung 20: Darstellung der Aufmischung A mittels PTA-Schweißens 67
Abbildung 19: Emaillierte Rührbehälter und Reaktoren (Quelle: THALETEC GmbH; https://thaletec.com/produkte/emaillierte-ruehrbehaelter-und-reaktoren) 75

8 Anhang

Tabelle 26 Wärmeleitfähigkeit nach (Davis 2001)

Material	Wärmeleitfähigkeit in W/m · K
reines Silber	428
reines Kupfer	398
C101100 (sauerstofffrei electronisch, OFE)	391
C1000(electrolytic though pitch, ETP)	391
C10400(oxygen-free with Ag)	388
C12200 (Cu-0.02P)	339
C18100 (Cu-0.04Mg-0.15Zr-0.8Cr)	324
reines Gold	317,9
reines Aluminium	247
Al 1100 (O)	222
C17410 (Beryllium copper, 0.3 % Be)	208
reines Wolfram	160
reines Magnesium	155
reines Zink	113
reiner Nickel	82,9
Reines Eisen	80,4
Reines Kobalt	69,04
Reines Zinn	62,8
1020 Kohlenstoff Stahl	51,9
reines Blei	33,6
C71500 (Cu25Zn-10Ni)	29
410 Korrosionsbeständiger Stahl	28,7
reiner Kohlenstoff	23,9
reines Zirkonium	21,1
316 Korrosionsbeständiger Stahl	16,2
reines Titan	11,4