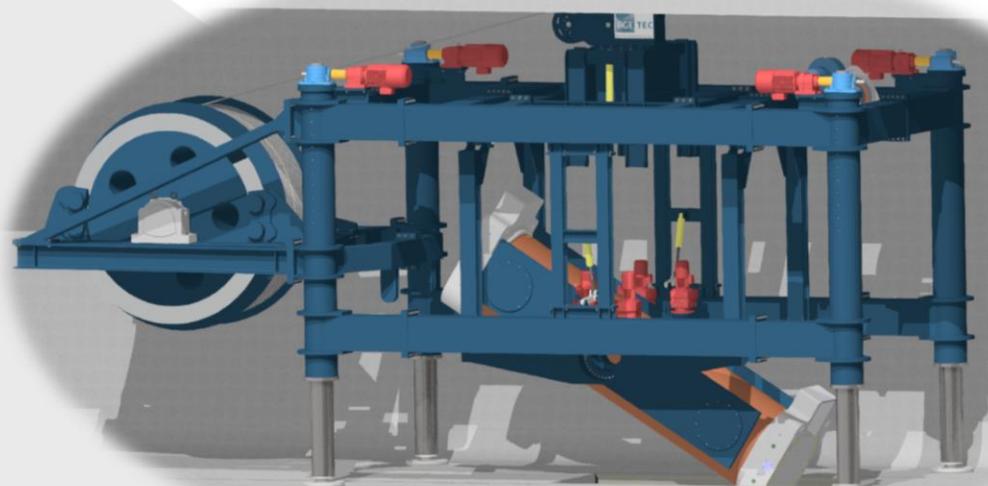


TREND

Weiterentwicklung der Konzepte der
Transport- und Einlagerungstechnik von
Endlagerbehältern

BGE TEC 2021-01





BGE TECHNOLOGY GmbH

TREND

Weiterentwicklung der Konzepte der
Transport- und Einlagerungstechnik von
Endlagerbehältern

BGE TEC 2021-01

Autor(en)

Niklas Bertrams

Philipp Herold

Juliane Leonhard

Ulla Marggraf

David Seidel

Ansgar Wunderlich

Datum 10.08.2021

Auftraggeber BMWi/KIT (PTKA-WTE)

Förderkennzeichen 02 E 11749

Die diesem Bericht zugrundeliegenden Arbeiten wurden im Auftrag des BMWi vertreten durch den Projekträger Karlsruhe, Karlsruher Institut für Technologie (KIT) von der BGE TECHNOLOGY GmbH durchgeführt. Die Verantwortung für den Inhalt liegt jedoch allein bei den Autoren.

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

BETREUT VOM



PTKA
Projekträger Karlsruhe
Karlsruher Institut für Technologie

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	i
Tabellenverzeichnis	vi
Abkürzungsverzeichnis	vii
1 Einleitung	1
2 Randbedingungen zur Entwicklung von Transport- und Einlagerungstechnik	3
2.1 Endlagerkonzepte	3
2.2 Art und Menge der Wärme entwickelnden radioaktiven Abfälle und ausgedienten Brennelemente	4
2.3 Konzepte für Abfallbehälter	6
2.4 Stand der Transport- und Einlagerungstechnik	13
2.5 Bestehende Rückholungskonzepte	24
3 Technik der Streckenlagerung	31
3.1 Anforderungen	31
3.2 Bedarf zur Weiterentwicklung	39
3.3 Weiterentwicklung & Konstruktion	43
4 Technik der vertikalen Bohrlochlagerung	59
4.1 Anforderungen	59
4.2 Bedarf zur Weiterentwicklung	64
4.3 Änderungskonstruktion mit Bohrlochkeller	76
4.4 Alternativbetrachtung 1 ohne Bohrlochkeller	95
4.5 Alternativbetrachtung 2 ohne Bohrlochkeller	97
5 Technik der horizontalen Bohrlochlagerung	101
5.1 Anforderungen	101
5.2 Bedarf zur Weiterentwicklung	105
5.3 Auslegung und Konstruktion	113
6 Technik der direkten Endlagerung von Transport- und Lagerbehältern (TLB)	129
6.1 Anforderungen	129
6.2 Bedarf zur Weiterentwicklung	132
6.3 Änderungskonstruktion	142
7 Risikobeurteilung	159
8 Zugfahrzeug	163
9 Zusammenfassung und Ausblick	165

10	Weiterer FuE-Bedarf	169
11	Literaturverzeichnis	171
12	Weitere Quellen	173
12.1	Normenverzeichnis	173
12.2	Produktkataloge	173
13	Anhang 1: Tabellarische Übersicht der Risikobeurteilungen	175
13.1	Betriebssicherheit beim Konzept der Streckenlagerung	176
13.2	Betriebssicherheit beim Konzept der vertikalen Bohrlochlagerung	183
13.3	Betriebssicherheit beim Konzept der horizontalen Bohrlochlagerung	190
13.4	Betriebssicherheit beim Konzept der Direkten Endlagerung von TLB	196
14	Anhang 2: Auslegung für Varianten des POLLUX®-Behälters	206

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Technische Zeichnung des POLLUX®-10 (Bollingerfehr et al., 2011)	8
Abbildung 2:	Technische Zeichnung der CASTOR® THTR/AVR mit zwei Stahlkannen für AVR-BE und mit einer Stahlkanne für THTR-BE (links) und CASTOR® KNK mit Phenix-Büchsen (rechts) (Bollingerfehr et al., 2011)	9
Abbildung 3:	Skizze einer Brennstabkokille (Bollingerfehr et al., 2011)	10
Abbildung 4:	Skizze der rückholbaren Brennstabkokille BSK-R (Bollingerfehr et al., 2012)	11
Abbildung 5:	Photo des Transferbehälters (Bollingerfehr et al., 2011)	12
Abbildung 6:	Darstellungen von CASTOR® V/19 (links) und CASTOR® HAW 28M (rechts) (GNS, 2021)	13
Abbildung 7:	Photo der Einlagerungsvorrichtung in Strecken im Versuchsstand (Engelmann et al., 1995)	14
Abbildung 8:	Schemazeichnung Plateauwagen mit POLLUX®-Behälter (Engelmann et al., 1995)	14
Abbildung 9:	Batteriebetriebene Lokomotive mit Energieteil (links) und Plateauwagen mit Transferbehälter (rechts) (Filbert et al., 2010)	15
Abbildung 10:	Modell der Bohrlochschleuse (Filbert et al., 2010)	16
Abbildung 11:	Photo der Einlagerungsvorrichtung für Brennstabkokillen und Triple-Packs im Versuchsstand (Filbert et al., 2010)	16
Abbildung 12:	Skizze der Anlagen am Füllort zur Umladung von TLB (Filbert et al., 2014)	19
Abbildung 13:	Skizze der Abläufe am horizontalen Kurzbohrloch/Einlagerungsort (Filbert et al., 2014)	20
Abbildung 14:	3D Modell der STEV am Einlagerungsort, beladen mit TLB (Filbert et al., 2014)	20
Abbildung 15:	Detaildarstellung der Bohrlochöffnung mit den Zentrieraufnahmen (Filbert et al., 2014)	22
Abbildung 16:	3D Modell der Schubvorrichtung der STEV (Filbert et al., 2014)	23
Abbildung 17:	Typische Entwicklungsstufen eines Endlagers und Zuordnung der Rückholung und Bergung, nach (NEA, 2011)	24
Abbildung 18:	links: Querschnitte der beiden neu aufgefahrenen Teilstrecken; rechts: Endgültiges Profil der Rückholungsstrecke und Querschnitt der ursprünglichen Einlagerungsstrecke (Herold et al., 2018)	26
Abbildung 19:	3D Modell der modifizierten Einlagerungsvorrichtung in Strecken (mELViS) (Herold et al., 2018)	27
Abbildung 20:	Schema der Freilegung von Abfallgebinden in der Einlagerungsstrecke (Herold et al., 2018)	28

Abbildung 21:	Skizze des POLLUX®-10	33
Abbildung 22:	Skizze des POLLUX®-8	34
Abbildung 23:	Skizze des POLLUX®-6	34
Abbildung 24:	Skizze des POLLUX®-4,5	34
Abbildung 25:	Skizze des POLLUX®-3	34
Abbildung 26:	Skizzen des POLLUX®- 3 CSD-V (oben: Konzept A mit CSD-V in einer Reihe; unten: das bevorzugte Konzept B mit CSD-V nebeneinander)	35
Abbildung 27:	Liebherr Straddle Carrier (Liebherr, 2020)	40
Abbildung 28:	Rückholungsvorrichtung mELViS aus dem Projekt ERNESTA (Herold et al., 2018)	40
Abbildung 29:	Flowchart zur Einstufung von Hebezeugen nach KTA 3902; in grün: Einstufung der Einlagerungstechnik für Streckenlagerung	43
Abbildung 30:	Modell des Portals für die Endlagerung in Strecken mit Abfallgebinde	44
Abbildung 31:	Portal für die Endlagerung in Strecken mit Abfallgebinde in Frontansicht (links) und in Seitenansicht (rechts)	44
Abbildung 32:	Grundrahmen des Portals für die Endlagerung in Strecken	45
Abbildung 33:	Hubwerk mit redundanten Gewindespindeln	46
Abbildung 34:	Modell des Radfahrwerks	48
Abbildung 35:	Bandage MH20 STB 840/500 – 559 (Continental (b), 2020)	49
Abbildung 36:	Ansicht des Portals von oben; gut sichtbar das Tragwerk mit Verschiebezylindern und Tragbalken mit Bolzenbefestigung	52
Abbildung 37:	Plateauwagen zum gleisgebundenen Transport des POLLUX®-10	54
Abbildung 38:	Betriebsablauf im Einlagerungszyklus der Streckenlagerung bei Verwendung des Portals zur Einlagerung in Strecken	55
Abbildung 39:	Manuell erstelltes Bentonitaflager im FE-Experiment der NAGRA (Köhler et al., 2015)	56
Abbildung 40:	Sockelkonzept für POLLUX®-Behälter in der Streckenlagerung	57
Abbildung 41:	Autarke Saugglocke von POSIVA zum Anheben von Bentonitblöcken mit Hilfe eines Hallenkrans (Saari et al., 2010)	57
Abbildung 42:	Skizze des Nahfeld des Einlagerungsbohrlochs im Kristallingestein nach Einbau des Widerlagers	66
Abbildung 43:	Skizze des Nahfelds des Einlagerungsbohrlochs im Tongestein nach Ertüchtigung des Ausbaus als Widerlager	67
Abbildung 44:	Links: Dauerstandfestigkeit unmittelbar vor Belastung durch Bohrlochschleuse und beladenen Transferbehälter; Rechts: Dauerstandfestigkeit unmittelbar nach Belastung durch Bohrlochschleuse und beladenen Transferbehälter (Filbert et al., 2010)	68

Abbildung 45:	Flowchart zur Einstufung von Hebezeugen nach KTA 3902; in rot: Einstufung der Einlagerungstechnik für vertikale Bohrlochlagerung	70
Abbildung 46:	Traverse, Ausführung mit 2 Seilen und Wippe zum Seillastausgleich	74
Abbildung 47:	Einlagerungsvorrichtung nach KTA-Regelwerk	77
Abbildung 48:	Vergleichsspannungen im Stahlbau	78
Abbildung 49:	Vergleichsspannung beim Ausfall der hinteren linken Stütze	78
Abbildung 50:	Seiltrommel mit Planetengetriebe und Winkelgetriebe	80
Abbildung 51:	Abschirmhaube modifiziert für 2 Laststränge	81
Abbildung 52:	Ansicht auf Kabeltrommel für Energieversorgung	82
Abbildung 53:	Mechanische Belastung der Greiferarme ohne Optimierung	83
Abbildung 54:	Mechanische Belastung der Greiferarme mit Optimierung	83
Abbildung 55:	Belastungen der Greifergrundplatte	84
Abbildung 56:	Belastungen des Tragbalkens	84
Abbildung 57:	Modell des Greifers	85
Abbildung 58:	Schwenkbalken und Vergleichsspannungen	86
Abbildung 59:	Tragzapfen am Stahlbau (links) und Schwenkbalken (rechts)	87
Abbildung 60:	Verschiebung bei Transport (links) und Vergleichsspannungen bei Transport (rechts) am Schwenkbalken	87
Abbildung 61:	Verschiebung bei Transport (links) und Vergleichsspannungen bei Transport (rechts) am Stahlbau	88
Abbildung 62:	Modell des Plateauwagens	88
Abbildung 63:	Spannungen an der Tragwanne an der Unterseite (links) und Oberseite (rechts)	90
Abbildung 64:	Spannungen am Radschemelkasten und Wippenkasten	90
Abbildung 65:	Frontalansicht bei Transport	91
Abbildung 66:	Seitenansicht bei Transport	91
Abbildung 67:	Technische Skizze des Transferbehälters (Filbert et al., 2010)	92
Abbildung 68:	Modell der Bohrlochschleuse	92
Abbildung 69:	Konzept für eine bauraumoptimierte ELV Schleuse	93
Abbildung 70:	Minimalmaßmaße des Bohrlochkellers	94
Abbildung 71:	Gleisaufbau unter Tage (links) und Stahlkonstruktion zur Überfahrung des Bohrlochkellers (rechts)	94
Abbildung 72:	Vergleich der beiden Stützenkonstruktionen mit der einstufigen Stütze rechts und der zweistufigen Teleskopstütze links	96

Abbildung 73:	Modell der Einlagerungsvorrichtung am Einlagerungsort nach Anpassung für die Einlagerung ohne Bohrlochkeller	97
Abbildung 74:	Ansichten des Modells des Einlagerungswagens der Alternativbetrachtung 2	98
Abbildung 75:	Modell des Einlagerungswagens nach Schwenken und Absetzen des Transferbehälters	99
Abbildung 76:	Flowchart zur Einstufung von Hebezeugen nach KTA 3902; in grün: Einstufung der Transport- und Einlagerungstechnik für horizontale Bohrlöcher	108
Abbildung 77:	Handskizze des Oberbaus des schienengebundenen Transportfahrzeugs	114
Abbildung 78:	Modell des Behältertragrahmens (links: von oben; rechts: von unten)	117
Abbildung 79:	Vergleichsspannungen im Behältertragrahmen	118
Abbildung 80:	Verschiebungen im Behältertragrahmen	118
Abbildung 81:	Ansicht der Einrichtung zum axialen Vorschub	119
Abbildung 82:	Stützrollen mit Pendelaufhängung	120
Abbildung 83:	Vergleichsspannungen des Grundrahmens	121
Abbildung 84:	Darstellung der Verschiebung des Grundrahmens	121
Abbildung 85:	Transportsicherung des Behältertragrahmens	122
Abbildung 86:	Außenansicht der Druckluftübergabe (links) und Schnittansicht durch die Druckluftübergabe (rechts)	124
Abbildung 87:	Darstellung der Lagerung der Transferbehälterschleuse	125
Abbildung 88:	Schleusensystem im angedockten Zustand	126
Abbildung 89:	Gleitkufe	127
Abbildung 90:	BSK mit Gleitkufen	127
Abbildung 91:	Gesamtbaugruppe inklusive des Schleusensystems und des durchschlägigen Bohrloches	128
Abbildung 92:	Flowchart zur Einstufung von Hebezeugen nach KTA 3902; in grün: Einstufung der Transport- und Einlagerungstechnik für TLB	136
Abbildung 93:	Prinzipskizze der Gleitreibung und angestellten Führung	136
Abbildung 94:	Grafische Darstellung der Gesamtnutzwerte der Prinziplösungen	141
Abbildung 95:	Oberseite (links) und Unterseite (rechts) des Schlittens mit den angebauten Panzerrollen	143
Abbildung 96:	Statisches System des Oberwagens	144
Abbildung 97:	Lastfall Biegung Oberwagen	144
Abbildung 98:	Querschnitt der Oberwagenträger	145

Abbildung 99: Panzerrollen mit Umlenkrollen auf Fahrbahn	147
Abbildung 100: Oberwagen der STEV	147
Abbildung 101: 8-rädriges Fahrwerk der STEV	149
Abbildung 102: Ausgleichswippe mit Radbruchstüzen	149
Abbildung 103: Ansicht der Fixierung des Schlittens	153
Abbildung 104: Entstehender Spalt bei rechtwinkligem Abschluss der Fahrbahnen	155
Abbildung 105: Verlängeurng der Bohrlochfahrbahn und Anschluss an die STEV Fahrbahn im Winkel von 45°	155
Abbildung 106: Zentrierung am Oberwagen im Eingriff beim Transport	156
Abbildung 107: Zentrierung an der verkürzten Fahrbahn greift im Transport nicht ein	156
Abbildung 108: Abschließender Entwurf der veränderten Streckentransport- und Einlagerungsvorrichtung	157
Abbildung 109: Übersicht der HARMONY Methode (Leuze electronic GmbH + Co. KG)	160
Abbildung 110: Darstellung der Produktionslokomotive SMT-M-100-BDE der Firma Schalke (Schalke, 2016)	163

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Entwicklungsstand der Transport- und Einlagerungstechnik zu Beginn des Vorhabens	1
Tabelle 2:	Mengengerüst der ausgedienten Brennelemente aus Leistungsreaktoren (Bertrams et al., 2015)	5
Tabelle 3:	Mengengerüst der ausgedienten Brennelemente aus Versuchs- und Prototyp-Kernkraftwerken und Forschungsreaktoren (Bertrams et al., 2015)	5
Tabelle 4:	Mengengerüst der Wiederaufarbeitungsabfälle ausgedienter Brennelemente aus den Leistungsreaktoren (Bertrams et al., 2015)	6
Tabelle 5:	Übersicht der Maße und Massen der berücksichtigten, beladenen Abfallbehälter (Bollingerfehr et al., 2011; WTI, 2020)	33
Tabelle 6:	Technische Daten der konisch geformten, rückholbaren Brennstabkokille BSK-R (Bollingerfehr et al., 2012)	60
Tabelle 7:	Technische Daten der kupferummantelten Brennstabkokille BSK-Cu (Bertrams et al., 2017)	61
Tabelle 8:	Abmessungen und Masse des Transferbehälters (Bollingerfehr et al., 2011)	61
Tabelle 9:	Technische Daten der Brennstabkokille (BSK)	102
Tabelle 10:	Abmessungen und Masse des Transferbehälters	103
Tabelle 11:	Übersicht der Daten für TLB	130
Tabelle 12:	Tabellarische Übersicht des Änderungsbedarfs an der STEV, gegliedert nach erforderlichen Funktionen und Unterfunktionen	134
Tabelle 13:	Prinziplösungen zur Erfüllung der Funktionen	138
Tabelle 14:	Wertskala nach VDI 2225	140
Tabelle 15:	Wichtungsfaktoren	141
Tabelle 16:	Gesamtnutzwerte der Prinziplösungen	142
Tabelle 17:	Technische Daten des IPBv 600 Breitflanschträgers	145
Tabelle 18:	Technische Daten des Baustahls S355	146
Tabelle 19:	Technische Daten zur Fahrwerksauslegung	150
Tabelle 20:	Gegenüberstellung der technischen Daten aus Schalke (2016) und der Lokomotive aus Engelmann et al. (1995)	164
Tabelle 21:	Technische Daten der Referenzlokomotive	164

Abkürzungsverzeichnis

Es sind nur Abkürzungen enthalten, die mehrfach (und dann ohne nebenstehende Erläuterung) verwendet werden.

AVR	Arbeitsgemeinschaft Versuchsreaktor Jülich
BE	Brennelement
BER	Berliner Experimentier-Reaktor
BSK	Brennstabkokille
CSD-B	Conteneur Standard de Déchets Bitumés
CSD-C	Conteneur Standard de Déchets Compactés
CSD-V	Conteneur Standard de Déchets Vitrifiés
DWR	Druckwasserreaktor
ELV	Einlagerungsvorrichtung (vertikale Bohrlöcher)
ELViS	Einlagerungsvorrichtung in Strecken
ewG	Einschlusswirksamer Gebirgsbereich
FEA	Finite Elemente Analyse
FEM	Finite Elemente Methode
FRM	Forschungsreaktor München
FRMZ	Forschungsreaktor Mainz
GNS	Gesellschaft für Nuklear-Service mbH
HFC	Hydraulic Fluid C
KNK	Natriumgekühlte Kernreaktoranlage Karlsruhe
mELViS	Modifizierte Einlagerungsvorrichtung in Strecken
RFR	Rossendorfer Forschungsreaktor
SWR	Siedewasserreaktor
STEV	Streckentransport- und Einlagerungsvorrichtung
THTR	Thorium-Hoch-Temperatur-Reaktor
TLB	Transport- und Lagerbehälter
WWER	Wasser-Wasser-Energie Reaktor

1 Einleitung

Der Stand von Wissenschaft und Technik in Deutschland zur Endlagerung von Wärme entwickelnden Abfällen und ausgedienten Brennelementen (hochradioaktiven Abfällen) im tiefen Untergrund umfasst vier verschiedene Einlagerungsvarianten für drei in Frage kommende Wirtsgesteine. Diese Einlagerungsvarianten sind die Einlagerung in horizontalen Strecken, in vertikalen Bohrlöchern, in horizontalen Bohrlöchern und in horizontalen Kurzbohrlöchern. Als Wirtsgesteine werden Salzgestein in flacher und steiler Lagerung, Tongesteinsformationen von geringer und großer Mächtigkeit, Kristallingesteinsformationen mit überlagernden sedimentären Schichten sowie weitere Kristallingesteinsformationen unterschieden.

Im Rahmen der anwendungsorientierten Grundlagenforschung wurden in der Vergangenheit verschiedene Endlagerkonzepte erarbeitet, in denen jeweils eine Einlagerungsvariante für eine Wirtsgesteinsformation ausgewählt wurde. Eine Einlagerungsvariante beruht wesentlich auf der jeweils zugehörigen Technik zum Transport und zur Einlagerung der Abfallgebinde. Damit ist die Transport- und Einlagerungstechnik ein zentraler Aspekt der Gestaltung und Umsetzbarkeit von Endlagerkonzepten. Der zu Beginn des Vorhabens TREND vorliegende Entwicklungsstand der Transport- und Einlagerungstechnik in Deutschland für die verschiedenen Einlagerungsvarianten und Wirtsgesteine ist in Tabelle 1 dargestellt.

Tabelle 1: Entwicklungsstand der Transport- und Einlagerungstechnik zu Beginn des Vorhabens

Einlagerungskonzept mit Behältertyp	Wirtsgestein		
	Steinsalz	Tongestein	Kristallingestein
Streckenlagerung von POLLUX® Behältern	Stand der Technik (Demonstrationsversuch in 1995)	Keine eigene Entwicklung; Anlehnung an Steinsalz	Keine eigene Entwicklung; Anlehnung an Steinsalz
Vertikale Bohrlochlagerung von Brennstabkokillen (BSK)	Stand der Technik (Demonstrationsversuch in 2010)	Keine eigene Entwicklung; Anlehnung an Steinsalz	Keine eigene Entwicklung; Anlehnung an Steinsalz
Horizontale Bohrlochlagerung von Brennstabkokillen (BSK)	Konzeptidee (entwickelt in 2017)	Kein Endlagerkonzept	
Einlagerung von Transport- und Lagerbehälter (TLB) in horizontalen Kurzbohrlöchern	Konzept (entwickelt in 2014)	Kein Endlagerkonzept	

Der Tabelle ist zu entnehmen, dass sich die einzelnen Varianten der Transport- und Einlagerungstechnik im Zeitpunkt und im Tiefgang ihrer Entwicklung stark voneinander unterscheiden. Darüber hinaus wurde die Transport- und Einlagerungstechnik für Streckenlagerung, vertikale Bohrlochlagerung und Einlagerung von Transport- und Lagerbehältern (TLB) in horizontalen Kurzbohrlöchern für einen Einsatz im Wirtsgestein Steinsalz entwickelt. Nach dem „Gesetz zur Suche und Auswahl eines Standortes für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle“ (Standortauswahlgesetz/StandAG) sind jedoch die Wirtsgesteine Tongestein und Kristallingestein gleichermaßen zu betrachten.

Ziel dieses Vorhabens TREND war es, die Transport- und Einlagerungstechnik für die genannten Einlagerungsvarianten und die drei Wirtsgesteine auf einen vergleichbaren und aktuellen

Entwicklungsstand zu heben. Zunächst wurden dafür die allgemeinen Randbedingungen in Kapitel 2 zusammengefasst.

Die Konstruktionen der erprobten Technik für die Streckenlagerung von POLLUX®-Behältern (Engelmann et al., 1995) und für die vertikale Bohrlochlagerung von BSK in Steinsalz (Filbert et al., 2010) wurden hinsichtlich des Standes der Technik, Konformität mit aktuellem Regelwerk und Nutzbarkeit in anderen Wirtsgesteinen überprüft und entsprechend angepasst. Diese Arbeiten werden in den Kapiteln 3 und 4 dargestellt. Die bisherige Konzeptidee zur horizontalen Bohrlochlagerung aus Bollingerfehr et al. (2018) wurde weiterentwickelt (Kapitel 5). Im Bereich der direkten Endlagerung von Transport- und Lagerbehälter gründen die Arbeiten auf Optimierungspotential, das zum Ende der Erstentwicklung dokumentiert wurde (Kapitel 6). Die bestehende Konzeptentwicklung dieser Variante basiert auf einem Industrieauftrag und wurde bislang nicht veröffentlicht. Die Kapitel 3 bis 6 zur Beschreibung der Entwicklungsarbeit und der Ergebnisse sind in gleicher Weise strukturiert: Auf eine Analyse bestehender Anforderungen folgt eine Beschreibung des aus heutiger Sicht bestehenden Weiterentwicklungsbedarfs. Auf dieser Grundlage erfolgte die Darstellung der Weiterentwicklung und Konstruktion. Parallel zu den Entwicklungsarbeiten wurde iterativ jeweils eine Risikobeurteilung vorgenommen, um die Betriebssicherheit der in der Entwicklung befindlichen Maschine zu prüfen und sicherheitsgerichtete Anpassungen vorzunehmen. Die Übersicht der abschließenden Risikobeurteilungen befindet sich in Kapitel 7. Dort werden auch weitere Maßnahmen für eine Entwicklung bis zur Ausführungsreife vorgeschlagen, um die Sicherheit der Maschinen zu gewährleisten.

Die in diesem Bericht vorgestellten Berechnungen verwenden Formelzeichen. Diese entsprechen bei allgemeinen Formeln denen der maschinenbaulichen Konventionen, wie sie in den üblichen Formelsammlungen, z.B. Gieck & Gieck (2019), aufgeführt sind. Werden Berechnungen anhand referenzierter Normen (z.B. DIN) durchgeführt, finden die Formelzeichnungen dieser Normen Anwendung.

2 Randbedingungen zur Entwicklung von Transport- und Einlagerungstechnik

Die Randbedingungen zur Entwicklung der Transport- und Einlagerungstechnik entstammen im Wesentlichen dem Stand der Wissenschaft und Technik zur Endlagerung. Die betroffenen Wissensbereiche umfassen

- Abfallmengengerüst und Abfallbehälter,
- Endlagerkonzepte,
- den bestehenden Stand der Transport- und Einlagerungstechnik sowie
- bestehende Rückholungskonzepte.

Im Folgenden werden der Stand von Wissenschaft und Technik in diesen Bereichen knapp beschrieben und entsprechende Literaturhinweise für vertiefende Auseinandersetzung mit den einzelnen Themen gegeben.

2.1 Endlagerkonzepte

Zur direkten Endlagerung von ausgedienten Brennelementen wurde Ende der 1980er und Anfang der 1990er Jahre das Referenzkonzept POLLUX® (Engelmann et al., 1995) für die Einlagerung von selbstabschirmenden Abfallbehältern in horizontalen Strecken eines Endlagerbergs entwickelt. Für die Einlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle und ausgedienter Brennelemente in vertikalen Bohrlöchern wurde außerdem für das Wirtsgestein Salz ein Konzept zur Einlagerung mit Brennstabkokillen (BSK) erarbeitet (Filbert et al., 2010). Beide Konzepte erfordern eine Zerlegung von Brennelementen in einer Konditionierungsanlage in Brennstäbe und Strukturteile. Die Brennstäbe werden dann, in Büchsen verpackt, in POLLUX®-Behältern oder in BSK eingelassen. Die Strukturteile werden separat in sogenannten MOSAIK®-Behältern in Strecken eingelagert. Im Gegensatz zu diesen beiden Konzepten wurde in einem weiteren von der Gesellschaft für Nuklear-Service (GNS) und DBE TECHNOLOGY GmbH gemeinsam entwickelten Konzept der direkten Endlagerung von Transport- und Lagerbehältern (TLB) in horizontalen Kurzbohrlöchern auf die Zerlegung von Brennelementen (BE) verzichtet (Filbert et al., 2014; unveröffentlicht). In Bollingerfehr et al. (2018) wurde schließlich eine Option zur Einlagerung von BSK in horizontalen Bohrlöchern skizziert, wiederum unter Berücksichtigung der Zerlegung der Brennelemente.

Die unterschiedlichen Konzepte zur Einlagerung für hochradioaktive Abfälle wurden in der Forschung und Entwicklung an Endlagerkonzepten im Zusammenhang mit verschiedenen geologischen Modellen verwendet. Insbesondere ist die Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben (VSG) zu nennen, in der für die drei Optionen Streckenlagerung von POLLUX®-Behältern, vertikale Bohrlochlagerung von BSK und direkte Endlagerung von TLB verschiedene Endlagerkonzepte entwickelt wurden (Bollingerfehr et al., 2011). Der aktuelle Stand der Endlagerkonzepte wird in Jobmann & Lommerzheim (2014), Lommerzheim & Jobmann (2015) (beide Tongestein), Bollingerfehr et al. (2011), Bollingerfehr et al. (2018) (beide Steinsalz), Bertrams et al. (2017) (Kristallingestein) und Mönig et al. (2020) (alle Wirtsgesteine) jeweils ausführlich beschrieben.

Endlagerkonzepte werden auf Basis bestehender Anforderungen entwickelt. Diese sind einerseits gesetzlichen Ursprungs und beruhen andererseits auf weiteren Vorschriften oder Normen. Andererseits liegt jedem Endlagerkonzept ein Sicherheitskonzept zu Grunde, das Ziele und Maßnahmen zur Sicherstellung der Betriebs- und der Langzeitsicherheit formuliert. Die Entwicklung der Endlagertechnik zum Transport und zur Einlagerung von hochradioaktiven Abfällen muss die sichere Handhabung der Abfälle gewährleisten. Die Einlagerung muss außerdem zu einem Zustand führen, der innerhalb des Gesamtkonzepts des Endlagers die Anforderungen an die Langzeitsicherheit erfüllen kann. Diese Anforderung kann z. B. die geometrische Gestaltung des Einlagerungsorts oder verwendete Materialien beeinflussen: Für das Konzept der vertikalen Bohrlochlagerung wird z. B. über die Verwendung eines Bohrlochkellers u.a. über Argumente aus Sicht der Langzeitsicherheit entschieden. Aus dem jeweiligen Sicherheits- und Endlagerkonzept ergeben sich demnach Anforderungen für die Entwicklung der Transport- und Einlagerungstechnik. Diese werden bei der Aufstellung der Anforderungskataloge in diesem Vorhaben berücksichtigt.

2.2 Art und Menge der Wärme entwickelnden radioaktiven Abfälle und ausgedienten Brennelementen

Das Abfallmengengerüst beeinflusst die Entwicklung von Endlagertechnik durch die zum Einsatz kommenden Abfallbehälter, die auf Basis der anfallenden Abfallarten entwickelt werden. Entsprechend der jeweiligen Beladung der Abfallbehälter ergibt sich außerdem die benötigte Anzahl von Lastwechseln bei Transport und Einlagerung, was Einfluss auf konstruktive Entscheidungen nehmen kann.

In einem Endlager für hochradioaktive Abfälle sind neben den ausgedienten Brennelementen der Leistungsreaktoren, Versuchs- und Prototyp-Kernkraftwerken und Forschungsreaktoren auch die radioaktiven Abfälle aus der Wiederaufarbeitung der Brennelemente aus den Leistungsreaktoren zu berücksichtigen. Das aktuelle Abfallmengengerüst wurde ausführlich in Bertrams et al. (2015) zusammengestellt. Tabelle 2 fasst das Mengengerüst der ausgedienten Brennelemente aus Leistungsreaktoren zusammen. Es ist unterteilt in die Brennelemente aus den verschiedenen Reaktortypen: Druckwasserreaktoren (DWR), Siedewasserreaktoren (SWR) und Druckwasserreaktoren russischen Typs, sogenannten Wasser-Wasser-Energie Reaktoren (WWER), die in der ehemaligen DDR betrieben wurden.

Tabelle 2: Mengengerüst der ausgedienten Brennelemente aus Leistungsreaktoren (Bertrams et al., 2015)

Leistungsreaktoren		Anzahl BE	Schwermetallmasse [tSM¹]
DWR	UO ₂	12.450	6.415
	MOX	1.530	765
SWR	UO ₂	14.350	2.465
	MOX	1.250	220
WWER	UO ₂	5.050	580
Gesamt	UO ₂	31.850	9.460
	MOX	2.780	985
	Summe	34.630	10.445

In Tabelle 3 ist das zu berücksichtigende Mengengerüst der ausgedienten Brennelemente aus Versuchs- und Prototyp-Kernkraftwerken und Forschungsreaktoren zusammengestellt. Die Bezeichnungen stehen für folgendes:

- AVR - Arbeitsgemeinschaft Versuchsreaktor Jülich
- THTR - Thorium-Hoch-Temperatur-Reaktor
- KNK - Natriumgekühlte Kernreaktoranlage Karlsruhe
- Otto Hahn - ein nuklearbetriebenes Forschungsschiff
- BER II - Berliner Experimentier-Reaktor
- FRM - Forschungsreaktor München
- FRMZ - Forschungsreaktor Mainz
- RFR - Rossendorfer Forschungsreaktor

Tabelle 3: Mengengerüst der ausgedienten Brennelemente aus Versuchs- und Prototyp-Kernkraftwerken und Forschungsreaktoren (Bertrams et al., 2015)

Versuchs- und Prototyp-Kernkraftwerke und Forschungsreaktoren	Anzahl an Brennelementen/Brennstäben
AVR	288.161 Brennelement-Kugeln
THTR 300	617.606 Brennelement-Kugeln
KNK	2.484 Brennstäbe
Otto-Hahn	52 Brennstäbe
BER II	120 Brennelemente
FRM II	150 Brennelemente
FRMZ	89 Brennelemente
RFR	950 Brennelemente und 1 Brennstabbehälter mit 16 Brennstäben

Bei den Abfällen aus der Wiederaufarbeitung von Brennelementen handelt es sich um

¹ Tonnen Schwermetall

- Kokillen mit verglasten hochradioaktiven Spaltprodukten und Feedklärschlämmen (HAW-Kokille (CSD-V)),
- Kokillen mit verglasten mittelradioaktiven Spülwässern (CSD-B) und
- Kokillen mit kompaktierten mittelradioaktiven Brennelementhülsen, Strukturteilen und Technologieabfällen (CSD-C).

In Tabelle 4 ist das Mengengerüst der Wiederaufarbeitungsabfälle dargestellt.

Tabelle 4: Mengengerüst der Wiederaufarbeitungsabfälle ausgedienter Brennelemente aus den Leistungsreaktoren (Bertrams et al., 2015)

Abfallstrom	Kokillen	
CSD-V	AREVA-NC	3.024
	Sellafield Ltd.	565
	VEK	140
	Summe	3.729
CSD-B	AREVA-NC	140
CSD-C	AREVA-NC	4.104
Gesamt		7.973

2.3 Konzepte für Abfallbehälter

Zurzeit existieren keine Konzepte für Abfallbehälter, deren Entwicklung die aktuellen regulatorischen Anforderungen berücksichtigt. Die maßgebliche, bislang nicht berücksichtigte Anforderung ist die zur Ermöglichung einer Bergung eingelagerter Abfallgebinde. § 14 Absatz 2 EndlSiAnfV fordert, dass „eingelagerte Abfallgebinde bis zu 500 Jahre nach dem geplanten Verschluss des Endlagers mechanisch so stabil sind, dass eine Handhabung ganzer Abfallgebinde möglich ist und bei ihrer Handhabung keine Freisetzung von radioaktiven Aerosolen [erwartet wird]“. Es ist zwar durchaus denkbar, dass bestehende Behälterkonzepte diese Anforderungen innerhalb bestimmter Randbedingungen erfüllen können, entsprechende Untersuchungen oder Nachweise stehen jedoch aus. Für die Weiterentwicklung der Transport- und Einlagerungstechnik in diesem Vorhaben sind vor allem Behältermaße und Behältermassen wesentliche zu berücksichtigende Größen. Zur Quantifizierung dieser werden die bestehenden Behälterkonzepte aus den einschlägigen Endlagerkonzepten verwendet. Diese Herangehensweise beruht auf der Annahme, dass bestehende Behälterkonzepte Maße und Massen von in Zukunft genehmigungsfähigen Behältertypen ausreichend genau approximieren, da mechanische Stabilität, Abschirm- und Moderationswirkung weiterhin wesentliche Auslegungsziele zukünftiger Abfallbehälter sein werden. Weder die grundsätzliche Machbarkeit der Transport- und Einlagerungstechnik noch sicherheitsrelevante Vor- oder Nachteile verschiedener technischer Optionen werden dadurch maßgeblich beeinflusst. In diesem Vorhaben werden die Begriffe Abfallbehälter und Abfallgebinde verwendet. Diese sind synonym zu den auch gebräuchlichen Begriffen Endlagerbehälter oder Endlagergebinde. Abfallgebinde oder Endlagergebinde bezeichnen dabei immer den mit Abfällen beladenen Behälter.

2.3.1 Streckenlagerung: Abfallbehälter

Für die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle in Strecken werden die folgenden Behältertypen entsprechend dem aktuellen Stand von Wissenschaft und Technik vorgesehen:

- Brennstäbe ausgedienter Brennelemente aus den Leistungsreaktoren in POLLUX®-Behältern
- radioaktive Abfälle aus der Wiederaufarbeitung in POLLUX®-Behältern
- ausgediente Brennelemente aus Versuchs- und Prototyp-Kernkraftwerken und Forschungsreaktoren in Transport- und Lagerbehältern (CASTOR® THTR/AVR, CASTOR® KNK, CASTOR® MTR 2).

Die folgenden Behälterbeschreibungen entstammen Bollingerfehr et al. (2011).

POLLUX®-10

Der POLLUX®-10 (Abbildung 1) besteht aus einem Innen- und einem Außenbehälter und wird durch einen geschraubten Primärdeckel und einen geschweißten Sekundärdeckel dicht verschlossen. Der Innenraum ist in fünf Kammern unterteilt, in die je eine Brennstabbüchse mit Brennstäben von zwei Druckwasserreaktoren (DWR)-Brennelementen oder sechs Siedewasserreaktor (SWR)-Brennelementen eingesetzt werden kann. Unter geometrischen Gesichtspunkten können auch Brennstabbüchsen mit den gezogenen Brennstäben von fünf WWER-Brennelementen aufgenommen werden. Der POLLUX®-10 (Abbildung 1) hat einen Durchmesser von 1.560 mm, eine Länge von 5.517 mm und eine Masse im beladenen Zustand von 65 Mg. Zur Handhabung ist der Behälter mit vier Tragzapfen ausgestattet. Der POLLUX®-10 wurde für die Endlagerung im Steinsalz bei einer Auslegungstemperatur im Endlagerkonzept von 200 °C ausgelegt. Es wurde außerdem ein Prototyp für Handhabungsversuche gefertigt. Für Endlagerkonzepte mit Streckenlagerung, die eine geringere Behälterbeladung erforderten (z. B. im Tongestein), wurde bislang jeweils ein Behälterkonzept zugrunde gelegt, für das die Maße des POLLUX®-10 auf Basis rein geometrischer Betrachtungen angepasst wurden.

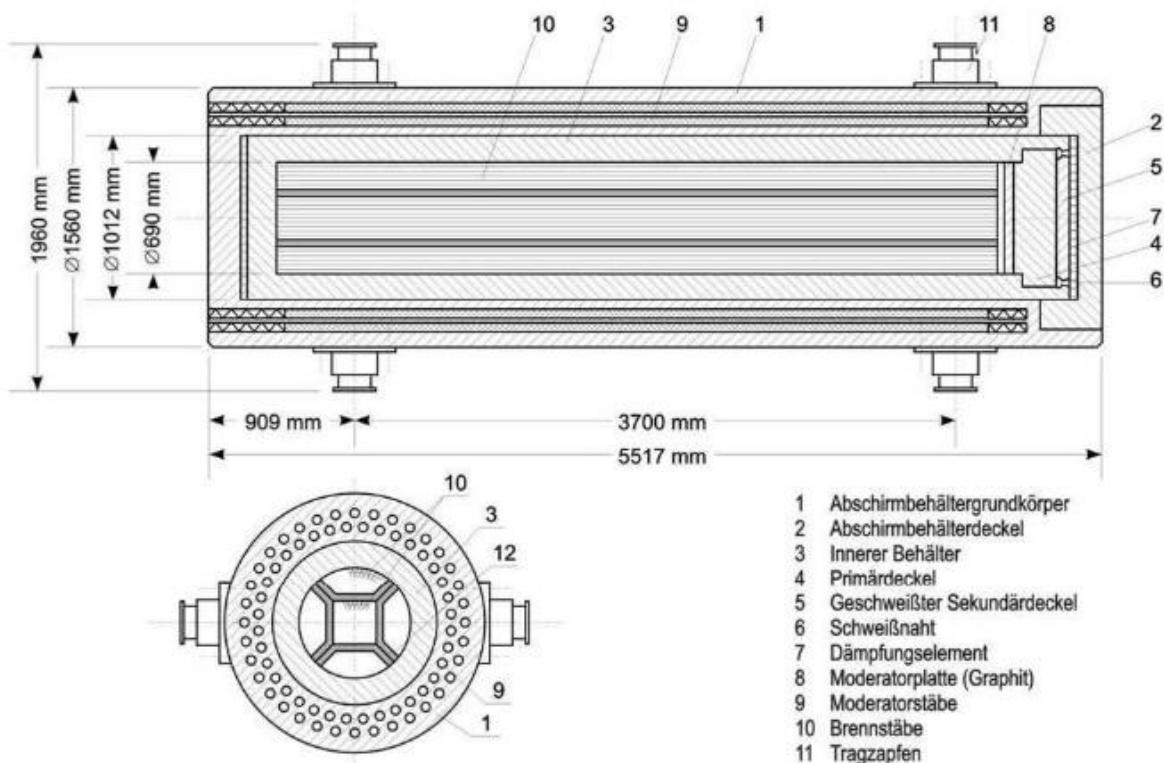


Abbildung 1: Technische Zeichnung des POLLUX®-10 (Bollingerfehr et al., 2011)

POLLUX®-9

Der POLLUX®-9 ist für die Aufnahme der Kokillen mit Wiederaufarbeitungsabfällen bestimmt. Das räumliche Fassungsvermögen ist für 3 x 3 gestapelte HAW-Kokillen (CSD-V) geeignet. Das Behälterkonzept basiert auf dem POLLUX®-10. Für einen POLLUX®-9 hat keine Entwicklung stattgefunden. Für den prinzipiellen Aufbau, die Abmessungen und die Masse des Behälters wurde die Annahme getroffen, dass diese identisch mit den Daten des POLLUX®-10 sind. Beladen ist der POLLUX®-9 mit jeweils 9 CSD-V, 9 CSD-B oder 9 CSD-C. Für Endlagerkonzepte mit Streckenlagerung, die aufgrund der Wärmeentwicklung von CSD-V eine geringere Behälterbeladung als 9 Kokillen erforderten (z. B. im Kristallingestein), wurde bislang jeweils ein Behälterkonzept zugrunde gelegt, für das die Maße des POLLUX®-9 auf Basis rein geometrischer Betrachtungen angepasst wurden.

CASTOR® THTR/AVR, CASTOR® KNK

Die CASTOR®-Behälter der Typen THTR/AVR und KNK bestehen aus einem zylindrischen Grundkörper aus Gusseisen mit Kugelgraphit und aus zwei übereinanderliegenden, einzeln abgedichteten Deckeln. Zur Handhabung werden an der Mantelfläche der Behälter Tragzapfen montiert. Der CASTOR® THTR/AVR enthält einen zylindrischen Innenraum zur Aufnahme einer Stahlkanne mit etwa 2.100 THTR-Brennelementen oder zur Aufnahme von zwei Stahlkannen mit insgesamt 1.900 AVR-Brennelementen. Der CASTOR® KNK hat im Behälterschachtraum einen Tragkorb, der jeweils neun Büchsen mit bestrahltem und unbestrahltem Kernbrennstoff aufnimmt. Die Behälter haben jeweils eine Länge von 2.743 mm, einen Durchmesser von 1.380 mm und eine Masse von 26 Mg. Die Behälter CASTOR® THTR/AVR und KNK (Abbildung 2) werden derzeit für Transport und Zwischenlagerung verwendet. Ihre Eignung als Abfallbehälter wurde noch nicht nachgewiesen.

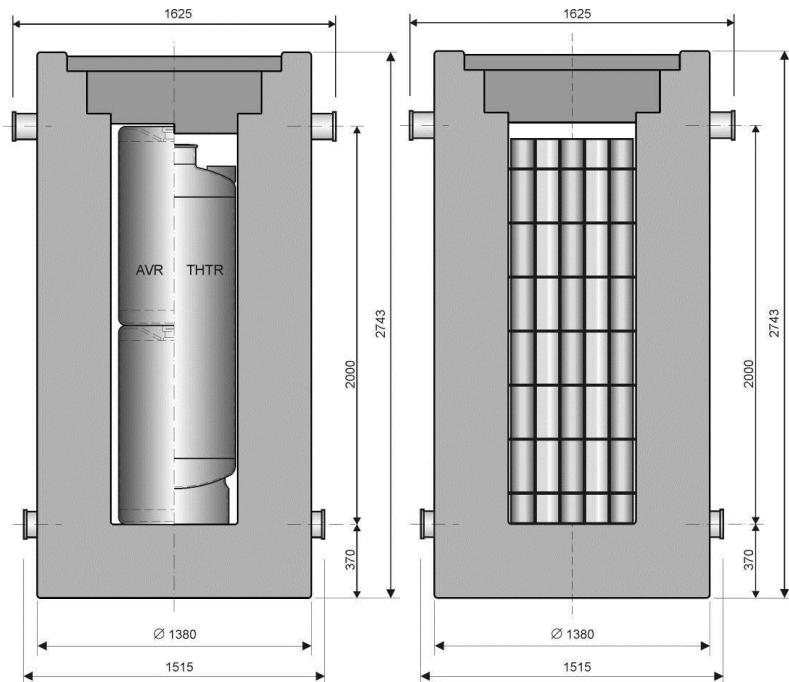


Abbildung 2: Technische Zeichnung der CASTOR® THTR/AVR mit zwei Stahlkannen für AVR-BE und mit einer Stahlkanne für THTR-BE (links) und CASTOR® KNK mit Phenix-Büchsen (rechts) (Bollingerfehr et al., 2011)

CASTOR® MTR 2

Der CASTOR® MTR 2 besteht aus einem einteiligen, dickwandigen zylindrischem Behälterkörper mit Boden aus Gusseisen mit Kugelgraphit. Am oberen Zylinderende sind der Primär- und Sekundärdeckel angeordnet. Der CASTOR® MTR 2 wird mit Brennelementen aus verschiedenen Forschungsreaktoren wie Rossendorfer Forschungsreaktor oder Forschungsreaktor Mainz beladen. Der Behälter hat eine Länge von 1.631 mm, einen Durchmesser von 1.430 mm und eine Masse beladen von 16 Mg. Die Eignung als Abfallbehälter wurde für den CASTOR® MTR 2 ebenfalls nicht nachgewiesen.

2.3.2 Vertikale Bohrlochlagerung: Abfallbehälter

Für dieendlagerung hochradioaktiver Abfälle in vertikaler Bohrlochlagerung werden folgende weitere Abfallbehälter vorgesehen:

- Brennstäbe von DWR-, SWR- und WWER-Brennelementen in Brennstabkokillen (BSK)
- radioaktive Abfälle aus der Wiederaufarbeitung (CSD-V, CSD-B und CSD-C), ebenfalls in Triple Packs bzw. BSK (s. u.)

Die folgenden Behälterbeschreibungen entstammen Bollingerfehr et al. (2011), Bollingerfehr et al. (2012) und Bertrams et al. (2017). Nach Bollingerfehr et al. (2011) sind für dieendlagerung von CSD sogenannte Triple-Packs vorgesehen, die drei CSD aufnehmen können. Diese Triple-Packs sind in ihren äußereren Abmessungen und ihrer Masse den BSK so ähnlich, dass in diesem Vorhaben zwischen BSK und Triple-Packs nicht weiter unterschieden wird. Es wird im Weiteren nur noch auf BSK Bezug genommen.

Brennstabkokille (BSK)

Die Brennstabkokille (Abbildung 3) wurde als alternative zum POLLUX®-Behälter entworfen. In zwei Brennstabbüchsen werden 3 DWR-BE, 9 SWR-BE oder 7,5 WWER-BE aufgenommen. Die BSK wurde für dieendlagerung im Steinsalz bei einer Auslegungstemperatur von 200 °C ausgelegt. Es wurde außerdem ein Prototyp für Handhabungsversuche gefertigt. Die BSK hat eine Länge von 4.980 mm, einen Durchmesser von 440 mm und eine Masse im beladenen Zustand von 6,6 Mg. Die Brennstabkokille selbst hat keine abschirmende oder moderierende Wirkung, weshalb für den Transport ein Transferbehälter notwendig ist, der diese Funktionen übernimmt.

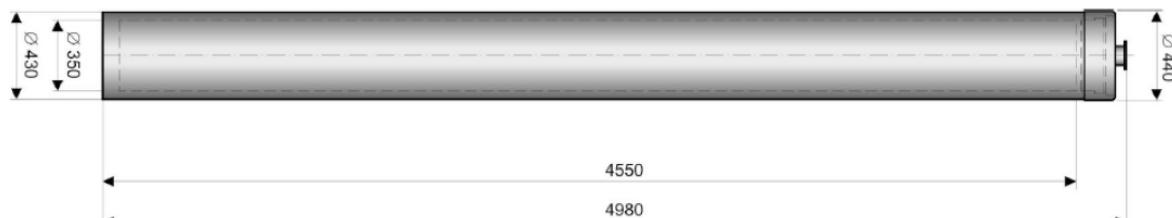


Abbildung 3: Skizze einer Brennstabkokille (Bollingerfehr et al., 2011)

Um die Rückholung der Abfallgebinde zu erleichtern, wurde die rückholbare Brennstabkokille entworfen (Abbildung 4). Diese ist konisch geformt und erleichtert so das Ziehen der Kokille aus der verrohrten und mit Sand verfüllten Bohrung. Die BSK-R hat einen Durchmesser von 520 mm, eine Länge von 5.060 mm und eine maximale Masse von 6,6 Mg.

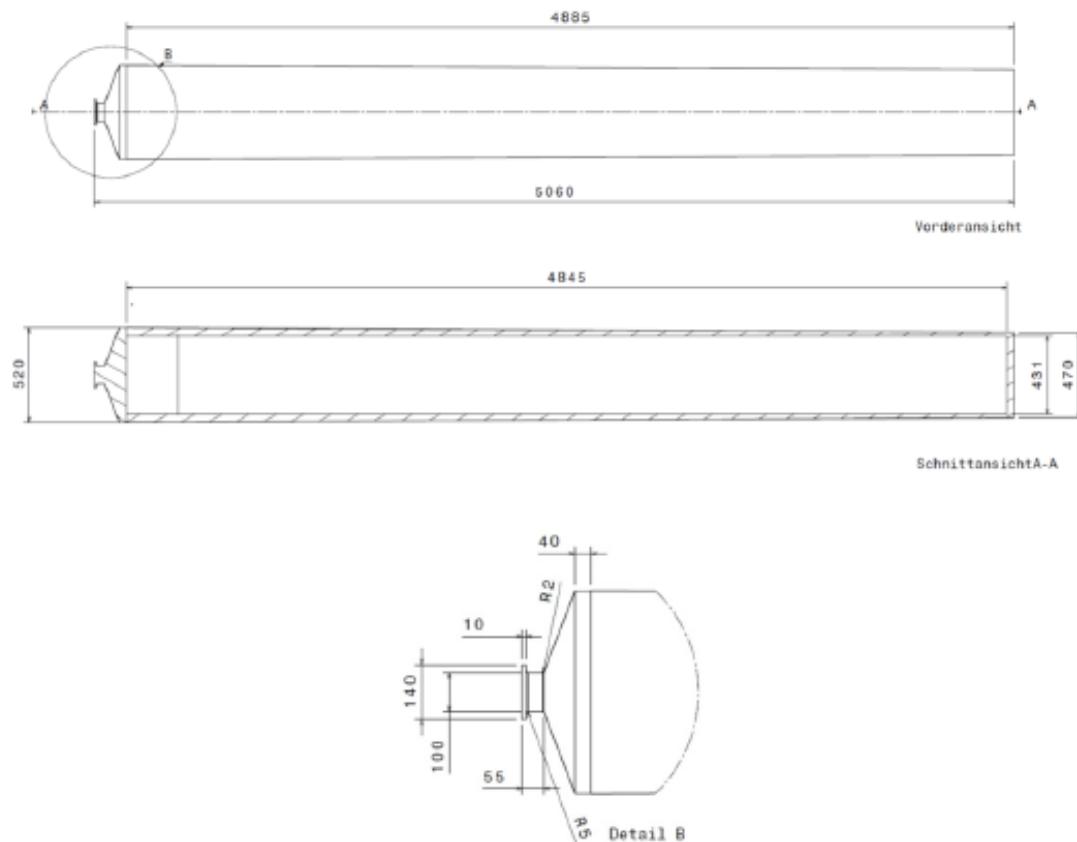


Abbildung 4: Skizze der rückholbaren Brennstabkokille BSK-R (Bollingerfehr et al., 2012)

Für Endlagerkonzepte mit vertikaler Bohrlochlagerung, die eine geringere Behälterbeladung erforderten (z. B. in großen Teufen), wurden die Maße des Behälterkonzepts nicht angepasst. Die Länge der BSK ändert sich auch bei geringerer Beladung mit Brennstäben nicht aufgrund der gleich bleibenden Länge der Brennstäbe. Die Änderung des Durchmessers bei geringerer Beladung mit Brennstäben ist für die Erarbeitung von Endlagerkonzepten vernachlässigbar gering. Eine Änderung der Länge bei Beladung mit weniger als drei CSD gilt aufgrund der vergleichsweise geringen Behälteranzahl desgleichen.

Für die Endlagerung in vertikalen Bohrlöchern im Kristallingestein werden Konzepte verfolgt, bei denen der Einschluss der radioaktiven Abfälle auf technischen und geotechnischen Barrieren beruht. In diesem Fall ist der Abfallbehälter mit einer Einschlussfunktion im gesamten Nachweiszeitraum zu entwickeln. Bestehende Konzepte gehen von einer BSK mit Kupferummantelung von 5 mm bis 50 mm aus.

Transferbehälter

Da Brennstabkokillen nicht selbst-abschirmend sind, ist für den Transport ein Transferbehälter (Abbildung 5) erforderlich. Dieser ist in dem Sinne kein Abfallbehälter, muss aber trotzdem durch die Einlagerungstechnik gehandhabt werden. Der Transferbehälter ist als dickwandiger Hohlzylinder aus Gusseisen mit Kugelgraphit ausgeführt. Am Fuß und Kopf des Behälters befinden sich Behälterschleusen. Der Transferbehälter hat eine Länge von 5.570 mm, einen Durchmesser von 1.385 mm und eine Masse beladen von ca. 54 Mg. Die Behälterschleusen haben eine Höhe von 1.885 mm. Der Transferbehälter wurde ausgelegt, als Prototyp gebaut und in Handhabungsversuchen erprobt.

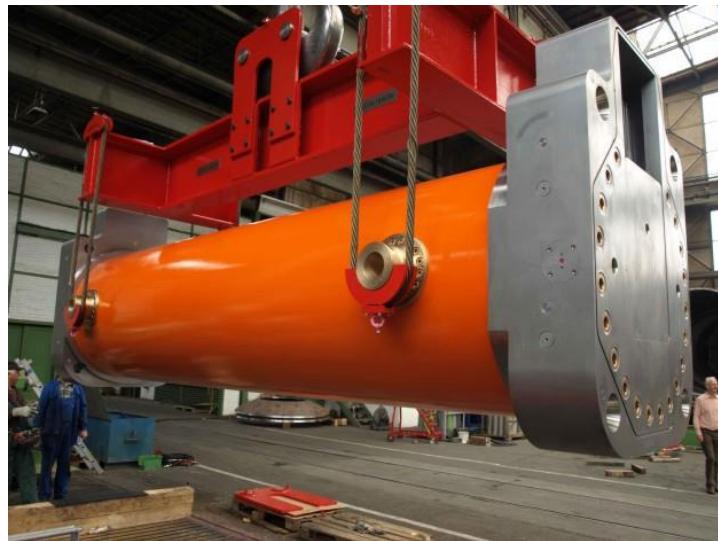


Abbildung 5: Photo des Transferbehälters (Bollingerfehr et al., 2011)

2.3.3 Horizontale Bohrlochlagerung: Abfallbehälter

Für die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle in horizontalen Bohrlöchern wird die für die vertikale Bohrlochlagerung entwickelte Brennstabkokille vorgesehen.

2.3.4 Direkte Endlagerung von Transport- und Lagerbehältern: TLB

Bei der direkten Endlagerung von Transport- und Lagerbehältern (TLB) wird eine Vielzahl unterschiedlicher Transport- und Lagerbehälter zur Endlagerung vorgesehen:

- CASTOR® V/19 für DWR-BE
- CASTOR® V/52 für SWR-BE
- CASTOR® 440/84 für WWER-BE
- radioaktive Abfälle aus der Wiederaufarbeitung (CSD-V, CSD-B, CSD-C Kokillen) in CASTOR® HAW 20/28 CG, CASTOR® HAW 28 M, TN 23 E, TS 28 V und TGC 27

Entwickler und Hersteller dieser Behälter ist die GNS. Die einzige Ausnahme ist der Behälter TN 23 E, der von der französischen Gesellschaft AREVA TN International hergestellt wird. Brennelemente aus Forschungs- und Prototypreaktoren werden in diesem Konzept in den bereits beschriebenen TLB zur Streckenlagerung eingelagert. Die folgenden Behälterbeschreibungen entstammen Bollingerfehr et al. (2011).

Die Transport- und Lagerbehälter bestehen aus einem Körper aus Gusseisen in der Form eines einseitig geschlossenen Hohlzylinders. Im inneren befindet sich ein Tragkorb zur Aufnahme der Beladung. Verschlossen sind die Behälter durch ein Doppeldeckel-Dichtsystem. Die Transport- und Lagerbehälter verfügen im Gegensatz zu den POLLUX®-Behältern nicht über eine glatte Mantelfläche, sondern sind mit Kühlrippen ausgerüstet. Die Behälter werden gegenwärtig für die Zwischenlagerung verwendet. Eine Eignung für die Endlagerung ist noch

nachzuweisen. Aus Gründen der Kritikalitätssicherheit ist eine Verfüllung der Hohlräume im Behälter mit Magnetit vorgesehen. Insgesamt wird als abdeckende Behältermasse 160 Mg angenommen. Beispielhaft zeigt Abbildung 6 3D Modelle der Behälter CASTOR® V/19 und CASTOR® HAW 28M.



Abbildung 6: Darstellungen von CASTOR® V/19 (links) und CASTOR® HAW 28M (rechts) (GNS, 2021)

2.4 Stand der Transport- und Einlagerungstechnik

2.4.1 Technik der Streckenlagerung

Das Konzept der Streckenlagerung sieht die Einlagerung der Abfallgebinde entweder auf der Sohle der Einlagerungsstrecken (im Wirtsgestein Steinsalz) oder einem Sockel (in den Wirtsgesteinen Tongestein und Kristallingestein) vor. Die Einlagerungsstrecken sind als Blindstrecken ausgeführt, d.h. sie haben nur einen Zugang zum Grubengebäude, über den sie mit Abfallgebinden beschickt werden. Die Abfallgebinde werden auf schienengebundenen Plateauwagen mit einer batteriebetriebenen Lokomotive bis in die Einlagerungsstrecke angeliefert, mit einem Portalkran, der Einlagerungsvorrichtung in Strecken (EIViS) vom Plateauwagen abge-

hoben und schließlich in den Einlagerungsstrecken abgelegt. Die Transport- und Einlagerungstechnik wurde konstruiert, gefertigt und in einem Versuchsstand ausführlich erprobt (Engelmann et al., 1995; Abbildung 7).

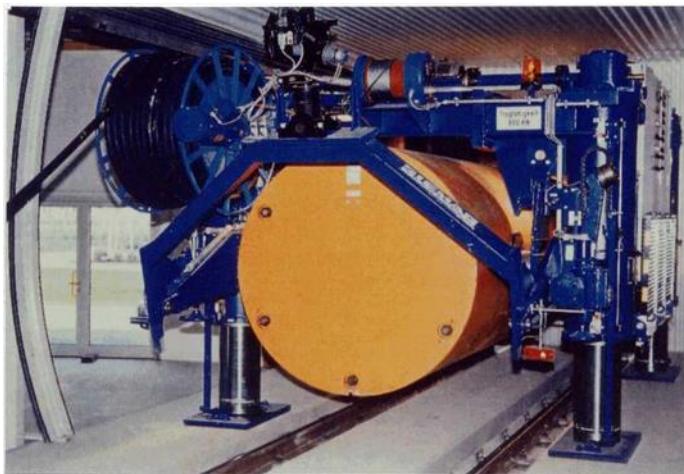


Abbildung 7: Photo der Einlagerungsvorrichtung in Strecken im Versuchsstand (Engelmann et al., 1995)

Die Lokomotive ist als Zugfahrzeug für den söhligen Transport des Plateauwagens vom Füllort am Schacht bis hin zur Einlagerungsvorrichtung vorgesehen. Der Plateauwagen (Abbildung 8) kommt zum Transport des POLLUX® Behälters in den Tagesanlagen und unter Tage bis zum untertägigen Einlagerungsort zum Einsatz. Seine Mulde ist dem Behälter entsprechend nachgeformt, inklusive Aufnahmen für die Tragzapfen des Behälters, um ein Verrutschen zu vermeiden. Über eine Deichsel mit Kupplung wird der Wagen an die Lokomotive angeschlossen. Auslegungsbestimmend mit Blick auf das notwendige Lichtraumprofil der Transporttechnik ist allerdings die Einlagerungsvorrichtung.

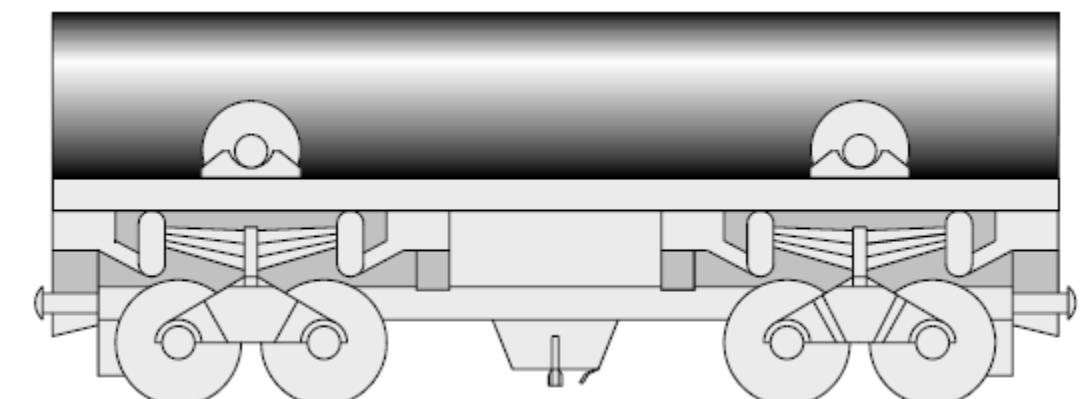


Abbildung 8: Schemazeichnung Plateauwagen mit POLLUX®-Behälter (Engelmann et al., 1995)

2.4.2 Technik der Vertikalen Bohrlochlagerung

Das Konzept der vertikalen Bohrlochlagerung und die Transport- und Einlagerungstechnik wurden in Filbert et al. (2010) entwickelt und erprobt. Das Konzept geht von Bohrlochlängen

von bis zu 300 m aus. Da die BSK nicht selbstabschirmend sind, werden sie in Transferbehältern bis zum Einlagerungsbohrloch transportiert. Die Besonderheit des Transferbehälters besteht darin, dass an jedem Ende eine Schleuse angebracht ist, die es ermöglicht, den Behälter unter Tage unter Einhaltung der Vorgaben des Strahlenschutzes zu transportieren und zu entladen.

Für den Transport wird ein Plateauwagen, gezogen von einer batteriebetriebenen Lokomotive, verwendet. Die Lokomotive ist für den söhlichen Transport des Plateauwagens vom Füllort am Schacht bzw. am Fuß von Tagesstrecken bis hin zur Einlagerungsvorrichtung vorgesehen (Abbildung 9). Die Spurweite der Gleise beträgt 1.990 mm, um die Überfahrung der Bohrlöcher für die Einlagerung der Kokillen zu ermöglichen. Der Plateauwagen (Abbildung 9) ist zum Transport des Transferbehälters in den Tagesanlagen und unter Tage bis zum Einlagerungsort vorgesehen. Seine Mulde ist dem Transferbehälter entsprechend nachgeformt, inklusive der Tragzapfenaufnahme des Behälters, um ein Verrutschen zu vermeiden. Über eine Deichsel mit Kupplung wird der Wagen an die Lokomotive angeschlossen.



Abbildung 9: Batteriebetriebene Lokomotive mit Energieteil (links) und Plateauwagen mit Transferbehälter (rechts) (Filbert et al., 2010)

Am Einlagerungsbohrloch nimmt die Einlagerungsvorrichtung den Transferbehälter vom Plateauwagen auf und dreht ihn in die Vertikale. Die Umgebung durch eine Abschirmhaube vor Strahlung schützend, wird der Transferbehälter dann kopfseitig geöffnet, um den Greifer der Winde am Kopf der innen liegenden BSK anzuschlagen und sie dann leicht anzuheben. Über den Elektromotor der Winde kann die BSK dann nach dem Öffnen des unteren Deckels des Transferbehälters und der Bohrlochschleuse in das Bohrloch versenkt werden. Die Bohrlochschleuse (Abbildung 10) erfüllt mehrere Funktionen. Sie schützt die Umgebung vor Strahlung aus dem unversetzten Bohrloch, sie ermöglicht den Zugang zum Bohrlochinneren, sie sorgt für die Ver- und Entriegelung zwischen sich und dem Transferbehälter und sie garantiert die richtige Positionierung des Transferbehälters. Insbesondere bei Funktionsstörungen der Einlagerungsvorrichtung ist nach Stand der Technik Personaleinsatz notwendig und nur mit Hilfe der Schleuse immer strahlengeschützt möglich.

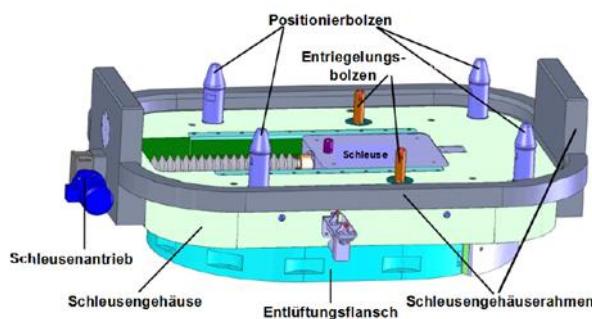


Abbildung 10: Modell der Bohrlochschleuse (Filbert et al., 2010)

Abbildung 11 zeigt die Bestandteile der Transport- und Einlagerungstechnik im Versuchstand. Zum Entladen des Transferbehälters muss die Schleuse des Transferbehälters fest mit der Bohrlochschleuse verbunden und die BSK mit dem Greifer der Einlagerungsvorrichtung leicht angehoben sein. Erst dann lassen sich die Schleusen öffnen.

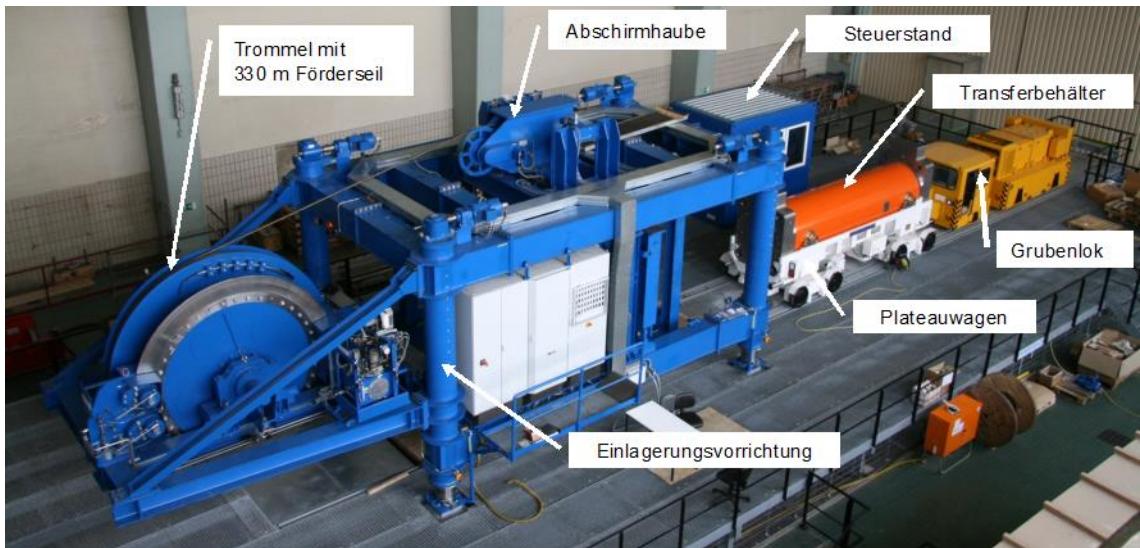


Abbildung 11: Photo der Einlagerungsvorrichtung für Brennstabkokillen und Triple-Packs im Versuchsstand (Filbert et al., 2010)

Für die Verwendung der Einlagerungstechnik ist ein Bohrlochkeller vorgesehen, der die Bohrlochschleuse aufnimmt und unterhalb des Sohlenniveaus ausreichend Platz für die Drehung des Transferbehälters in die Vertikale ermöglicht. Dessen Maße betragen etwa 2,85 m in der Tiefe, 2,2 m in der Breite und 5,5 m in der Länge.

2.4.3 Technik der Horizontalen Bohrlochlagerung

Im Konzept der horizontalen Bohrlochlagerung nach Bollingerfehr et al. (2018) werden verrohrte Bohrlöcher mit einer Länge von ca. 100 m vorgesehen. Die Bohrlöcher verbinden zwei nebeneinanderliegende Bohrlochbeschickungsstrecken. Die Bohrlochverrohrung ist auf der Innenseite zum erleichterten Einschieben von BSK in regelmäßigen Abständen mit Panzerrollen ausgestattet. Der Transport der BSK zum Bohrloch erfolgt wie in der Variante der vertikalen Bohrlochlagerung mit Hilfe einer batteriebetriebenen Lokomotive und einem Plateauwagen. Die Kokillen werden zur Abschirmung der radioaktiven Strahlung in Transferbehältern transportiert. Das Bohrloch ist mit einer Bohrlochschleuse versehen. Der Einschub der BSK in das Bohrloch erfolgt, bis das komplette Bohrloch befüllt ist. Eine Verfüllung des Bohrloches mit Sand oder ähnlichen Materialien ist nicht geplant. Bei einer Auslegungstemperatur von 200°C ist der Wärmetransport durch Wärmestrahlung ausreichend, um die Auslegungstemperatur einzuhalten. Die Lagestabilität der BSK im Bohrloch wird durch die Panzerrollen gewährleistet. Das Bohrloch wird nach der Einlagerung mit einem Stahldeckel verschlossen.

Der Einschub der BSK in das Bohrloch ist in zwei Schritten vorgesehen. Für den ersten Schritt ist der Transferbehälter mit einer Schubkette ausgestattet, die einzelne BSK aus dem Transferbehälter heraus in das Bohrloch einschieben kann. Für die Ausführung des zweiten Schritts wird der Wagen mit Transferbehälter und Schubkette ausgetauscht gegen ein Gestängeeinschubsystem, welches eine Gruppe von vorstehenden BSK bis in das Bohrlochtiefste einschieben kann.

Transferbehälter und Schubkette

Der Transferbehälter aus Filbert et al. (2010) ist zusätzlich mit einer integrierten Schubkette mit Führungsschiene ausgestattet. Die Schubkette ist für den Transport der BSK aus dem Transferbehälter bis hinter die Bohrlochschleuse ausgelegt. Die Schubkette verfügt hierzu über eine mechanische Andockvorrichtung an der Kopfseite der BSK. Die Schubkette wird, eingerollt in einem Kettenmagazin, auf der dem Bohrloch abgewandten Seite des Transferbehälters gelagert. Von hier aus kann die Kette durch den Transferbehälter aus- und eingefahren werden. Die Schubkette verfügt über einen elektrischen Stellmotor als Antrieb. Die Position des Stellmotors und das Schubkettenmagazin sind so gestaltet, dass auch während der Transferbehälter am Bohrloch angedockt oder mit einer BSK beladen ist, eine Wartung unter Berücksichtigung des Strahlenschutzes möglich ist.

Plateauwagen für den Transferbehälter

Der Plateauwagen ist für die Ausrichtung des Transferbehälters vor dem Einlagerungsbohrloch mit einem drehbaren Oberwagen und Stellmotoren zur Arretierung des geladenen Transferbehälters mit der Bohrlochschleuse ausgestattet. Zusätzlich ist der Plateauwagen gegen die beim Einschub der Kokille auftretenden Kräfte sicher abzustützen. Für den schienengebundenen Transport des Plateauwagens ist der Einsatz einer batteriebetriebenen Lokomotive vorgesehen.

Gestängeeinschub

Das Konzept sieht einen Einschub der BSK über ein Bohrgestänge in das Bohrloch vor. Die Gestänge werden durch die Bohrlochschleuse hindurch hydraulisch eingeschoben und nach dem Einschieben der BSK hydraulisch wieder zurückgezogen. Die Gestängesegmente werden durch eine an den Gestängedurchmesser angepasste Gestängeschleuse, die an die Bohrlochschleuse andockt, in das Bohrloch eingebracht. Die Zentrierung des Gestänges erfolgt über die Panzerrollen, da der Gestängedurchmesser dem Kokillendurchmesser entspricht. Die Einbringtiefe richtet sich nach der Rollreibungskraft (Panzerrollen) der BSK in der Verrohrung, sowie der Rollreibungskraft (Panzerrollen) des Schub-/ Zuggestänges in der Bohrung. Die Hydraulikanlage sowie das Schubgestänge werden mittels eines Plateauwagens schienengebunden unter Tage transportiert.

Gestängeschleuse

Die Gestängeschleuse ist Teil der Einlagerungstechnik. Sie wird mit dem Plateauwagen für den Gestängeeinschub an das Bohrloch herangeführt und an die Bohrlochschleuse angedockt. Die Gestängeschleuse besteht aus einer Schleusenkammer, die im angedockten Zustand direkt vor der Bohrlochschleuse liegt. Die Schleusenkammer hat eine an die Geometrie des Gestänges und der Einlagerungsvorrichtung angepasste Breite, Länge und Höhe. Bohrlochseitig verfügt die Kammer über eine an die Bohrlochschleuse angepasste Positionierungs- und Zentriervorrichtung, die das Andocken, die sichere Positionierung sowie die Entriegelung der Bohrlochschleuse gewährleistet. Auf der dem Bohrloch abgewandten Seite wird die Schleuse durch die hydraulische Schubvorrichtung abgeschlossen. Nur nach oben, in Richtung der Firste, befindet sich eine Öffnung, durch die die Gestänge durch einen nebenstehenden Manipulator vom Gestängemagazin in die Schubvorrichtung eingesetzt werden können. An- und Abkopplung der Gestänge müssen somit ohne Eingriff von außen erfolgen (z. B. vollautomatisch oder ferngesteuert).

Plateauwagen der Einlagerungsvorrichtung

Der Plateauwagen stellt die Transporttechnik der Gestängeeinschubtechnik zum Bohrloch dar. Der Plateauwagen verfügt über einen drehbaren Oberwagen sowie Stellmotoren, um die Arretierung der Einlagerungstechnik, speziell der Gestängeschleuse, am Bohrloch (Bohrlochschleuse), vorzunehmen. Er ist in der Lage, die Gestängeschleuse und die hydraulische Schubanlage aufzunehmen, ebenso wie die Reaktionskräfte aus dem Betrieb der Einlagerungsvorrichtung. Der Wagen ist schienengebunden.

Bohrlochschleuse

Die Bohrlochschleuse verschließt die Einlagerungsbohrung und schirmt diese zur Einlagerungsstrecke hin ab. Das Einlagerungsbohrloch selbst schließt mit einem Aufnahmerohr ab. Die Bohrlochschleuse wird auf das Aufnahmerohr aufgesetzt und verschraubt.

2.4.4 Technik der Direkten Endlagerung von TLB

Eine ausführliche Beschreibung der Transport- und Einlagerungstechnik für Transport- und Lagerbehältern wurde im Rahmen eines industriefinanzierten Forschungsprojekts zur „Direk-

ten Endlagerung von Transport- und Lagerbehältern“ (Filbert et al., 2014) entworfen und konstruiert. Die Abschlussberichte wurden nicht veröffentlicht, weshalb hier keine ausführlichen Beschreibungen referenziert werden können. Aus diesem Grund sind die folgenden Darstellungen etwas detaillierter als für die vorgehenden Ausführungen zu anderen Einlagerungsvarianten, bei denen auf entsprechende Forschungsberichte verwiesen werden konnte.

Die Grundannahme der Direkten Endlagerung von TLB beruht darauf, die Brennelemente aus Leistungsreaktoren nicht zu zerlegen, sondern in Gänze in den TLB, die auch für die Zwischenlagerung zum Einsatz kommen, endzulagern. Aufgrund der großen Abmessungen, der hohen Massen und der starken Wärmeproduktion der TLB ist eine Streckenlagerung wie für POLLUX®-Behälter nicht umsetzbar. Die Unterschiede in der Herangehensweise beginnen schon am Schacht: Im Gegensatz zu anderen Einlagerungskonzepten findet bei der direkten Endlagerung von ausgedienten Brennelementen in Transport- und Lagerbehältern eine Umladung am Füllort des Transportschachtes statt. Zunächst wird ein mit einem TLB beladener Schachttransportwagen am Füllort durch eine Aufschub- und Abzugsvorrichtung vom Förderkorb abgezogen und auf einem Querverschub bereitgestellt. Mit der Umladevorrichtung wird der TLB auf die Streckentransport- und Einlagerungsvorrichtung (STEV) umgeladen (Abbildung 12) und mit Hilfe von zwei batteriebetriebenen Lokomotiven zum Einlagerungsort gebracht. Am Einlagerungsort wird der TLB mit dem drehbaren Oberwagen der STEV um 90° gedreht, damit in die Einlagerungsposition gebracht und durch einen hydraulischen Teleskopzylinder auf einem Schlitten in das horizontale Kurzbohrloch eingeschoben (Abbildung 13).

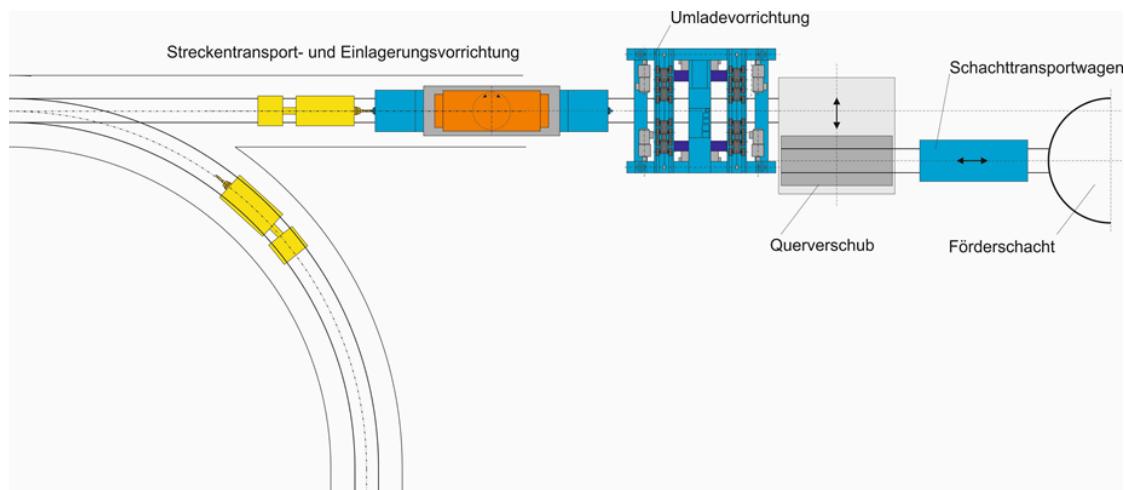


Abbildung 12: Skizze der Anlagen am Füllort zur Umladung von TLB (Filbert et al., 2014)

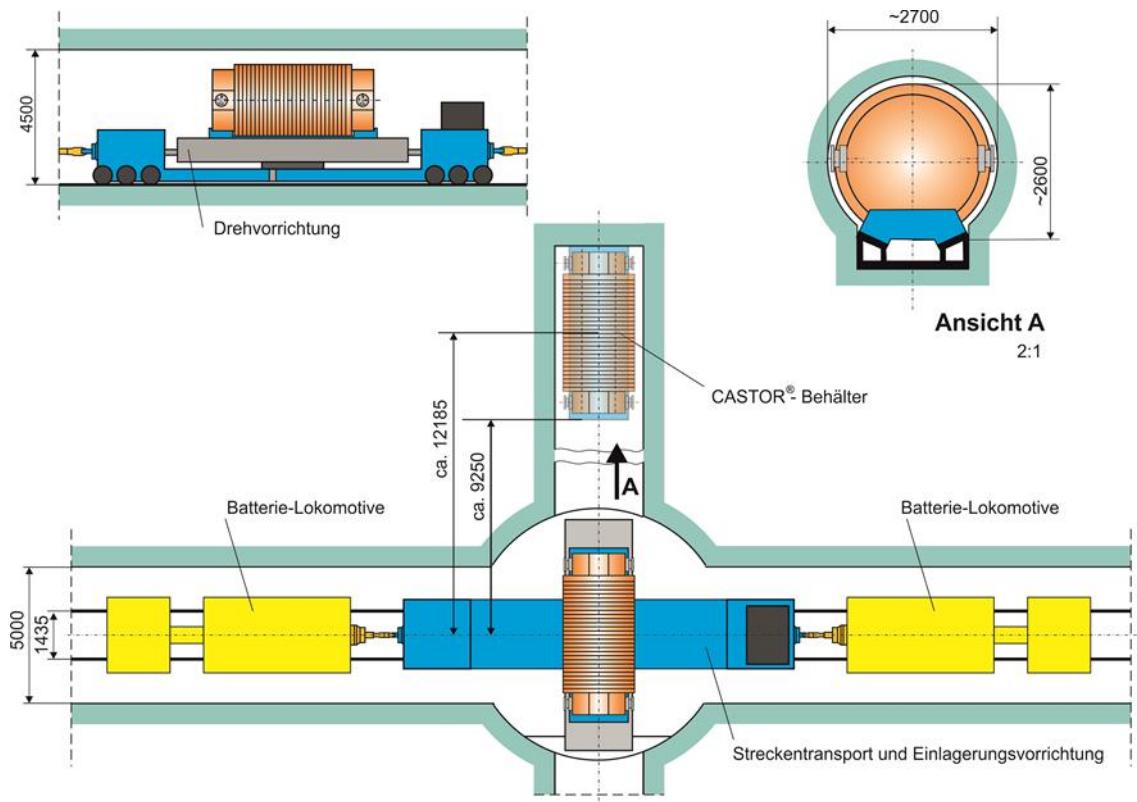


Abbildung 13: Skizze der Abläufe am horizontalen Kurzbohrloch/Einlagerungsort (Filbert et al., 2014)

Streckentransport- und Einlagerungsvorrichtung (STEV)

Die STEV wurde zum Transport der TLB sowie zum Einschub der TLB in die Kurzbohrlöcher entwickelt. Der Transport der STEV erfolgt gleisgebunden als Zugverband mit zwei batteriebetriebenen Lokomotiven. Die bisherige Konstruktion ist in Abbildung 14 zu sehen.

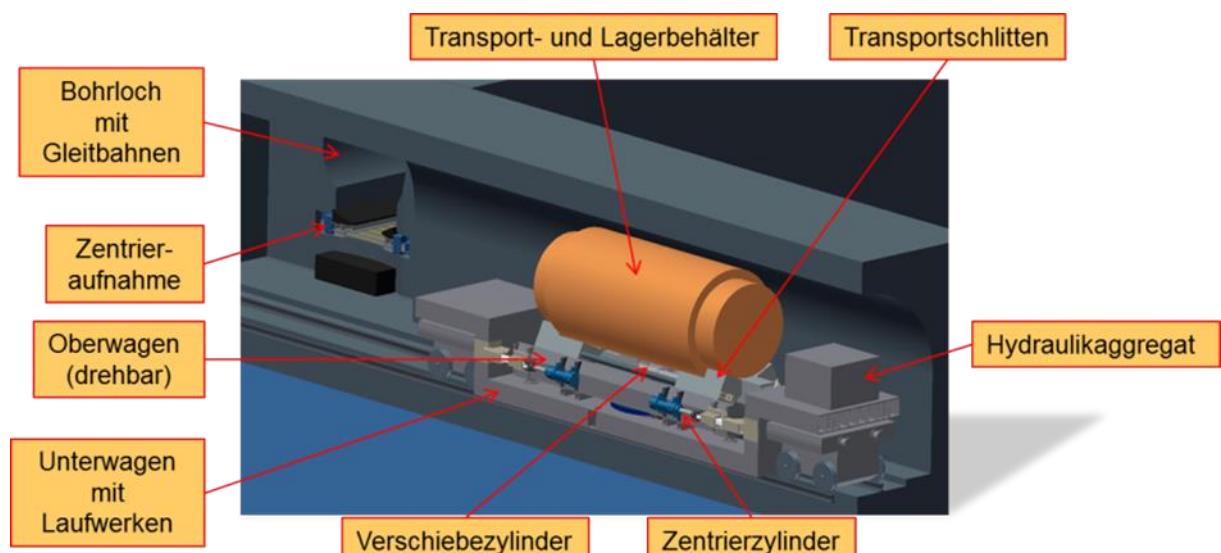


Abbildung 14: 3D Modell der STEV am Einlagerungsort, beladen mit TLB (Filbert et al., 2014)

Transportschlitten

Die Ablage der TLB auf der STEV erfolgt auf verlorenen Schlitten. Diese werden bei der Einlagerung mit in das Bohrloch geschoben und verbleiben dort. Der Schlitten besteht aus vier äußeren Gleitsteinen die über Verbindungsstäbe miteinander verbunden sind. Unterhalb befindet sich eine Rahmenkonstruktion, an dieser sind die Koppelpunkte für die Klaue des hydraulischen Hauptzylinders der STEV befestigt. Der Schlitten wird auf den Gleitsteinen in das Einlagerungsbohrloch geschoben. Als Gegenstück zum Schlitten befinden sich innerhalb des Einlagerungsbohrloches Führungsbahnen. Schlitten und Führungsbahnen sind an die Geometrie von TLB und Einlagerungsbohrloch angepasst. Schlitten, Oberwagen der STEV und die Führungsbahnen sind so ausgeführt, dass der Schlitten auf beiden selbstzentrierend positioniert werden kann. Die Geometrie des Schlittens ist an die äußere Kontur des jeweiligen TLB angepasst. Der mittlere Teil des TLB mit den Kühlrippen kann in den Schlitten eintauchen. Durch das Eintauchen wird der TLB in Längsrichtung und durch die seitliche Begrenzung der Auflagefläche in Querrichtung geometrisch auf dem Schlitten gefangen. Der Schlitten wird an den Gleitsteinen mit einer Beschichtung mit geringer Reibung versehen, um die notwendigen Schubkräfte zu begrenzen.

Unterwagen mit Laufwerken

Die STEV ist mit zwei Drehgestellen ausgerüstet. Diese sind mit jeweils 2 Achsen ausgestattet und dienen zum Verfahren der STEV auf den Schienen. Zur Verringerung der in den Gleisbau eingetragenen Lasten werden 3 oder 4 Achsen je Drehgestell empfohlen. Die STEV ist antriebslos und ungebremst ausgeführt. Antreiben und Bremsen erfolgt über die Lokomotiven. An der STEV ist nur eine Feststellbremse zum Abstellen in abgekuppeltem Zustand vorhanden. Auch eine Notbremse ist als Anhängerfahrzeug an Lokomotiven nicht erforderlich. Die Verbindung der Drehgestelle und des Unterwagens der STEV erfolgt über ein Kugelgelenk. Zur Federung ist eine Luftfederung vorgesehen. Für den Einschubvorgang wird die Luftfederung entlüftet. Dadurch entsteht eine definierte Lage des STEV-Unterteils gegenüber den Drehgestellen. Die vertikale Lage der STEV ist somit fest definiert. Die für den Eisenbahnbetrieb notwendigen Puffer und Kupplungseinrichtungen sind ebenfalls an den Drehgestellen befestigt. Die Ausführung des Tragwerks erfolgt als geschweißte Stahlbaukonstruktion.

Oberwagen

Zur Positionierung der TLB in den Einlagerungsbohrlöchern ist die STEV mit einem drehbaren Oberwagen ausgestattet. Die Verbindung von Ober- und Unterwagen erfolgt über eine Kugeldrehverbindung. Die Drehung des Oberwagens wird über einen Motor ermöglicht, welcher über einen Schneckentrieb in eine Verzahnung an der Kugeldrehverbindung eingreift. Damit der Oberwagen ausreichend genau positioniert werden kann und seine Position relativ zum Oberwagen gesichert ist, erfolgt der Antrieb durch den selbsthemmenden Schneckentrieb. Die Zentrierung der STEV vor den Einlagerungsbohrlöchern erfolgt zusätzlich über Zentrierkeile. Diese werden durch die hydraulisch betätigten Zentrierzylinder in entsprechende Zentrieraufnahmen an der Bohrlochkontur eingefahren. Dadurch wird die Mittenlängsachse des STEV Oberwagens fluchtend mit der Mittenlängsachse der in der Bohrung eingebrachten Führungsbahn ausgerichtet. Zusätzlich dienen die Zentrierkeile auch zur Abstützung der STEV während des Einschubvorganges indem diese in die Zentrieraufnahmen gepresst werden (Abbildung 15). Während der Fahrt werden die Zentrierkeile in Aufnahmen eingefahren und der Oberwagen so zusätzlich gegen Verdrehung gesichert.

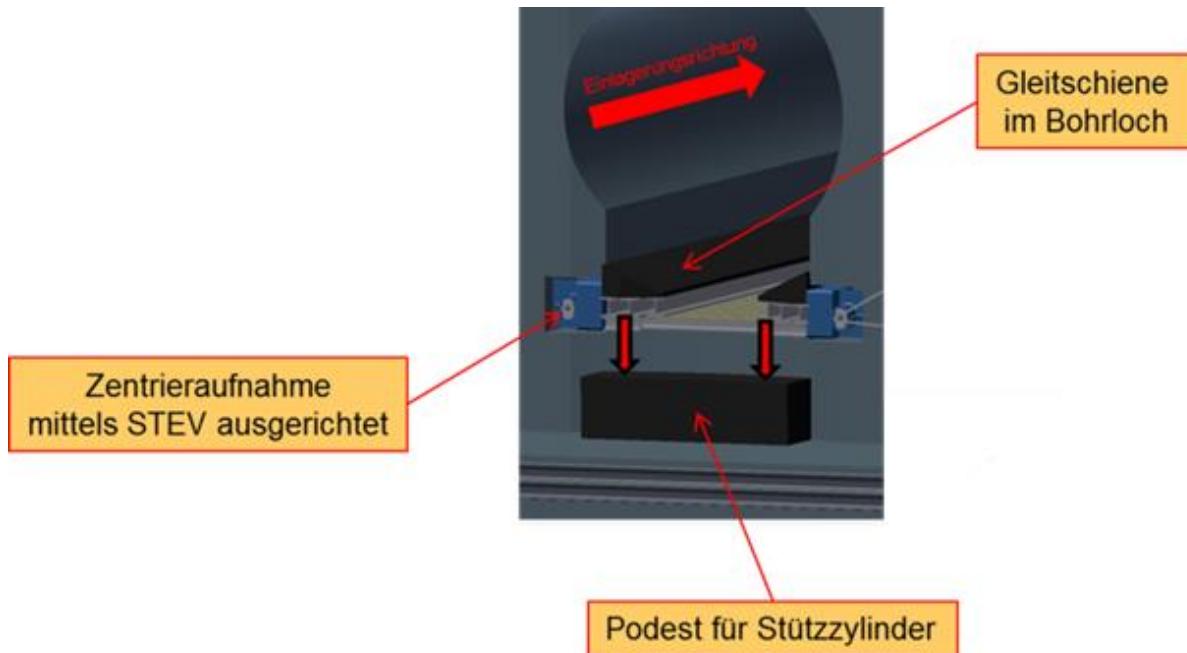


Abbildung 15: Detaildarstellung der Bohrlochöffnung mit den Zentrieraufnahmen (Filbert et al., 2014)

Zur vertikalen Ausrichtung des Oberwagens verfügt dieser zusätzlich über Stützen, welche sich auf Podesten in der Strecke abstützen. Es sind jeweils 2 Stützen an den beiden Enden des Oberwagens montiert. Zusätzlich dienen die Stützen zur Abstützung der STEV, sodass bei Gewichtsverlagerung während des Einschubvorganges ein Abheben der Räder von den Schienen verhindert werden kann. Der Oberwagen selbst besteht aus zwei Längsholmen die mehrfach miteinander verbunden sind. Auf den Längsholmen befindet sich die selbstzentrierende Führung für den Schlitten. Mittig zwischen den Längsholmen ist der für den Einschubvorgang verwendete Hydraulikzylinder montiert.

Schubvorrichtung

Das Einschieben des mit dem TLB beladenen verlorenen Schlittens erfolgt über einen Hydraulikzylinder. Dieser ist mittig auf dem Oberwagen unterhalb des Schlittens montiert. Dieser als Hauptzylinder oder Verschiebezylinder bezeichnete doppeltwirkende Hydraulikzylinder ist einstufig und in Standardausführung vorgesehen. Am Ende der Kolbenstange ist ein Greifer befestigt, welcher mit dem Schlitten gekoppelt wird (Abbildung 16). Um den Greifer am Schlitten ein und auskoppeln zu können, ist der Hauptzylinder beweglich befestigt und kann über einen weiteren Justierzylinder in seiner Neigung verstellt werden. Der Justierzylinder dient zudem dazu, den Hauptzylinder während der unbeladenen Fahrt waagerecht zu halten. Nach dem Beladen der STEV dient der Hauptzylinder zunächst zur Sicherung des beladenen Schlittens auf der STEV. Dazu wird der Schlitten gegen einen Anschlag gespannt. Durch einen Druckspeicher wird sichergestellt, dass der zum Spannen notwendige Druck erhalten bleibt.

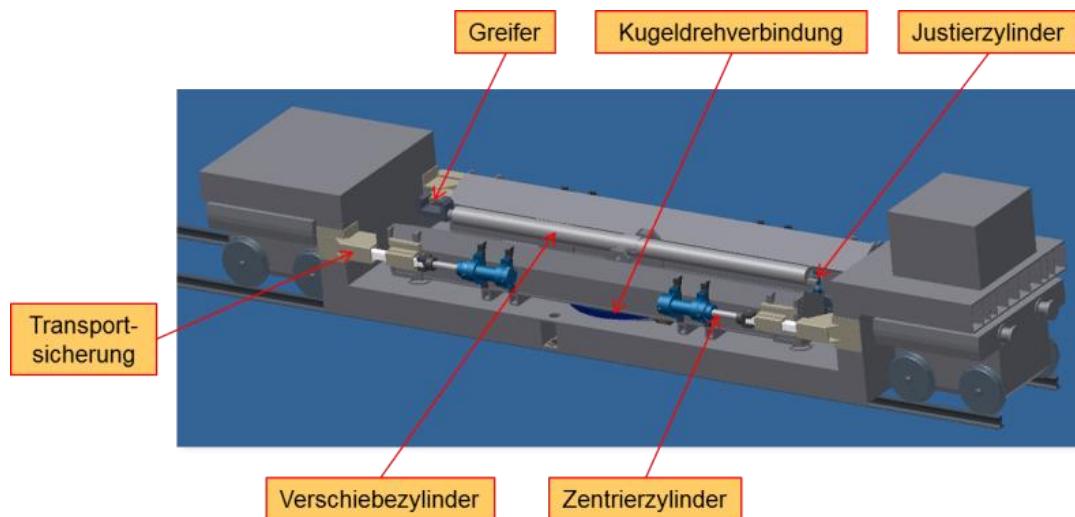


Abbildung 16: 3D Modell der Schubvorrichtung der STEV (Filbert et al., 2014)

Der Hauptzylinder wird mit einer Länge von ca. 6 m ausgeführt. Für einen Einlagerungsvorgang ist allerdings ein Hubweg von ca. 14 m erforderlich. Daher sind Umgreifvorgänge erforderlich. Für den Beginn des Einschubes wird der Hauptzylinder mit dem Greifer an einem Koppelpunkt an der Front des Schlittens befestigt und ein Hub über die volle Zylinderlänge ausgeführt. Anschließend wird der Greifer über den Justierzylinder ausgekoppelt und bis zum Anschlagpunkt für den zweiten Hub zurückgezogen. Hier wird neu gekoppelt und der zweite Hub ausgeführt. Anschließend wird entkuppelt, der Zylinder wieder eingefahren, am Ende des Schlittens mit dem letzten Anschlagpunkt gekoppelt und der verbleibende Hubweg ausgeführt. Die Steuerung des Hauptzylinders ist daher geschwindigkeitsgeregelt und langsam. Durch einen Druckanstieg im Hydrauliksystem kann das Einkoppeln registriert werden. Der Druck wird nun auf das Niveau gesteigert, das notwendig ist um den Schlitten mit dem TLB zu verschieben.

Hydrauliksystem

Das notwendige Hydraulikaggregat ist am Ende der STEV oberhalb eines Drehgestells montiert. Es besteht aus Pumpenstand und Hydrauliktank mit ca. 1.500 l Volumen. Die Energieversorgung des Oberwagens wird durch eine Drehdurchführung sichergestellt. Über eine Rohrleitung sind die mittig an den Längsholmen montierten Ventilstände angeschlossen. Als Hydraulikflüssigkeit wird ein schwer entflammbarer, wasserbasiertes Fluid vom Typ HFC (Hydraulic Fluid C) verwendet. Die Energieversorgung des Aggregats erfolgt über die batteriebetriebenen Lokomotiven.

Elektrische Steuerung

Die Bedienung der STEV erfolgt vom Führerstand der Lokomotiven aus. Hierzu ist eine Kabel- oder Funkfernbedienung vorgesehen. Als Steuer- und Regelungselement wird eine speicherprogrammierbare Steuerung vorgesehen, diese ist oberhalb eines Drehgestells positioniert und koordiniert die Bewegungsabläufe. Die elektrische Versorgung der STEV erfolgt ebenfalls über die Lokomotiven.

2.5 Bestehende Rückholungskonzepte

§ 13 EndlSiAnfV fordert, dass eingelagerte Abfallgebinde bis zum Beginn der Stilllegung des Endlagers zurückgeholt werden können. Zur Errichtung des Endlagers gehört gemäß § 15 EndlSiAnfV die Erprobung aller technischen Einrichtungen, die für eine mögliche Rückholung von eingelagerten Abfallgebinden erforderlich sind. Im Vorhaben TREND wird nicht explizit Rückholungstechnik entwickelt. Bei der Entwicklung der Transport- und Einlagerungstechnik ist jedoch eine Prüfung und u.U. auch eine Anpassung des Einlagerungskonzepts vorzunehmen. Für diese Änderungen ist zu berücksichtigen, dass eine Rückholung der eingelagerten Abfallgebinde weiterhin möglich sein muss. Aus diesem Grund sind Grundkenntnisse der bestehenden Rückholungskonzepte für dieses Vorhaben notwendig.

Die technische Gestaltung der Rückholung von Abfallgebinden aus Endlagern im Steinsalz und Tongestein wurde von Herold et al. (2018) untersucht. Vergleichbare Arbeiten zum Kristallinestein sind in Herold et al. (2020) zu finden. Die nachfolgenden Ausführungen fassen die Ergebnisse beider Vorhaben zusammen. In Abbildung 17 erfolgt die Zuordnung der Rückholung und Bergung zu den typischen Entwicklungsstufen eines Endlager. Bergung umfasst die Entnahme der Abfallgebinde aus dem bereits verschlossenen Endlager und ist nach § 14 EndlSiAnfV auf 500 Jahre nach dem Verschluss begrenzt. In der weiteren zukünftigen Entwicklung eines Endlagers sind Rückholung und Bergung nicht zu betrachten.

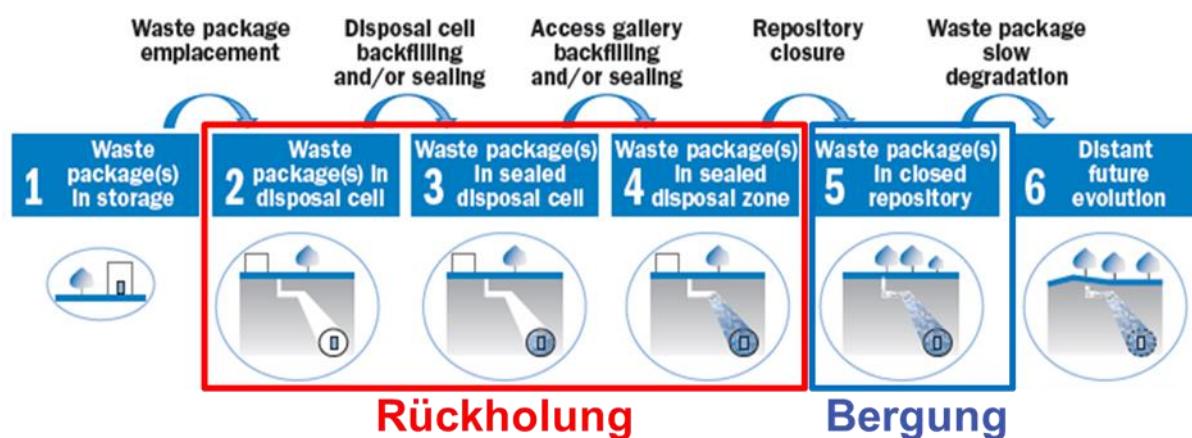


Abbildung 17: Typische Entwicklungsstufen eines Endlagers und Zuordnung der Rückholung und Bergung, nach (NEA, 2011)

Die Betriebsphase eines Endlagers für hochradioaktive Abfälle wird in Deutschland auf mehrere Jahrzehnte geschätzt. In den in den vorigen Kapiteln beschriebenen deutschen Endlagerkonzepten finden die Entwicklungsstufen von Einlagerung, Versatz und Verschluss entsprechend dem Einlagerungsfortschritt parallel statt. Die Abfallgebinde werden zügig nach der Einlagerung versetzt. Die passive Sicherheit des Endlagers wird schrittweise erhöht. Die Abfallgebinde befinden sich damit nicht mehr in der aktiven Kontrolle durch den Endlagerbetreiber. Die Anforderung nach Rückholbarkeit bedeutet, dass die Entnahme der Abfallgebinde aus dem Gebirgsverbund möglich ist. Mit der Rückholung werden Abfallgebinde aus dem passiven Sicherheitssystem des Endlagers entnommen und zurück in die menschliche Obhut überführt.

Aus den vorgenannten Anforderungen an die Rückholbarkeit kann ein als „Re-Mining“-Strategie bezeichnetes Vorgehen als geeigneter Lösungsansatz für die technische Umsetzung der Rückholung beschrieben werden. Wird während der laufenden Betriebszeit die Entscheidung zur Rückholung getroffen, erfolgt die Wiederauffahrung der bereits verfüllten Grubenteile und damit die Schaffung eines neuen Zugangs zu den Abfallgebinde. Diese werden in geeigneter Weise freigelegt und mit entsprechender Technik aufgenommen. Der Transport in den Strecken und nach über Tage kann mit bestehenden Systemen erfolgen. Die Rückholungstätigkeit als „*der aktive Vorgang der Entnahme von Abfallgebinde aus dem Endlager*“ (NEA, 2011) endet nach dem Transport nach über Tage.

Die bevorzugte Re-Mining-Strategie bedingt für die Rückholung der Abfallgebinde bei der Bohrloch- und Streckenlagerung eine Neuauffahrung aller benötigten Strecken. Für alle Einlagerungskonzepte bildet die späteste mögliche Rückholung das abdeckende Referenzszenario. In den untersuchten Szenarien sind deshalb alle Strecken des Grubengebäudes bereits vollständig versetzt und durch Streckenverschlüsse verschlossen. Grundsätzlich ist es sinnvoll, bei der Rückholung das vorhandene Grubengebäude wiederzuverwenden anstatt neue Grubenräume aufzufahren. Dies schließt eine Nutzung von vorhandenem Streckenausbau mit ein. Eine zusätzliche Durchörterung des Einlagerungshorizonts wird insbesondere bei der zwangsläufigen Annäherung an das alte Grubengebäude als gebirgsmechanisch nachteilig angesehen und ist deshalb nach Möglichkeit zu vermeiden.

2.5.1 Rückholung beim Konzept der horizontalen Streckenlagerung in Steinsalz

Im Falle einer Entscheidung zur Rückholung müssen die Abfallgebinde durch bergbauliche Tätigkeiten wieder freigelegt und unter Einhaltung betrieblicher und strahlenschutztechnischer Belange aus dem Endlager entfernt werden. Dies umfasst die vollständige Wiederauffahrung des bereits verfüllten Grubengebäudes bzw. aller benötigten Strecken. Die Rückholung der Abfallgebinde erfolgt in umgekehrter Reihenfolge ihrer Einlagerung.

Die Errichtung der eigentlichen Rückholungsstrecken und die Entnahme der Abfallgebinde erfolgen in mehreren Teilschritten. Zunächst wird eine Teilstrecke parallel zu den eingelagerten Abfallgebinde aufgefahren. Die Teilstrecke besitzt nur einen kleinen, für die Vortriebstechnik notwendigen Querschnitt von rund 13 m². Die Teilstrecke ist so angeordnet, dass zwischen Streckenkontur und den eingelagerten POLLUX®-Behältern ein Sicherheitsabstand von ca. 0,5 m verbleibt. Mit dem gewährten Sicherheitsabstand soll ein versehentliches Anschneiden der Abfallgebinde während der Auffahrung vermieden werden. Im zweiten Schritt erfolgt auf der gegenüberliegenden Behälterseite die Auffahrung einer zweiten parallelen Teilstrecke. Die Auffahrung entspricht einer Spiegelung der ersten Teilstrecke in der Behälterlängsachse. Beide Teilstrecken sollen durchschlägig zu den angrenzenden Querschlägen aufgefahren werden. Damit wird die Kühlung- und Bewetterung der Teilstrecken nach deren Errichtung erleichtert. Das Sohlenniveau beider Teilstrecken liegt planmäßig etwas mehr als einen halben Meter unterhalb der Behälteraufflagefläche. In der endgültigen Rückholungsstrecke liegt das Abfallgebinde somit auf einem Salzgesteinssockel in leicht erhöhter Position. Dies erleichtert die Aufnahme der Abfallgebinde durch eine modifizierte Einlagerungsvorrichtung (mELViS).

Durch die Entnahme des verbleibenden Salzes und Salzgruses neben und über dem Abfallgebinde zwischen beiden Teilstrecken entsteht die endgültige Kontur der Rückholungsstrecke.

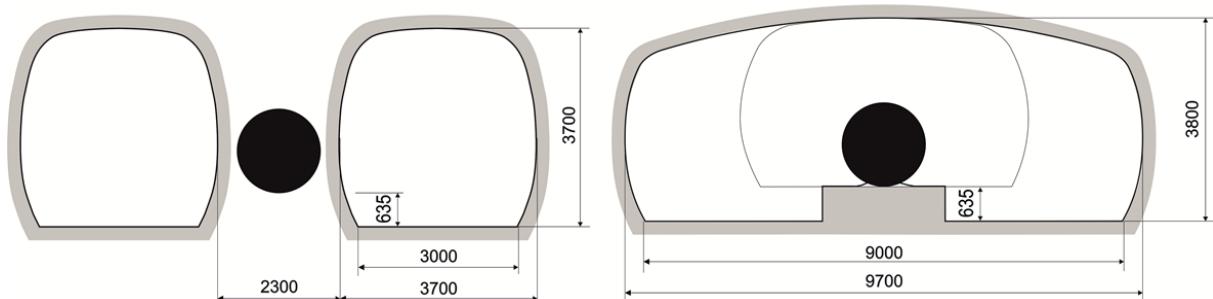


Abbildung 18: links: Querschnitte der beiden neu aufgefahrenen Teilstrecken; rechts: Endgültiges Profil der Rückholungsstrecke und Querschnitt der ursprünglichen Einlagerungsstrecke (Herold et al., 2018)

Die modifizierte Einlagerungsvorrichtung in Strecken (mELViS) basiert auf dem existierenden und bereits erprobten Prototyp der Einlagerungsvorrichtung in Strecken. Die Hauptkomponenten der mELViS sind:

- der starre Grundrahmen mit vier Stempeln als Hubeinrichtung
- eine Rahmenkonstruktion zum Aufnehmen, Halten und Tragen von Abfallgebinden ohne das Nutzen der Tragzapfen mit Lasten von bis zu 65 t sowie deren Übergabe auf einen Transportwagen
- ein Steuerstand
- ein Raupenfahrwerk

Die mELViS ist kompakt gebaut, um untertage Streckenquerschnitte effektiv nutzen zu können. Sie ist über kurze Distanzen selbstfahrend ohne Gleise zu benötigen und kann so den Transport der Abfallgebinde bis zum Übergabepunkt auf den Transportwagen realisieren. Abbildung 19 zeigt das 3D Modell der mELViS.

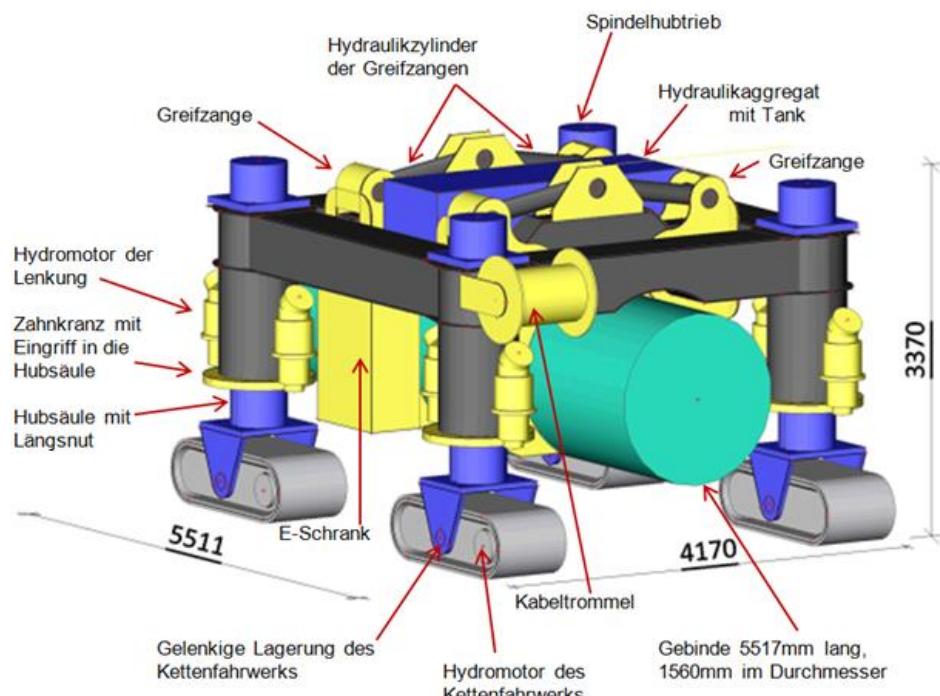


Abbildung 19: 3D Modell der modifizierten Einlagerungsvorrichtung in Strecken (mELViS) (Herold et al., 2018)

2.5.2 Rückholung beim Konzept der horizontalen Streckenlagerung im Ton- und Kristallingestein

Gemäß dem weiter vorn beschriebenen Referenzszenario beginnt die Rückholung nach der Einlagerung aller Abfallgebinde und dem Versatz bzw. der Verfüllung der Strecken. In Anlehnung an die drei Hauptprozesse des Einlagerungsbetriebes, Einlagerung, Versatz und Verfüllung, wird der Rückholungsprozess in die drei wesentlichen Teilschritte Neuauffahrung, Freilegen der Abfallgebinde und Entnahme der Abfallgebinde unterteilt.

Die Neuauffahrung erfolgt entlang des alten Streckenverlaufs. Die erneute Auffahrung unterscheidet sich deutlich von den Tätigkeiten während des Einlagerungsbetriebes. Die Neuauffahrung hat zum Ziel, den Versatz aus dem Streckenquerschnitt zu entfernen und parallel dazu die Stabilität des Hohlraums wiederherzustellen. Neben den Gebirgseigenschaften sind auch die geomechanischen Eigenschaften des Versatzes und des Ausbaus zu beachten. Für die Aufwältigung der verfüllten Strecken erscheint der Einsatz von Tunnelbaggern zweckmäßiger als der von Teilschnittmaschinen. Parallel zur Neuauffahrung ist der Zustand des Ausbaus bzw. der Firste und Stöße zu prüfen. Bei Bedarf sind diese instand zu setzen bzw. zu ertüchtigen. Dabei sind die Bedingungen in einem Kontrollbereich zu berücksichtigen und entsprechende Vorsichtsmaßnahmen zu ergreifen. Um im voraussichtlich wenig stabilen Tongestein möglichst breite Restpfeiler bzw. einen kleinen Querschnitt der Rückholungsstrecke zu ermöglichen, wird die Rückholungsstrecke ungefähr im Querschnitt der Einlagerungsstrecke aufgefahren. Der endgültige Rückholungsquerschnitt wird von der Vorrichtung zur Handhabung der Abfallgebinde definiert. Die Neuauffahrung umfasst damit die Entnahme des Versatzes in den Einlagerungsstrecken (Buffer). Dafür kann z. B. ein kleiner ferngesteuerter Tunnelbagger zum

Einsatz kommen (Schritte 1 bis 3 in Abbildung 20). Nach vollständiger Freilegung liegt das Abfallgebinde frei auf seinem Sockel. Die Aufnahme des Abfallgebinde erfolgt dann mit einer modifizierten Einlagerungsvorrichtung (mELViS).

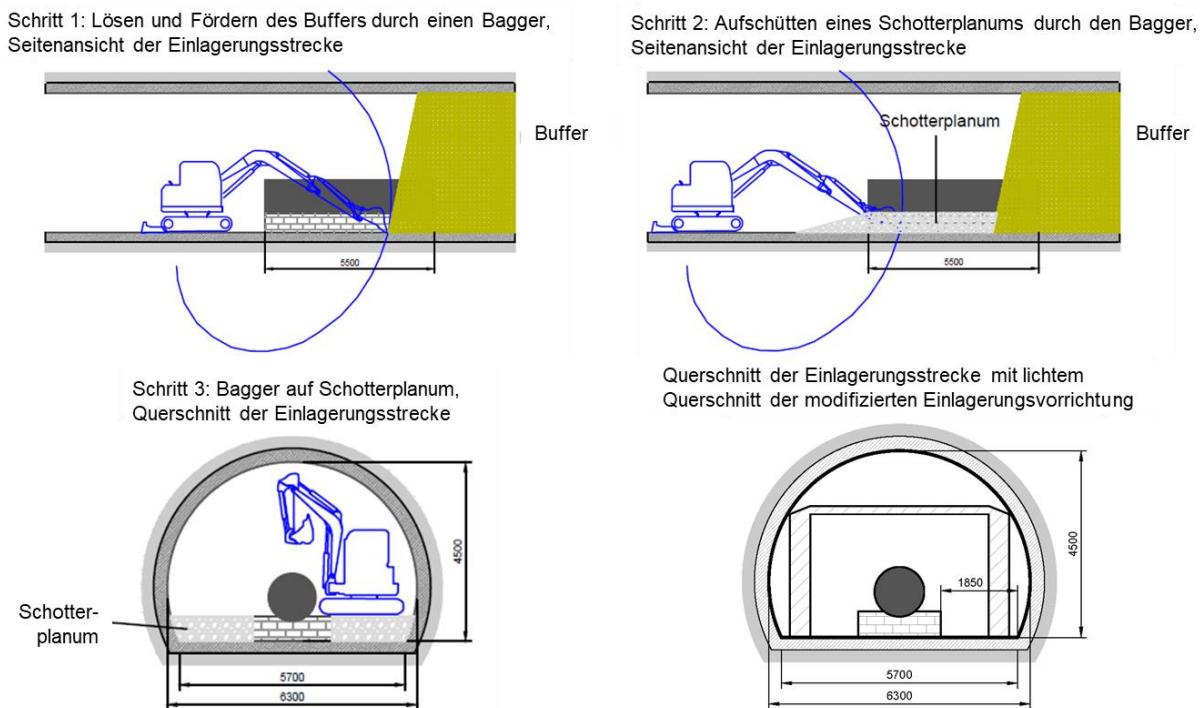


Abbildung 20: Schema der Freilegung von Abfallgebinde in der Einlagerungsstrecke (Herold et al., 2018)

2.5.3 Rückholung beim Konzept der vertikalen Bohrlochlagerung in Steinsalz

Im Falle der Entscheidung zur Rückholung müssen die Abfallgebinde durch bergbauliche Tätigkeiten wieder freigelegt und unter Einhaltung betrieblicher und strahlenschutztechnischer Belange aus dem Endlager entfernt werden. Konkret umfasst dies die vollständige Neuauffahrung des bereits verfüllten Grubengebäudes bzw. aller benötigten Strecken. Im Gegensatz zur Streckenlagerung werden bei der Neuauffahrung des Grubengebäudes zunächst keine Abfallgebinde angetroffen. Die Rückholung der Abfallgebinde aus den verschlossenen vertikalen Bohrlöchern erfolgt in umgekehrter Reihenfolge zur Einlagerung.

Vor der Entnahme der Abfallgebinde aus dem Bohrloch sind mehrere Teilschritte umzusetzen. Zu diesen Teilschritten gehört der Nachschnitt des Firstbereiches. Dieser dient der Aufweitung des Querschnittes am Bohrloch. Ein anderer Teilschritt ist die Erkundung der exakten Lage der Verrohrung und die Kontaminationsprüfung. Der Bohrlochkeller wurde nach der Einlagerung mit Salzbeton verfüllt. Der verfüllte Bohrlochkeller ist damit bereits während der Auffahrung leicht vom gewachsenen Gebirge bzw. der versetzten Strecke zu unterscheiden. Die exakte Lage der Verrohrung kann durch zerstörungsfreie geophysikalische Messverfahren aus der Rückholungsstrecke heraus bestimmt werden. Die Erkundung der Tiefenlage unter Sohlebene kann mit Radarmessungen in einem Radarprofil erfolgen. Ist die horizontale Lage

der Abdeckplatten nicht bekannt, sind zwei bis drei Radarprofile zur Bestimmung der dreidimensionalen Lage notwendig. Ein entsprechender Test vor Beginn der eigentlichen Messungen kann über die Notwendigkeit von zwei oder drei Radarprofilen Aufschluss geben.

Nach dem Detektieren des Bohrloches wird der Salzbeton des Bohrlochkellers und der Metalldeckel der Verrohrung auf Kontamination überprüft, um in einem ersten Schritt festzustellen, ob es innerhalb des Bohrloches eine BSK undicht geworden ist und radioaktive Nuklide freigesetzt wurden. Im Anschluss an alle Erkundungsarbeiten erfolgt die Herrichtung des neuen Bohrlochkellers. Auf die freigelegte Bohrlochverrohrung wird die Bohrlochschleuse aufgesetzt. Anschließend wird die Gleisanlage für die Einlagerungsvorrichtung (ELV), die auch bei der Rückholung zum Einsatz kommt, und für den Plateauwagen errichtet.

Die Entnahme des Bohrlochversatzes im Rahmen der Rückholung erfolgt mit Hilfe einer Saugvorrichtung. Die Saugvorrichtung wird liegend in einem eigenen Transferbehälter zum Einsatzort befördert. Das Einsetzen der Saugvorrichtung in das Bohrloch entspricht im Prinzip dem Einlagerungsvorgang der Kokillen. Greifer und Saugvorrichtung werden über das Förderseil der ELV zum Einsatzort im Bohrloch herabgelassen. Während des Saugvorganges ist das Bohrlochinnere stets von der Umgebung abgeschirmt. Das Bohrloch und der auf der Bohrlochschleuse stehende Transferbehälter bilden dabei ein geschlossenes System. Das verfügbare Luftvolumen ist auf das Volumen in diesem geschlossenen System begrenzt. Während des Saugens muss die Saugvorrichtung die 1 m mächtige Verfüllung zwischen zwei BSK entfernen und den Kopfbereich der unteren BSK soweit freilegen, dass ein Greifen und anschließendes Ziehen der Kokille möglich ist. Ist der in die Saugvorrichtung integrierte Speicherraum mit Sand gefüllt, wird die Saugvorrichtung wieder aus dem Bohrloch entfernt. Das Herausziehen und Ablegen der Saugvorrichtung entspricht, wie auch die Entnahme eines Abfallgebinde, einer Umkehrung des Einlagerungsvorgangs. Das Entleeren der Saugvorrichtung erfolgt abseits des Rückholungsbetriebs in einem gesonderten Bereich. Dafür können im Infrastrukturbereich oder auch über Tage Räume vorgesehen werden. Denkbar ist auch der direkte Versatz des Sandes in bereits geräumte Bohrlöcher. Aufgrund der sehr beengten Platzverhältnisse und als Ergebnis erster Saugversuche ist eine zweistufige Axialturbine mit zwei Radiallaufrädern und einem feststehenden Leitradsystem zwischen den beiden Laufrädern vorgesehen. Der Lüfter muss zum einen eine hinreichend hohe Strömungsgeschwindigkeit zur Mitnahme der Partikel erzeugen und zum anderen den Druckverlust innerhalb der Saugvorrichtung überwinden. Die Entnahme des Sandes kann in mehreren Arbeitsschritten erfolgen. Der Zyklus aus Versatz und Abfallgebindeentnahme wird so oft wiederholt, bis die letzte BSK aus einem Bohrloch rückgeholt ist.

2.5.4 Rückholung im Konzept der vertikalen Bohrlochlagerung im Tongestein und im Konzept „multipler ewG“ (Kristallingestein)

Für die Rückholung der eingelagerten Abfallgebinde ist die Neuauffahrung aller bereits verfüllten Zugangsstrecken notwendig. Das Grubengebäude des Einlagerungsbetriebes soll auch während des Rückholungsbetriebes wieder genutzt werden. Dabei ist insbesondere im Ton-

gestein die Tragfähigkeit des Ausbausystems zu prüfen und ggf. wieder herzustellen (s. Kapitel 2.5.2). Für die Rückholung der Abfallgebinde aus dem Bohrloch selbst sind die gleichen Prozesse vorgesehen wie in Kapitel 2.5.3 beschrieben.

2.5.5 Rückholung im Endlagerkonzept mit einschlusswirksamen Barrieren im Kristallingestein

Bertrams et al. (2017) entwickelte für das Endlagersystem mit einschlusswirksamen technischen Barrieren das „modifizierte KBS-3 Konzept“, aufbauend auf den skandinavischen Endlagerkonzepten (KBS-3). Das Einlagerungskonzept basiert auf der vertikalen Bohrlochlage rung. Wesentliche Unterschiede zu den zuvor beschriebenen Konzepten sind im Aufbau des Bohrloches zu finden. Da Buffer und Behälter die wesentlichen Barrieren darstellen, wird auf einen zusätzlichen Stahlinner und eine Sandverfüllung verzichtet. Für das Freilegen des Behälters im Zuge einer Rückholung muss damit ein anderes Verfahren genutzt werden.

Die als Vorbild dienenden Einlagerungs- bzw. Rückholungskonzepte aus Schweden bzw. Finnland sehen für eine Rückholung der Behälter aus einem bereits mit einem Bentonitbuffer besetzten Bohrloch das Freispülen der Behälter vor. Das Grundkonzept des Freispülens basiert auf einer Kombination aus hydraulischem, druckbasiertem Lösen des Bentonits und der Herabsetzung der Kohäsion im Bentonit mit Hilfe einer geeigneten (salinaren) Lösung. Aus den vorkompaktierten Bentonitformsteinen wird durch die Einwirkung der Lösung eine pumpbare Suspension erzeugt. Eine direkte Übertragung dieser internationalen Rückholungskonzepte auf das deutsche modifizierte KBS-3 Konzept ist durch die Wahl des Bentonits eingeschränkt. Ein hydrodynamisches Verfahren mit niedrigen Drücken und salinaren Lösungen ist für die vorgesehenen Ca-Bentonite des Buffers weniger effektiv anwendbar. Weiterhin scheint durch den sehr zeitaufwändigen Spülvorgang § 13 (2) EndlSiAnfV nicht erfüllt: „*Die Rückholung ist so zu planen, dass der dafür voraussichtlich erforderliche technische und zeitliche Aufwand den der Einlagerung nicht unverhältnismäßig übersteigt.*“

Für das Freilegen des Behälters werden deshalb mechanische Verfahren favorisiert. Konzeptionelle Ansätze sind zum einen das Bohren mit Hohlschnecken und ein schneidend/fräsender Rückbau des Buffers, kombiniert mit einer pneumatischen Förderung des Haufwerks (Saugbagger). Die Anwendbarkeit der Verfahren hängt stark von den Bedingungen vor Ort bzw. den Eigenschaften des Buffers (z. B. tatsächliche Sättigung und Konsistenz des Buffers) ab.

Die Prozessschritte zur Neuauffahrung und auch der Entnahme der Behälter entsprechen weiterhin einer Umkehrung des Einlagerungsvorganges und sind grundsätzlich gleich zu den zuvor beschriebenen Konzepten. Zu beachten ist, dass die Arbeiten zur Freilegung des Abfallgebindes in einem Kontrollbereich stattfinden. Der Buffer ist vor und während seinem Entfernen auf Kontamination zu prüfen.

3 Technik der Streckenlagerung

3.1 Anforderungen

Die Beschreibung der Anforderungen an die Transport- und Einlagerungstechnik der Einlagerungsvariante Streckenlagerung beginnt mit der Erläuterung der erforderlichen Funktionen für die Umsetzung der Transport- und Einlagerungsvorgänge. Darauf folgend werden Anforderungen ausgeführt, die sich aus den Randbedingungen des Endlagerbetriebs, den ermittelten Funktionen und weiteren technischen Sachverhalten ergeben.

Da in diesem Vorhaben überwiegend Weiter- und keine Neuentwicklungen angestrebt werden, wird in den Anforderungen an die Transport- und Einlagerungstechnik zur Streckenlagerung der konzeptionelle Aufbau der Einlagerungsvorrichtung in Strecken (ELViS) aus Engelmann et al. (1995) in den folgenden Beschreibungen berücksichtigt.

Vorgehensweisen, die sich aus Vorschriften und Normen ergeben, werden im Text an den passenden Stellen aufgeführt. Die im Maschinenbau einschlägigen Normen, insbesondere mit Bezug zur Maschinensicherheit, werden berücksichtigt, z. B. das Produktsicherheitsgesetz (ProdSG) oder DIN EN ISO 12100. Von besonderer Wichtigkeit sind die Regeln des kerntechnischen Ausschusses (KTA).

3.1.1 Allgemeine Funktionsbeschreibung

Für die Umsetzung der Einlagerung in horizontalen Strecken wird das Abfallgebinde auf eine Transportvorrichtung gelegt und damit zur Einlagerungstrecke befördert. Die Beladung der Transportvorrichtung kann über oder unter Tage erfolgen. Am Einlagerungsort übergibt die Transportvorrichtung das Abfallgebinde an die Einlagerungsvorrichtung.

Im Falle der Einlagerungsvorrichtung ELViS hält der Transportwagen direkt unter dem Portal der ELViS, die am Einlagerungsort bereitsteht. Das Abfallgebinde wird gegriffen und von dem Transportwagen gehoben. Die Hubbewegung geht von den vier Hubwerken in den Stützen aus, die elektrisch über Gewindespindeln angetrieben sind. Ist die Übergabe erfolgt, verlässt der Plateauwagen den Einlagerungsort, damit die ELViS das Abfallgebinde ablegen kann. Findet eine Ablage auf der Sohle statt, kann dies direkt erfolgen. Wird das Abfallgebinde jedoch auf bspw. einem Sockel abgelegt, ist das Portal zusammen mit dem Behälter vor der Ablage über dem Sockel zu positionieren. In diesem Fall muss das Portal mit angehobenem Behälter wenigstens über einige Meter verfahrbar sein. Nach der Ablage wird der Behälter abgesenkt und aus dem Griff der Einlagerungsvorrichtung gelöst. Ist sichergestellt, dass das Abfallgebinde selbstständig und korrekt ausgerichtet liegt, verlässt die Einlagerungsvorrichtung die Strecke, um eine Verfüllung des Streckenabschnittes vorzunehmen. Die ELViS kann für längere Transportstrecken von dem Transportwagen aufgenommen und an den Einlagerungsort gebracht werden. Nach Ablage des Gebindes wird sie auf eigenen Rädern über die vorhandenen Gleise vom eingelagerten Abfallgebinde weggezogen und für den weiteren Transport auf dem Transportwagen abgelegt. Als Zugfahrzeug kommt eine batteriebetriebene Lokomotive zum Einsatz.

Für folgende Arbeitsvorgänge unter Tage wird die Transport- und Einlagerungstechnik in diesem Vorhaben weiterentwickelt:

- 1 Streckentransport des Behälters (gleis- oder flurgebunden)
- 2 Positionierung der Einlagerungsvorrichtung
- 3 Übergabe des Behälters von der Transportvorrichtung des Streckentransportes an die Einlagerungsvorrichtung
- 4 Positionieren und Ablegen des Behälters am Einlagerungsort
- 5 Räumen des Einlagerungsorts

3.1.2 Maße und Massen der Abfallgebinde

Bestehende Konzepte für Abfallbehälter wurden bereits in Kapitel 2.3 dargestellt. Für die Einlagerung in Strecken sind je nach Beladung der Abfallbehälter mit hochradioaktiven Abfällen entsprechend angepasste Behälter auszuwählen bzw. zu entwickeln. Die bekannte Konstruktion von POLLUX®-10 ist nach dem aktuellen Stand von Wissenschaft und Technik veraltet, da aufgrund längerer Zwischenlagerzeiten im Vergleich zu diesen Planungen Anforderungen an Abschirmung und Moderation des Behälters reduziert werden können. Zur Ermittlung von Behältermaßen und Behältermassen, die aus heutiger Sicht für dieendlagerung von hochradioaktiven Abfällen plausibel sind, wurden auf Basis des POLLUX® Systems Behälterauslegungsrechnungen unter Zugrundelegung aktueller Zwischenlagerzeiten für verschiedene Behälterbeladungen aus Brennstäben der Brennelemente aus Leistungsreaktoren durchgeführt. Die Auslegungsberechnungen wurden im Rahmen dieses Vorhabens als Unterauftrag durch die Wissenschaftlich-Technische Ingenieurberatung GmbH (WTI) durchgeführt und in Berichtsform dokumentiert (WTI, 2020). Der WTI Bericht ist diesem Abschlussbericht des Vorhabens TREND angehängt.

Behälter, die zur Einlagerung vorgesehen sind, müssen durch die Einlagerungstechnik abgefertigt werden können. Daher ist die Einlagerungstechnik für die Streckenlagerung anhand der möglichen Behälter auszulegen. Je nach Wirtsgestein, thermischer Auslegung und endzulagernden Abfällen können in der Streckenlagerung die Behälter zum Einsatz kommen, die in Tabelle 5 aufgeführt werden. Die diesen Daten zugrundeliegende Annahme diskreter Beladungen von Abfallbehältern basiert einerseits auf Praktikabilitätsgründen. Andererseits wird angenommen, dass die hier ermittelten Maße und Massen der Abfallgebinde als Eingangsgrößen in die Maschinenentwicklung oder Endlagerkonzeptplanung im Rahmen angewandter Grundlagenforschung ausreichend genau sind. Für eine Abfallbehälterbeladung mit Brennstäben aus z. B. 4,2 Brennelementen lässt sich mit ausreichender Genauigkeit das errechnete Behältermodell mit einer Beladung mit Brennstäben aus 4,5 Brennelementen verwenden. Das Behältermodell für den POLLUX®-10 wurde entsprechend heute absehbarer Zwischenlagerzeiten aktualisiert (Abbildung 21). Auf dieser Grundlage wurden die Behältermodelle für geringere Beladungen mit Brennstäben ausgelegt (Abbildung 22, Abbildung 23, Abbildung 24 und Abbildung 25). Für die Beladung mit 9 CSD-V wird wie in Bollingerfehr et al. (2011) angenommen, dass die Außenmaße und die Masse des Abfallgebinde denen des POLLUX®-10 entsprechen. Für die Beladung mit 3-CSD-V bestehen grundsätzlich zwei Lösungsvarianten: Die

CSD-V können entweder in einer Reihe hintereinander gelagert werden, was in einem verringerten Behälterdurchmesser, aber gleichbleibender Behälterlänge resultiert. Oder es werden wie bei der Beladung mit 9 CSD-V drei Behälter jeweils nebeneinander eingelagert, wodurch sich bei 3 CSD-V die Behälterlänge verringert, jedoch der Durchmesser wie beim Behälter für 9 CSD-V beschaffen ist (Abbildung 26). Da diese zweite Variante voraussichtlich eine deutlich geringere Masse aufweist, ist sie vorzuziehen. Sie eignet sich auch für 6 CSD-V. Der Behälterdurchmesser entspricht dann weiter dem des Behälters mit 9 CSD-V. Die Länge lässt sich entsprechend ermitteln.

Tabelle 5: Übersicht der Maße und Massen der berücksichtigten, beladenen Abfallbehälter (Bollingerfehr et al., 2011; WTI, 2020)

Behälter	Beladung	Max. Abfallgebindemasse (in Mg)	Außendurchmesser Behälter (ohne Tragzapfen) (in mm)	Länge (in mm)
POLLUX®-10	10 DWR-BE	59,6	1.460	5.517
POLLUX®-9-CSD-V	9 CSD-V	59,6	1.460	5.517
POLLUX®-8	8 DWR-BE	53	1.380	5.517
POLLUX®-6-BE	6 DWR-BE	47,5	1.300	5.517
POLLUX®-4,5	4,5 DWR-BE	41,4	1.208	5.517
POLLUX®-3	3 DWR-BE	34,7	1.100	5.517
POLLUX®-3-CSD-V Konzept A	3 CSD-V	ca. 41	ca. 1.210	5.517
POLLUX®-3-CSD-V Konzept B	3 CSD-V	ca. 27	1.460	ca. 2.470
POLLUX®-6-CSD-V	6 CSD-V	Ca. 44	1.460	ca. 4.000
CASTOR® THTR/AVR	2.100 THTR-BE od. 1.900 AVR-BE	26	1.338	2.784
CASTOR® KNK	Kernbrennstoffe	26	1.338	2.784

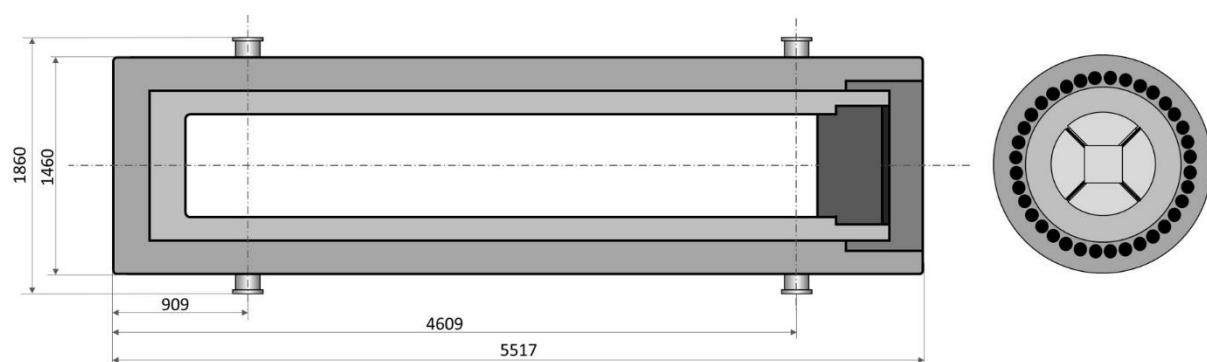


Abbildung 21: Skizze des POLLUX®-10

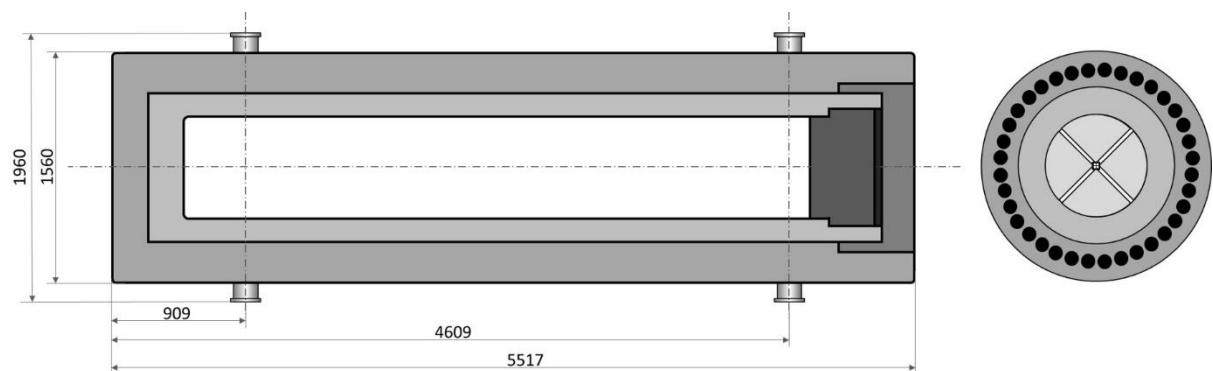


Abbildung 22: Skizze des POLLUX®-8

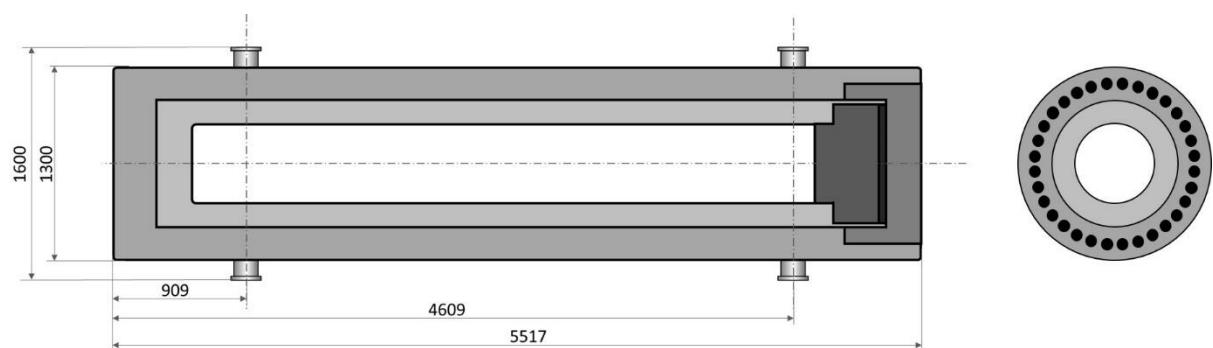


Abbildung 23: Skizze des POLLUX®-6



Abbildung 24: Skizze des POLLUX®-4,5

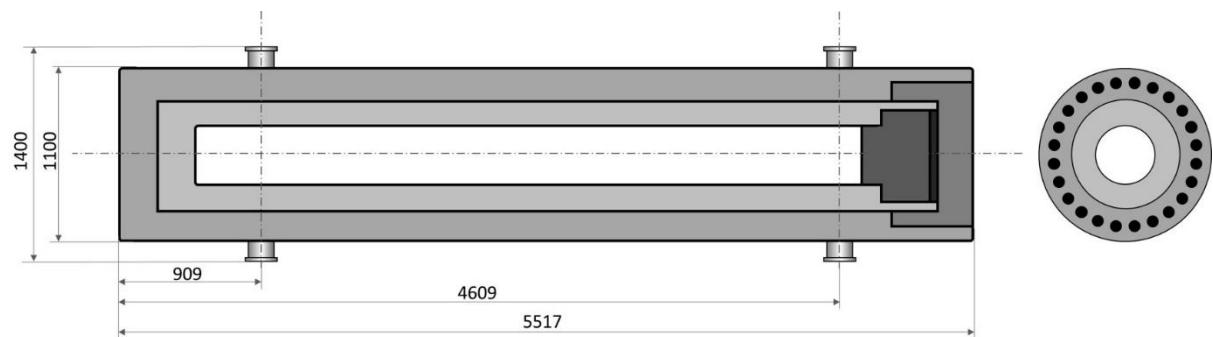


Abbildung 25: Skizze des POLLUX®-3

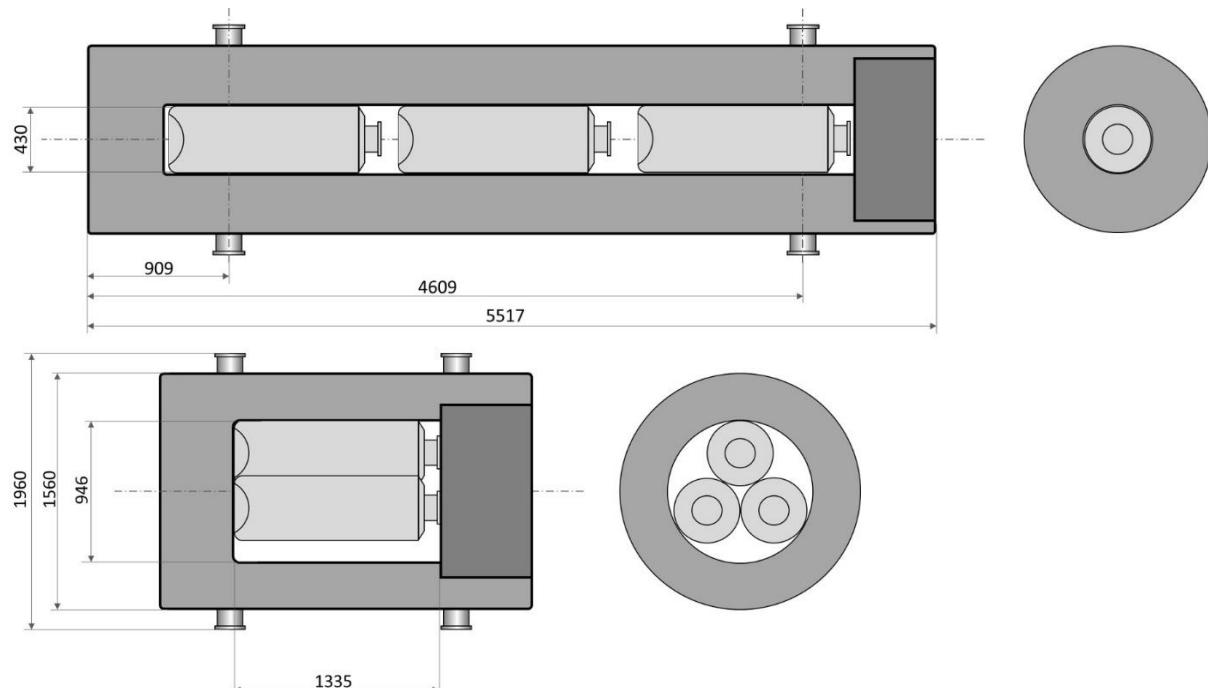


Abbildung 26: Skizzen des POLLUX®-3 CSD-V (oben: Konzept A mit CSD-V in einer Reihe; unten: das bevorzugte Konzept B mit CSD-V nebeneinander)

Welche Behältertypen für die Einlagerung verwendet werden, hängt insbesondere von der Auslegungstemperatur und der thermischen Auslegung des Endlagers ab und damit auch vom Wirtsgestein. Die Abfallmengengerüste einschlägiger F&E Vorhaben ergeben je nach Behälterbeladung Behälteranzahlen von insgesamt ca. 3.000 bei einer Auslegungstemperatur von 200 °C im Steinsalz in 760 m Teufe (z. B. Bollingerfehr et al., 2018), von ca. 10.000 Behältern bei einer Auslegungstemperatur von 150 °C im Tongestein in 680 m Teufe (z. B. Jobmann & Lommerzheim, 2014; Lommerzheim & Jobmann, 2015) oder von ca. 14.000 Behältern bei einer Auslegungstemperatur von 100 °C im Kristallingestein in 1.400 m Teufe (Mönig et al., 2020). Dabei ist die Beladung einerseits funktional mit den thermischen Parametern des Wirtsgesteins und andererseits über die Gebirgstemperatur mit der Endlagerteufe verknüpft. Die Behälterzahl definiert die Anzahl nötiger Lastspiele, für die die Transport- und Einlagerungstechnik der hochradioaktiven Abfälle ausgelegt werden muss.

Da die Abfälle in den aufgeführten CASTOR® Behältern eine vernachlässigbare Wärmeentwicklung aufweisen, bleibt ihre Anzahl über verschiedene Einlagerungskonzepte hinweg konstant.

3.1.3 Fahrbahn

Die Einlagerungsvorrichtung ELViS ist in Engelmann et al. (1995) gleisgebunden konstruiert worden. Mit heutigen Fahrwerksentwicklungen und Sensortechnologien könnte jedoch die zur Rückholung durchgeführte Modifizierung mELViS (Herold et al., 2018), ein mobiles Portal mit vier Raupenfahrwerken, als Grundlage zur Weiterentwicklung der Einlagerungstechnik genutzt werden (Kapitel 2.5). Einige Vorteile, die sich durch die flurgebundene Bauweise ergeben, sind

weniger Aufwand beim Fahrbahnbau, eine geringere Menge korrodierenden Materials in der Einlagerungsstrecke, verringerte Strahlenbelastung des Personals (kein Rauben von Gleisen in Abfallgebindenähe) und schnellere Anpassung der Fahrbahn bei gebirgsmechanisch bedingten Veränderungen. Die Fahrt findet in der Einlagerungsstrecke direkt auf der geglätteten Sohle statt. Das bedeutet, dass die Einlagerungsvorrichtung mindestens innerhalb der Einlagerungsstrecken sowohl mit als auch ohne Abfallgebinde selbstständig verfahrbar sein muss. Es wird grundsätzlich von horizontalen Fahrbahnen ausgegangen mit geringfügigen Neigungen $< 1^\circ$ aufgrund von Ungenauigkeiten beim Fahrbahnbau.

Für den Transport des Abfallgebides unter Tage bis zu den Einlagerungsstrecken wird weiterhin ein schienengebundenes Transportkonzept verfolgt. Nach DB-Richtlinie entspricht der Transport von Schwerwagen, die über den Lastwerten des Grenzlastzuges D4(DB) liegen, einem außergewöhnlichen Transport. In Deutschland sind Transporte mit Radlasten bis 22,5 t und einer Meterlast von 8 t/m innerhalb der Standardstreckenklasse D4 zulässig. Aufgrund der hohen Massen der Behälter (65 Mg), fällt der Transport auf dem Gleis unter die außergewöhnlichen Transporte auf dem Schienennetz der DB. Auch der Transport der Behälter zur direktenendlagerung von TLB mit Behältermassen von 160 Mg (maximale Nutzlast 200 Mg) erfolgt über ein Gleissystem, dass nach den Erfahrungen aus dem konventionellen Schienenverkehr ausgelegt ist. Die Planungen zum Gleisbau für die direkte Endlagerung von TLB werden für die Streckenlagerung übernommen (Kapitel 6). Damit ist das Gleis auch auf den Transport für die Streckenlagerung mit den folgenden Parametern sicher ausgelegt (Schienen-Schwellensystem mit geschottertem Unterbau):

- Spurbreite 1.435 mm (Spurbreite des deutschen Bahnnetzes)
- Betonschwellenabstand 600 mm
- Schienenprofil RT 19, Gütegrad P4 (340 – 430 HB)

Im Mittel tritt kein Streckengefälle auf. Fertigungstoleranzen der Fahrbahn führen bei horizontalen Hauptbahnen zu maximalen Gefällen von $0,7^\circ$ (entsprechend 12,5 ‰ zulässige Neigung), bei Nebenbahnen von $2,3^\circ$ (entsprechend 40 ‰ zulässige Neigung) und in Bereichen, in denen Züge regelmäßig abgestellt werden von $0,09^\circ$ (entsprechend 1,6 ‰ zulässige Neigung) (Engelmann et al., 1995).

3.1.4 Weitere allgemeine Anforderungen

Neben den baugruppenspezifischen Funktionen und Anforderungen bestehen Anforderungen an die Transport- und Einlagerungstechnik, die sich aus den Umweltbedingungen und weiteren Randbedingungen ergeben. Diese sind in der folgenden Liste aufgeführt:

- Trockentemperatur der Wetter ca. 40°C , max. 52°C
- Der Einlagerungsvorgang muss grundsätzlich reversibel sein
- Es wird angenommen, dass die Rückholung während der Betriebszeit aus einer verfüllten Strecke durch die modifizierte Einlagerungsvorrichtung in Strecken (mELViS) realisiert werden kann (Herold et al., 2018)
- Luftfeuchtigkeit variiert je nach Wirtsgestein

- Anwesenheit von Staub (korrosiv und/oder abrasiv)
- Gesteinsfestigkeit variiert: Salz 15-25 MN/m², Kristallin ab 100 MN/m²
- In einem Endlager in Tongestein werden sämtliche Grubenräume mit Beton ausgebaut. Die Fahrbahn wird entsprechend der Anforderungen aus der betrieblichen Belastung hergestellt.
- Fahrbahn Untergrund: Steinsalz, Kristallingestein oder hergestellte Fahrbahn, z. B. aus Schotter
- Max. Streckengefälle 1°
- Automatisches Feuerlöschesystem, Pulverlöschanlage
- Oberflächen dekontaminierbar
- Gedichtete und gekapselte Lager
- Möglichst wartungsarme Konstruktion
- Alle Verschleißteile und Wartungspositionen einfach zugänglich
- Möglichst geringe Brandlast mit zugelassenen Schmierstoffen und Fluiden
- Schachttransport muss in Einzelteilen möglich sein. Zerstörungsfrei trennbare Verbindungen sind zu bevorzugen. Schweißen nur in Ausnahmefällen zulässig.
- Erhöhte Sicherheitsanforderungen sind durch Redundanz und hohe Sicherheitsfaktoren zu berücksichtigen
- Möglichst kompakte Bauweise
- Sonderanfertigungen sind zu vermeiden; Ersatzteilversorgung notwendig. Bei Funktionsteilen möglichst auf Serienkomponenten oder seriennahe Teile zurückgreifen.

3.1.5 Anforderungsliste – Einlagerungsvorrichtung in Strecken

Für die Einlagerungsvorrichtung in Strecken ergeben sich folgende konkrete Funktionen und Anforderungen:

Erforderliche Funktionen:

- Aufnahme von unterschiedlichen Abfallgebinden
- Heben und Senken von unterschiedlichen Abfallgebinden
- flurgebundenes Verfahren in der Strecke, beladen und unbeladen
- Selbstfahrend oder Kupplung für Antriebsmaschine (z. B. Lokomotive im gleisgebundenen Betrieb)

Anforderungen:

- Energieversorgung über Grubenstrom
- Max. zulässige Achslast 20 t für gleisgebundenen Einsatz; Zu berücksichtigen sind im flurgebundenen Betrieb evtl. differenzierte Achslasten in den verschiedenen Gesteinsarten.
- Selbsthemmende Antriebe sind zu bevorzugen
- Vorrichtung zum Aufnehmen der Abfallgebinde, anpassbar an den Behältertyp
- Vorrichtung zum Bewegen der Abfallgebinde
- Vorrichtung zur Positionsbestimmung
- Vorrichtung zum Aufnehmen notwendiger Hilfseinrichtungen (z. B. Sockelablage)

- Vorrichtung zum sicheren Ablegen der Abfallgebinde
- Tätigkeiten sind fernbedien- und überwachbar vom Leitstand aus durchzuführen
- Einlagerungsvorgang muss reversibel sein
- Nahbereich muss überwacht werden (Unfallvermeidung!)
- Batteriebetriebene Signal und Warnleuchten

3.1.6 Anforderungsliste – Transportwagen

Für den Transportwagen ergeben sich folgende konkrete Funktionen und Anforderungen:

Erforderliche Funktionen:

- Transport des Abfallgebinde über Gleisnetz
- Transport der Einlagerungstechnik über Gleisnetz
- Koppelbar mit Lokomotive

Anforderungen:

- Max. 5 km/h (2,5 km/h bei Weichenüberfahrt) Höchstgeschwindigkeit für Transport
- Feststellbremse
- Antrieb erfolgt über Lokomotive
- Keine Betriebsbremse vorgesehen
- Zul. Achslast max. 20 Mg
- Gleisgebunden
- möglichst geringen Gleisverschleiß berücksichtigen
- gefederte Aufnahmepunkte für Abfallgebinde
- zusätzliche Dämpfung wird nicht als nötig erachtet
- Signaleinrichtungen für Fahrt in beide Richtungen
- Radbruchsicherung vorsehen
- Anschlagpunkte für das Aufgleissystem
- Energieversorgung über Koppelung mit Lokomotive

3.1.7 Anforderungsliste – Lokomotive

In Engelmann et al. (1995) und Filbert et al. (2010) wurde als Antriebsmaschine eine batteriebetriebene Lokomotive verwendet. Eine solche kommt auch weiterhin zum Einsatz. Jedoch wird die bekannte Lokomotive durch eine moderne batteriebetriebene Lokomotive ersetzt, die den aktuellen Anforderungen genügt. Für die Lokomotive ergeben sich folgende konkrete Funktionen und Anforderungen:

Erforderliche Funktionen:

- Zug- bzw. Antriebsmaschine koppelbar mit Transportwagen
- Vorwärts- und Rückwärtsfahrt
- Fernsteuerbar von Leitstand; bei Störung o.ä. manuelle Steuerung vor Ort
- Betriebsbremse für beladenen Transportwagen

- Energieversorgung für beladenen Transportwagen

Anforderungen:

- Antrieb durch Batterie
- Betriebsbremse
- Feststellbremse
- Überrollschutzstrukturen (ROPS)
- Falling Object Objectives (FOPS)
- Elektromagnetische Verträglichkeit
- Geforderte Anhängelast: ca. 85 Mg (max. 60 Mg durch Behälter, 10 Mg Eigengewicht des Transportwagens, evtl. zusätzlich das Eigengewicht der Einlagerungsvorrichtung von ca. 15 Mg)
- Transportvorgänge mit Anhängelast: 5.000 – 20.000 Stück (ohne Dauerfestigkeitsversuche)
- Spurbreite: 1.435 mm (gleisgebunden)

Da die Antriebsmaschine in allen Einlagerungsvarianten verwendet wird, wird sie gesondert in Kapitel 8 vorgestellt.

3.2 Bedarf zur Weiterentwicklung

3.2.1 Allgemeines

Das Einlagerungssystem für die Streckenlagerung, bestehend aus Einlagerungsvorrichtung in Strecken (ELViS), Plateauwagen und Lokomotive, wurde in den 1980ern und 1990ern Jahren als gleisgebundes Gesamtsystem entwickelt (Engelmann et al., 1995). Zu diesem Zeitpunkt entsprachen die gewählten technischen Ansätze und Bauteile dem Stand der Technik. In der Erprobung konnte das System erfolgreich für die Einlagerung in Strecken getestet werden.

Der heutige Stand der Technik beinhaltet beispielsweise mobile selbstfahrende Protalkräne im Rahmen von Containerumschlägen oder Schiffstransporten, die in Häfen an Land anfallen (z. B. Abbildung 27). Diese Portaltechnik, die hohe Gewichte handhabt und unabhängig von Gleissystemen arbeitet, kann in Teilen auf die Einlagerung in Strecken übertragen werden. Durch den Wegfall der Gleise fällt das Rauben der Gleise nach Einlagerung in den Einlagerungsstrecken weg, wodurch sich die Strahlenbelastung für das Betriebspersonal verringert. Darüber hinaus muss die Übergabe des Abfallgebinde an die Einlagerungstechnik nicht in der Einlagerungsstrecke selbst stattfinden. Deren Querschnitt kann dadurch deutlich verringert werden, so dass Hohlraumvolumen gespart werden kann. Dies entspricht einer wichtigen Forderung von Sicherheitskonzepten, vor allem im Steinsalz (vgl. z. B. Bollingerfehr et al., 2018). Die durch den Einsatz von Reifen höhere Brandlast der Einlagerungstechnik und Reifenabrieb, der in der Einlagerungsstrecke verbleibt, müssen im Rahmen eines Sicherheitskonzepts gegen diese Vorteile abgewogen werden.

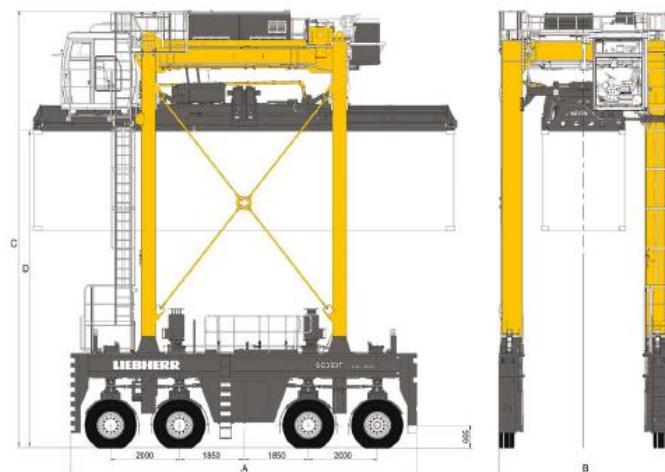


Abbildung 27: Liebherr Straddle Carrier (Liebherr, 2020)

Flurgebundenes Fahren wurde schon bei der modifizierten Einlagerungsvorrichtung in Strecken (mELViS), die für die Rückholung von Abfallgebinden konzipiert worden ist (Abbildung 28), eingesetzt. Der heutige Stand der Technik bietet daher für die Weiterentwicklung der Transport- und Einlagerungstechnik erweiterte technische Grundlagen an.

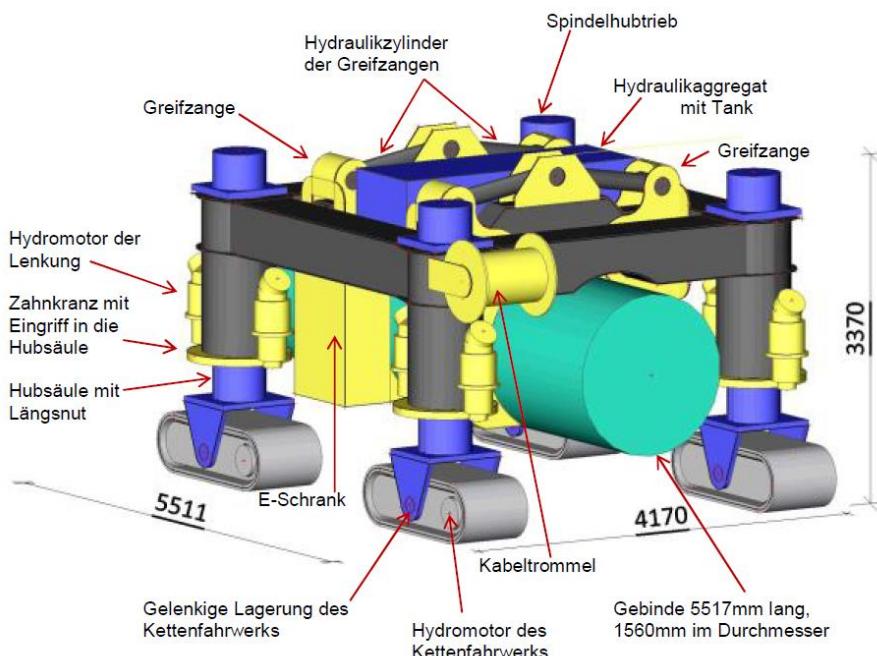


Abbildung 28: Rückholungsvorrichtung mELViS aus dem Projekt ERNESTA (Herold et al., 2018)

Die Einlagerungsvorrichtung ELViS verwendet zur Energieversorgung eine direkte Anbindung an das Grubenstromnetz über ein Schleppkabel, welches auf einer Kabeltrommel auf- und abgerollt wird (Engelmann et al., 1995). Diese wird manuell beim Positionieren der ELViS in eine nahegelegene Buchse eingesteckt. Da der Personaleinsatz in der Nähe der Abfallgebinde aus Arbeitssicherheitsgründen möglichst reduziert werden sollte und der heutige Stand der Technik durch die Entwicklung von leistungsstarken Batterien eine kontinuierliche Verbindung

zum Versorgungsnetz nicht mehr erfordert, ist zu überlegen, die Portalkonstruktion im Nachfolgenden mit Batterietechnik auszustatten.

Leistungsstarke hydraulische Systeme, wie sie die mELViS nutzt, werden für die nachfolgende Konstruktion nicht bevorzugt. Im Wesentlichen soll damit vermieden werden, brennbare Flüssigkeiten in die Einlagerungsstrecken einzubringen. Hydraulische Systeme können Leckagen aufweisen. Einerseits werden so organische Substanzen in der Einlagerungsstrecke bei Einlagerung verteilt, was für die Langzeitsicherheit nachteilig ist (Gasentwicklung). Andererseits können Leckagen zu Öllachenbränden („Pool Fire“) führen können, deren Temperaturentwicklung sehr stark ausfallen kann. Deshalb werden andere Lösungen zur Kraftübertragung bevorzugt.

Für den Ablauf des Transports und der Einlagerung können einige Parallelen zwischen der Streckenlagerung und der vertikalen Bohrlochlagerung gezogen werden, wie der Transport des Behälters mithilfe eines Plateauwagens und die Handhabung bei der Einlagerung durch ein Portal. Da die Massen der zu transportierenden Gebinde in ähnlichen Größenordnungen liegen, werden einige Details aus der konstruktiven Gestaltung der vertikalen Bohrlochlagerung übernommen. Entsprechende Anpassungen des Plateauwagens der Streckenlagerung wurden bereits in Filbert et al. (2010) vorgeschlagen.

Für die Endlagerung in Strecken können verschiedene Behälterarten und Varianten in Frage kommen. Zum derzeitigen Stand kann keine Einschränkung stattfinden, welche Behältergröße für die Auslegung der Einlagerungsvorrichtung herangezogen werden sollte. Je nach Wirtschaftstein, Auslegungstemperatur, Endlagerteufe usw. können verschiedene Behälterbeladungen zum Einsatz kommen und so Maße und Masse der Abfallgebinde variieren. Für den Betriebsfall ist allerdings zu berücksichtigen, dass vermutlich nur eine Behältergröße für die Endlagerung von ausgedienten Brennelementen zum Einsatz kommen wird. Hinzu kommen die Abfallgebinde für die übrigen Abfallgebindeströme in deutlich kleineren Stückzahlen.

Aufgrund des großen Anteils an POLLUX®-Behältern an der Gesamtzahl einzulagernder Abfallbehälter bei der Endlagerung in Strecken, konzentriert sich die nachfolgende Entwicklung auf diese. Je nach Beladung ändern sich Maße und Masse der Behälter. Die Abstände der Tragzapfen, die zur Aufnahme der Behälter dienen, sind bei allen Abfallgebinden zur Endlagerung von Brennelementen allerdings identisch. Im Rahmen der Konstruktionsarbeiten wird deshalb zunächst der POLLUX®-10 aus Kapitel 3.1.2 verwendet. Er stellt den Behälter mit den größten Abmessungen und dem größten Gewicht dar. Für die Wahl einer Behälterbeladung, die zu einem kleineren POLLUX®-Behälter führt, muss das Portal leicht konstruktiv angepasst werden können. Für den Fall, dass wider Erwarten viele Arten des POLLUX®-Behälters im gleichen Endlager zum Einsatz kommen, ist außerdem vorzusehen, dass einfache Montagearbeiten die Einlagerungsvorrichtung umgerüstet werden kann. Da die Abfallgebindedurchmesser denkbarer Beladungen nur im Rahmen von 2 bis 3 dm variieren, sind jedoch keine wesentlichen Änderungen an Streckenquerschnitten aufgrund der Behältergrößen anzunehmen.

Für die nachfolgende Konstruktion wird davon ausgegangen, dass die Sohle eine bearbeitete und ebene Fahrbahn darstellt. Somit findet die Fahrt der Einlagerungsvorrichtung direkt auf der geglätteten Sohle statt.

Dadurch, dass die Einlagerungsvorrichtung ELViS in Ihrer grundlegenden Konstruktion den aktuellen Stand der Technik und aktuelle Anforderungen nicht berücksichtigt sowie viele Details durch heutige Systementwicklungen und neuere technische Ansätze anders gelöst werden können, wird im Nachfolgenden eine (weitest gehende) Neukonstruktion der Einlagerungstechnik vorgeschlagen.

3.2.2 Einstufung der Einlagerungstechnik nach KTA

Für die Auslegung von Technik zum Transport und zur Einlagerung von hochradioaktiven Abfällen bestehen keine gültigen kerntechnischen Regeln. Sinngemäß können die Regeln der Kerntechnischen Ausschusses (KTA) herangezogen werden. Für die Transport- und Einlagerungstechnik kann vor allem die KTA 3902 „Auslegung von Hebezeugen in Kernkraftwerken“ von Nutzen sein. Diese KTA sieht verschiedene Einstufungen der Hebezeuge vor, nach denen sich Strenge und Umfang der Anforderungen richten.

Die Transport- und Einlagerungsvorrichtung in Strecken wird nach der geringsten Einstufung nach KTA 3902 als „Hebezeug nach allgemeinen Bestimmungen“ weiterentwickelt. Hier ist KTA 3902 Abschnitt 3 maßgebend. Es wird gefordert, dass die Hebezeuge den allgemein anerkannten Regeln der Technik und den allgemeinen Sicherheitsvorschriften, Arbeitsschutzvorschriften des Bundes und der Länder sowie den Vorschriften der Träger der gesetzlichen Unfallversicherung genügen sollen. Neben den allgemeinen Bestimmungen sind nach KTA 3902 Abschnitt 4 weitere Aspekte bei der Konstruktion zu berücksichtigen:

1. Es muss ein Nachweis gegen „Einwirkungen von außen“ geführt werden, wenn dieser auch für das Gebäude in dem das Hebezeug betrieben wird geführt wird.
2. Umgebungsbedingungen wie z. B. Druck, Temperatur, Umgebungsmedien und Strahlenbelastung sind bei der Konstruktion zu berücksichtigen.
3. Die Dekontaminierbarkeit muss bei der Konstruktion berücksichtigt werden.

Die Einstufung der Technik erfolgt nach dem entsprechenden Flowchart der KTA 3902 (Abbildung 29). Maßgeblich ist, dass auch bei einem Versagen der Einlagerungstechnik, z. B. durch Fallenlassen des Abfallgebinde, aufgrund der Behälterauslegung und der geringen möglichen Fallhöhe kein Radionuklidastrag zu erwarten ist. Die Übertragbarkeit der Anforderungen aus KTA 3902 auf die Einlagerungstechnik der Streckenlagerung ist jedoch nur sinngemäß möglich. Die Fokussierung der KTA 3902 auf die Verwendung von Seiltrieben und Krananlagen erschwert ihre Anwendung auf Maschinenkonzepte, die diese Komponenten nicht benutzen.

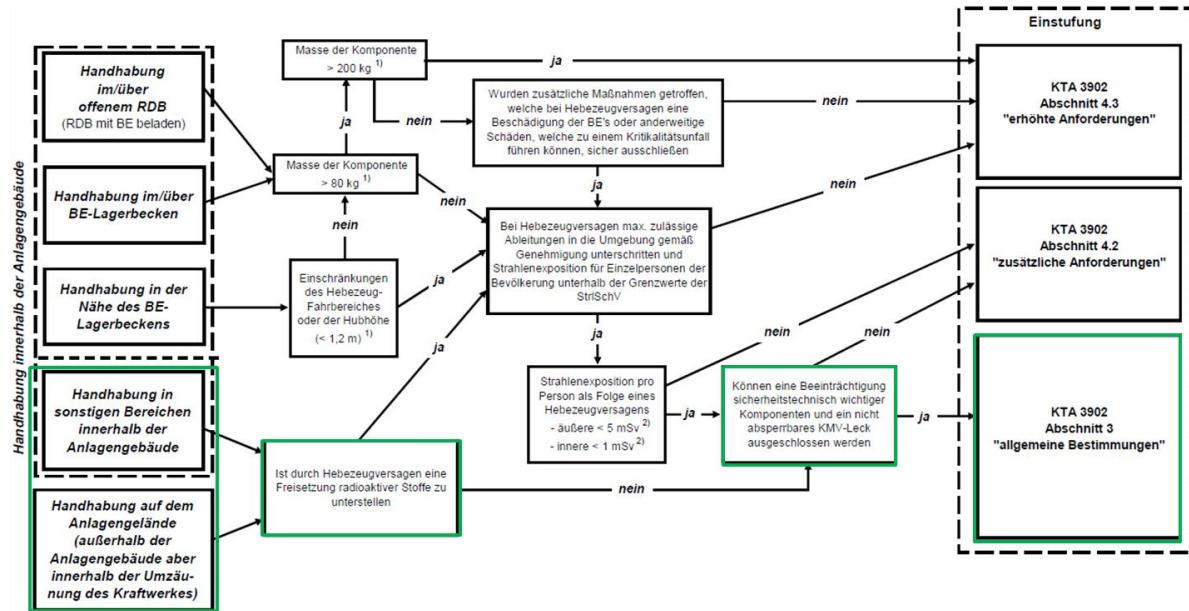


Abbildung 29: Flowchart zur Einstufung von Hebezeugen nach KTA 3902; in grün: Einstufung der Einlagerungstechnik für Streckenlagerung

3.3 Weiterentwicklung & Konstruktion

Das Portal für die Endlagerung in Strecken (Abbildung 30) lässt sich funktionsbedingt in die Hauptgruppen Grundrahmen, Hubwerk, Fahrwerk, Tragwerk und Energieversorgung einteilen. In den nachfolgenden Kapitelteilen werden die Funktionsgruppen näher betrachtet und in besonderen Aspekten ihrer Funktionsweise beschrieben.

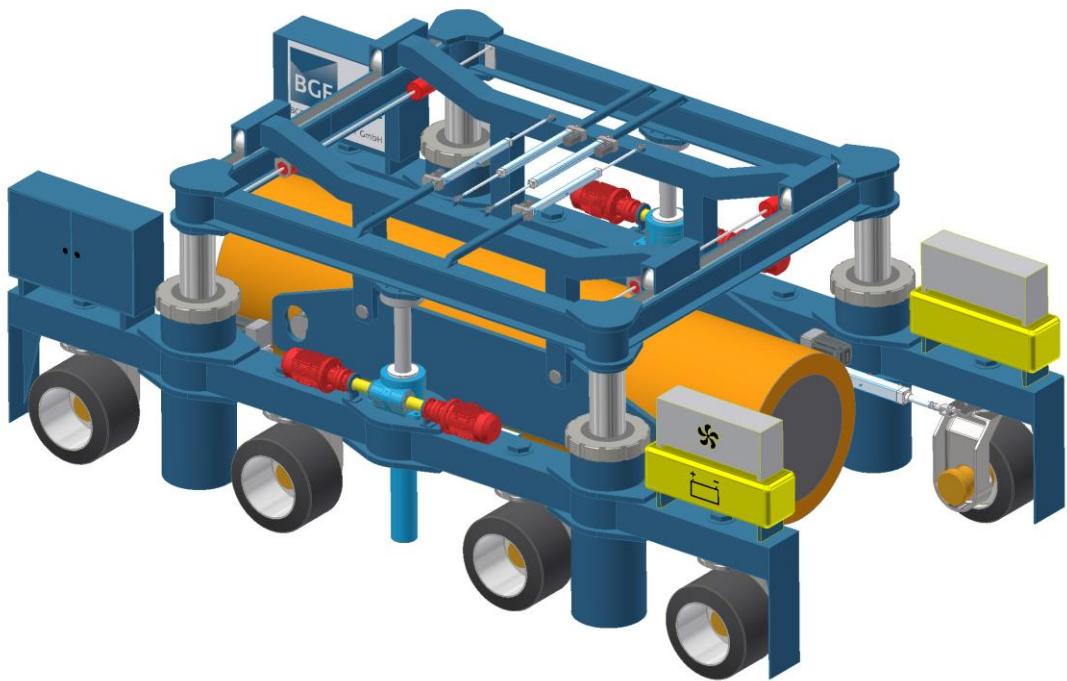


Abbildung 30: Modell des Portals für die Endlagerung in Strecken mit Abfallgebinde

Das Portal ist so gestaltet, dass es den Endlagerbehälter aufnehmen, transportieren und sicher ablegen kann. Die Arbeitsaufgabe des Transports des Behälters in den Einlagerungsstrecken erfordert ein mobiles Portal. Sein Fahrwerk ist zur Funktionssicherung redundant ausgeführt. Zum Schutz der Baugruppen, die mit einer erheblichen Last bei Aufnahme des Abfallgebindees beaufschlagt werden, sind die Funktionen der Höhenverstellung und der Seitenführung der Tragbalken entkoppelt. Sie werden durch die Baugruppen des Hubwerkes und des Tragwerkes realisiert. Zur Minimierung des Bauraums des Portals wird der durch den Grundrahmen umbaute Raum größtmöglich ausgenutzt. Dies wird z. B. so umgesetzt, dass die einzelnen Fahrwerke nicht unter dem Hubwerk liegen, sondern zur Einsparung von Bauhöhe zwischen den Fahrwerken. Abbildung 31 zeigt die Anordnung der Funktionsgruppen zueinander in der Front- und Seitenansicht.

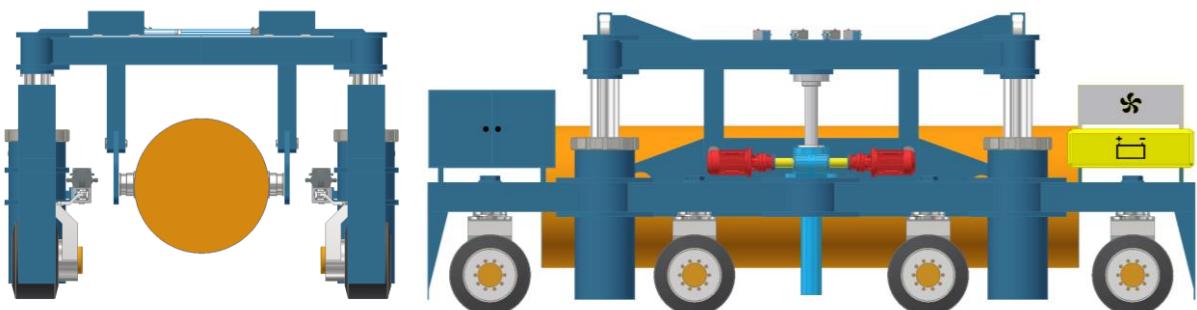


Abbildung 31: Portal für die Endlagerung in Strecken mit Abfallgebinde in Frontansicht (links) und in Seitenansicht (rechts)

Neben den Funktionen steht die Sicherheit des Abfallgebinde im Fokus der Anordnung der einzelnen Einrichtungen des Portals. Systeme wie die Energieversorgung sind daher möglichst weit vom Abfallgebinde entfernt angeordnet. So wird dieses bei einem Schadensfall der Energieversorgung bestmöglich geschützt. Im Brandfall der Batterie liegt der Brandherd ebenfalls nicht unmittelbar neben dem Abfallgebinde, wodurch sich die mögliche Temperatureinwirkung auf das Gebinde deutlich reduziert.

3.3.1 Grundrahmen

Die Größe des Grundrahmens des Portals gibt weitestgehend die äußeren Abmessungen der Einlagerungsvorrichtung vor. Die Außenabmessungen werden möglichst klein gewählt, ohne die Funktionalität der Einlagerungsvorrichtung, bspw. die Stabilität beim Heben der Endlagerbehälter, einzuschränken. Der Grundrahmen (Abbildung 32) besteht aus einem Unterträger, der jeweils auf der linken und rechten Seite des Portals eingesetzt wird, und einem symmetrischen Oberträgerbauteil. Zwei Oberträgerbauteile und ihre Verbindung ergeben den gesamten Oberträger. Der Oberträger stützt das Tragwerk für die Behälteraufnahme ab und wird durch die Bewegung und Lagenveränderungen des Hubwerkes angehoben oder abgesenkt. Von einer stabilisierenden Verbindung zwischen den Unterträgern im hinteren Teil des Portals wurde abgesehen. Eine solche Verbindung würde sich einerseits vorteilhaft auf die Biegebelastung des Hubwerkes auswirken, anderseits würde ein entsprechender Träger eine Seite der Vorrichtung für das Überfahren eines Abfallgebinde bzw. Plateauwagens blockieren und u. U. aufwendige rangierarbeiten erfordern. Es wurde daher auf eine zusätzliche Verbindung der Unterträger verzichtet. Sollte bei weitere Analyse die Durchbiegung als zu groß festgestellt werden, muss die Steifigkeit des Grundrahmens erhöht werden.

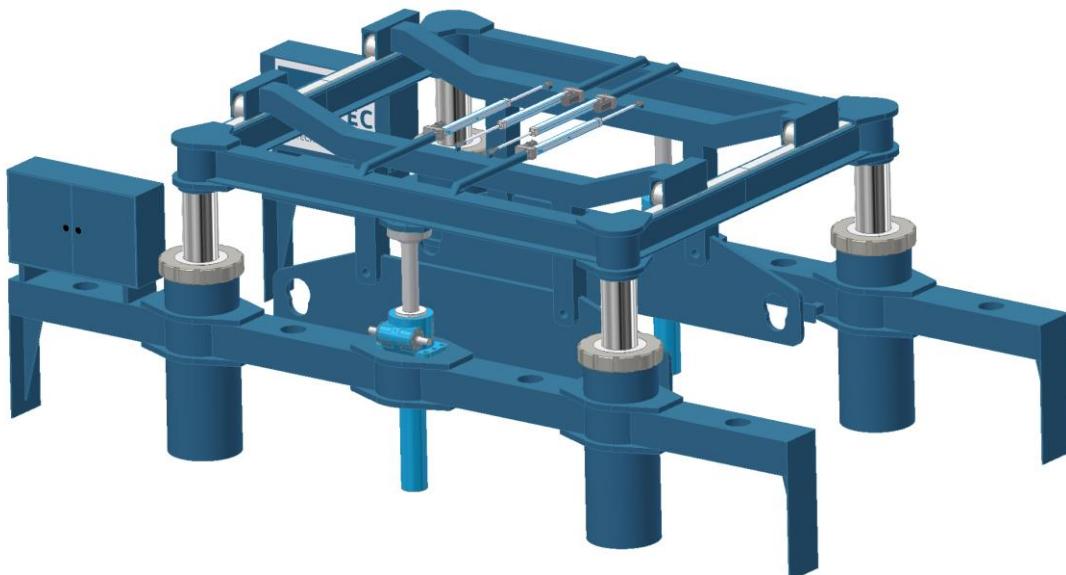


Abbildung 32: Grundrahmen des Portals für die Endlagerung in Strecken

3.3.2 Hubwerk

Die Hubeinrichtung der ELV (Filbert et al., 2010) mit Hilfe von Gewindespindeln wird auch hier eingesetzt. Durch das hohe Gewicht der ELV, bestimmt durch deren zusätzliche Funktion des Schwenkens des Transferbehälters und die dezentrale Gewichtsbelastung durch die Kabeltrommel, sind vier Gewindespindeln in die Gleitzylinder integriert. Im Falle des Portals für die Endlagerung in Strecken und dem verhältnismäßig geringen Gewicht des Portals selbst, sind zwei Gewindespindeln ausreichend. Durch eine zentrale Anordnung der Gewindespindel auf beiden Portalseiten reduzieren sich die Biegekräfte in der Spindel auf das minimal mögliche Maß. Für einen Versagensfall sind die Gewindespindeln durch ihre doppelte Ausführung redundant ausgeführt. Ein Anheben bzw. Absenken des Behälters kann auch von einer Spindel durchgeführt werden. Der erforderliche Antrieb der Gewindespindeln benötigt zum Heben des Portals unter Last ein Drehmoment von 590 Nm bei einer Leistung von 6,2 kW.

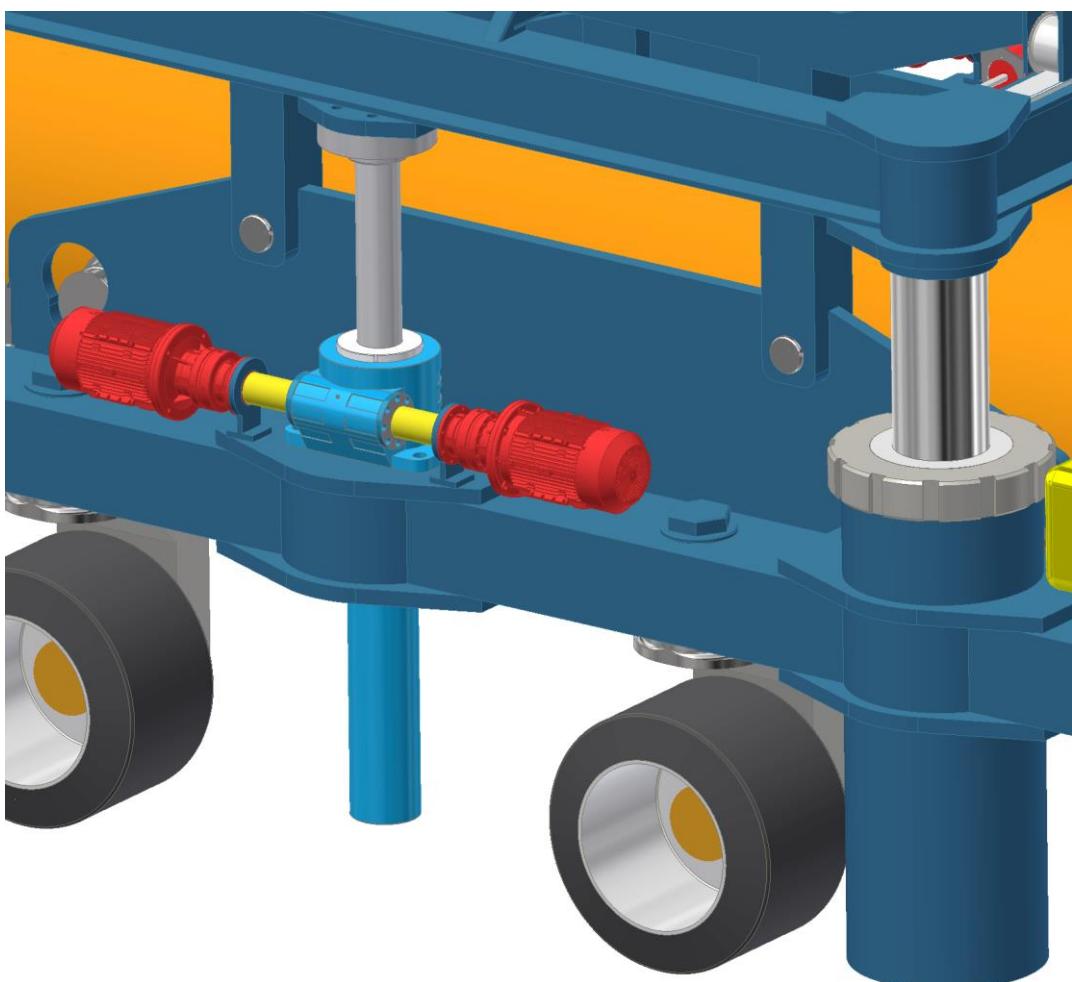


Abbildung 33: Hubwerk mit redundanten Gewindespindeln

Zum Hubwerk gehören neben den Gewindespindeln außerdem die Gleitzylinder. Diese bilden die vier Ecksäulen und sind teleskopierbar ausgeführt. Die Bauart des Teleskops ermöglicht es, eine größere Hubhöhe zu erreichen, während genügend Zylinderfläche im Eingriff bleibt und damit die Last des Endlagerbehälters aufnehmen kann.

Die erforderliche Hubhöhe zur Aufnahme und Ablage des Abfallgebindeis ergibt sich aus den vorliegenden Umgebungsbedingungen, die nachfolgend weiter erläutert werden. Zunächst ist der Behälter von seinem Transportfahrzeug herunter zu heben. Die maximal erforderliche Höhe des Portals wird beim Abnehmen des Abfallgebindeis vom Plateauwagen über den Rahmen des Plateauwagens hinaus erreicht. Hinzu kommt der erforderliche Abstand des Abfallgebindeis zum Oberträger des Grundrahmens, um die Tragzapfen in der Schlüssellochkontur des Tragbalkens zu arretieren.

Die geringste notwendige Höhe erreicht das Portal bei der Ablage des Abfallgebindeis auf der Sohle. Hier ist entscheidend, dass der Oberträger des Portals einen festgelegten Sicherheitsabstand von 100 mm zum Behälter einhält. Dazu kommt der gegebene halbe Behälterdurchmesser zum Lösen der Tragzapfen aus der Schlüssellochkontur. Abzüglich einer Sicherheit, um den Behälter auch bei leicht ungleichmäßigem Stand lösen zu können, ergibt sich damit die minimal erforderliche Höhe. Die gesamte Hubhöhe ergibt ca. 1.050 mm und gibt damit den Weg für die Gewindespindel und die Gleitzylinder vor.

Um die Maschine untertagetauglich zu gestalten, sind die beweglichen Teile des Hubwerkes vor Staub und anderen Umgebungseinflüssen abgeschirmt. Dazu steht für die Gewindespindel herstellerseitig ein Faltenbalg zur Verfügung (siehe bspw. Pfaff (2021)). Für die Gleitzylinder können Abstreifer eingesetzt werden, um die Zylinderflächen zu schützen.

3.3.3 Fahrwerk und Räder

Das Portal wird aus den in Kapitel Weiterentwicklungsbedarf genannten Gründen flurgebunden ausgeführt. Um die Sohle der Einlagerungsstrecke zu schonen, wurden Radfahrwerke ausgewählt. Raupenfahrwerke können erheblichen Schaden am Untergrund anrichten. Um zu vermeiden, dass die Sohle in den aktuellen Einlagerungsstrecken und im Querschlag vermehrt nachbearbeitet werden muss, ist daher die Entscheidung zu Gunsten der Radfahrwerke getroffen worden. Durch die nachfolgenden Darstellungen der Radauswahl und dem Fahrwerksantrieb wird gezeigt, dass eine sinnvolle Antriebslösung mit Radfahrwerken möglich ist.

Allgemeingültig ist der Zusammenhang, dass die Reifengröße, als Reifenumfang bzw. Reifenbreite umso größer gewählt werden müssen, je größer die aufzunehmende Last ist. Alternativ kann auch die Anzahl an Reifen erhöht werden. Dabei muss jedoch sichergestellt werden, dass sich die Last gleichmäßig auf die Radsätze verteilt. Lösungen mit Zwillingsbereifung können die geforderte Zahl der Reifen am besten aufnehmen. Nachteilig zu nennen ist, dass Zwillingsbereifungen deutlich breiter bauen. Damit wird ein größerer Streckenquerschnitt notwendig. Eine Einzelbereifung hat zwar den Nachteil, dass Lenkaktuatoren und eine höhere Anzahl von Radträgern benötigt werden, der benötigte Bauraum wird jedoch als geringer eingeschätzt. In Zukunft sollte jedoch die technische Entwicklung im Auge behalten werden, ob integrierte zwillingsbereifte Systeme mit geringerem Bauraum verfügbar sein werden.

Die Radfahrwerke sind redundant auszuführen, um im Versagensfall eines Fahrwerks manövrierfähig zu bleiben. Die Last muss dementsprechend auf jeder Seite von der Anzahl der Räder

abzüglich einem Rad aufgenommen werden können ($n-1$ Redundanz je Seite). Mit der Berücksichtigung der Reifendimensionen, die bei Maschinen mit ähnlichen Einsatzbereichen vorliegen, wird die Anzahl der Räder auf acht festgelegt. Für die Auswahl der Reifen selbst ist daher zu berücksichtigen, dass die Last der Maschine inkl. des POLLUX®-Behälters von sechs Rädern und ihren Radfahrwerken aufgenommen wird.

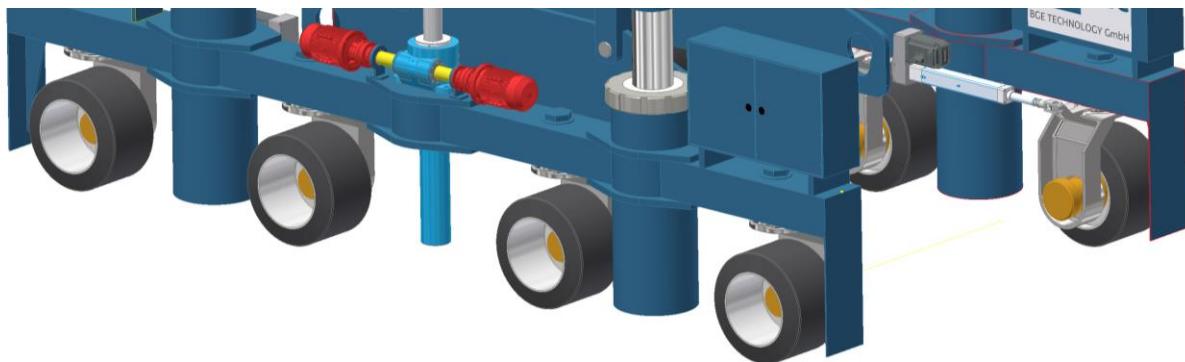


Abbildung 34: Modell des Radfahrwerks

Die Fahrt findet auf einer geglätteten Sohle statt. Der Fahrbahnuntergrund besteht voraussichtlich aus dem geschnittenen Gestein oder einer erstellten Fahrbahn. Neigungen werden in der Strecke nicht erwartet. Auch mit Rampen wird am Übergabeort des POLLUX®-Behälters nicht gerechnet. Bei Fahrten zur Werkstatt, die mindestens einmal pro Woche einzukalkulieren sind, muss ebenfalls mit keinen Steigungen gerechnet werden. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass das Portal nicht beladen ist und damit eine geringe Last auf die Räder einwirkt. Mit Hilfe dieser Grundlagen wurden technisch mögliche Reifenkonzepte bei Reifenhersteller angefragt.

Unter den Reifen stehen die Varianten der Bandagen und der Luftbereifung zur Verfügung. Luftbereifungen bieten den Vorteil, dass sie weniger stark erhitzen und damit eine längere Einsatzdauer ohne Pausen gewährleisten können. Außerdem ist durch die Luft eine integrierte Federung gegeben. Luftbereifungen sind jedoch in ihrem Durchmesser erheblich größer als Bandagen. Um die abgeschätzte Last von bis zu 120 Mg der Maschine inkl. Behälter mit sechs Reifen bewegen zu können, sind die Durchmesser der Luftbereifung fast doppelt so groß wie solche für Bandagen. Bauraum bedingt bedeutet das, dass Radfahrwerke mit Luftbereifungen zu erheblich größeren Maschinenabmessungen führen als es die Behälterabmessungen erfordern würden.

Mit Bandagen können durch den verringerten Durchmesser weiterhin acht Radfahrwerke beim Portal eingesetzt werden ohne die Maschinengröße negativ zu beeinflussen. Bei dieser Bereifung ist nachteilig, dass nur geringe Geschwindigkeiten gefahren werden können, um eine Überhitzung der Bandagen zu vermeiden. Außerdem ist eine ausreichende Pause im Maschineneinsatz zu berücksichtigen, damit die Bandagen Zeit haben sich abzukühlen. Herstellerseitig wurde von Fa. Continental (Hannover) abgeschätzt, dass die Bandage MH20 STB 840/500 – 559 (Continental (b), 2020) nach einem fünfstündigen Einsatz bei 2 km/h unter voller Beladung (d.h. inkl. Behälter) eine zehnstündige Pause benötigt, um der Bandage nicht zu schaden. Aufgrund der derzeitigen Einschätzungen zur Vorbereitung der Strecken und der Behälterablage innerhalb des Arbeitsablaufes im Endlagerbergwerk wird davon ausgegangen,

dass pro Arbeitstag ein bis maximal zwei Endlagerbehälter eingelagert werden. Damit können der Maschine erstens deutlich geringere Einsatzzeiten und zweitens ausreichende Pausenzeiten eingeräumt werden, wodurch die Nachteile der Bandagen gegenüber den Nachteilen der Luftbereifung ausgeglichen werden. Für die hier erarbeitete Konstruktion werden die Bandagen MH 20 STB 840/500 – 559 von Continental ausgewählt.



Abbildung 35: Bandage MH20 STB 840/500 – 559 (Continental (b), 2020)

Neben dem geringen Durchmesser der Bandage ist zu erwähnen, dass die Dicke der Vollgummischicht so gering ist, dass die Felge des Rades genügend Bauraum für einen einzelnen Radantrieb bietet. Des Weiteren ist die gewählte Bandage als Slick ausgeführt, der mit den vorausgesetzten Fahrbahneigenschaften zuretkommen sollte.

3.3.4 Fahrwerksantrieb

Für den Fahrantrieb werden Elektromotoren mit Untersetzungsgetrieben verwendet. Solche Konzepte gibt es nach aktuellem Stand von mehreren Herstellern. Für diesen Entwurf werden die Radantriebe der Fa. Bosch Rexroth (Lohr am Main) ROTATRAC gewählt. Diese Motoren werden ebenfalls für die Elektromobilität verwendet, sodass eine langfristige Verfügbarkeit sehr wahrscheinlich gegeben ist. Des Weiteren werden die Motoren flüssigkeitsgekühlt und sind somit problemlos bei höheren Temperaturen während der Einlagerung einsetzbar. Jeder Motor verfügt über eine eigene Leistungselektronik welche sich in Schaltschränken im vorderen Teil des Portals befindet. Die Redundanz des Systems ist gegeben, da selbst mit 4 Motoren eine Rückfahrt des Portals möglich wäre. Jeder der Motoren verfügt über ein maximal mögliches Antriebsmoment von 15 kNm. Die benötigte Leistung wird für folgenden Lastfall ausgelegt: Das Portal fährt voll beladen (120 Mg) mit konstanter Geschwindigkeit bei einer Steigung von 1° (α) bergauf. Bei diesen niedrigen Geschwindigkeiten wird der Luftwiderstand vernachlässigt. Der Widerstand (F_W), der überwunden werden muss, sind zunächst die Rollreibung (F_R) und die Hangabtriebskraft (F_G). Der Rollwiderstand wird mit $\mu=0,02$ angenommen.

$$F_W = F_R + F_H = F_G \times (\mu + \sin(\alpha)) = 120.000 \text{ kg} \times 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \times (0,02 + \sin(1^\circ)) = 44.088 \text{ N}$$

Daraus ergibt sich mit dem Raddurchmesser (r) und der Anzahl der Räder (n) ein notwendiges Raddrehmoment (M_R) je Rad und Motor von:

$$M_R = \frac{F_W \times r}{n_{Rad}} = \frac{44.088 \times 0,418m}{8} = 2.293 \text{ Nm}$$

Die maximal mögliche Drehmoment der Bosch Rexroth Motoren ist somit ausreichend.

3.3.5 Lenksystem

Beim Lenksystem stehen im Prinzip zwei Möglichkeiten zur Verfügung. Die erste und einfachste Variante wäre die Räder der beiden Portalseiten gegenläufig bzw. unterschiedlich schnell rotieren zu lassen. Der entscheidende Nachteil dieser Variante ist der hohe Reifenverschleiß an den 4 Radsätzen außen. Bei der anderen Variante werden die Räder in die gewünschte Fahrtrichtung gedreht. Dies kann über ein komplexes Lenkgetriebe erfolgen. Hier wird jedoch der Ansatz verfolgt, jedes Rad mittels eines Elektrozylinders zu lenken. Die Radträger sind an allen 8 Rädern identisch und drehbar im Haupträger gelagert. Am Radträger befindet sich ein Hebel, an den ein Elektrozylinder angreift. Bei der Einlenkbewegung wird berechnet, in welchen Winkel jedes Rad gestellt werden muss, da die mittleren kurvenäußeren Räder den kleinsten und die äußeren Räder im Kurveninneren den höchsten Lenkeinschlag benötigen. Der maximale Einschlagwinkel der Räder beträgt 45° .

3.3.6 Auswahl der Batterie

Für die Batterie wird eine Lithium-Eisen-Phosphat Batterie verwendet. Diese Batterien haben zwar nicht die maximal mögliche Energiedichte, dafür ist die Sicherheit dieses Batterietyps im Vergleich sehr hoch. Dieser Batterietyp erzeugt im Vergleich zu AGM (Absorbent Glass Mat) Batterien keinen Wasserstoff und neigt nicht zum „Durchgehen“ wie Li-Ion Zellchemien bei Ladung oberhalb der Ladeschlussspannung oder bei mechanischen Beschädigungen. Die schlechte Leistungsfähigkeit bei Temperaturen unter dem Gefrierpunkt ist unter Tage zu vernachlässigen. Ebenfalls sind hohe Dauerströme von bis zum 20-fachen der Nennkapazität möglich. Für die Auslegung der Batterie wird ein Einlagerungsvorgang analysiert und der Energiebedarf (E) für die einzelnen Schritte berechnet:

- Übernahme des Behälters vom Plateauwagen

$$E_H = \frac{m_H \times g \times h}{\eta_{Spindel}} = \frac{90.000 \text{ kg} \times 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \times 0,2 \text{ m}}{0,14} = 0,35 \text{ kWh}$$

- Beschleunigung der ELV mit Behälter auf 2 m/s

$$E_B = \frac{\frac{1}{2} \times m_g \times v^2}{\eta_{Antrieb}} = \frac{\frac{1}{2} \times 120.000 \text{ kg} \times (2 \frac{\text{m}}{\text{s}})^2}{0,63} = 0,105 \text{ kWh}$$

- Fahrt mit 2 m/s über 400 m

$$E_K = \frac{P \times t}{\eta_{Antrieb}} = \frac{2\pi \times M \times n \times t}{\eta_{Antrieb}} = \frac{2\pi \times 9.794 \text{ Nm} \times 0,77 \frac{1}{\text{s}} \times 200 \text{ s}}{0,63} = 4,2 \text{ kWh}$$

- Es wird konservativ angenommen, dass in der Einlagerungsstrecke ein Höhenunterschied von 1 m bewältigt werden muss

$$E_E = \frac{m_g \times g \times h}{\eta_{Antrieb}} = \frac{120.000 \text{ kg} \times 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \times 1 \text{ m}}{0,63} = 0,52 \text{ kWh}$$

- Es wird angenommen, dass der Energiebedarf beim Verzögerungsvorgang dem des Beschleunigungsvorganges entspricht

$$E_V = E_B$$

- Es wird angenommen, dass die Energie des Absenkungsvorganges der des Hubvorganges entspricht

$$E_A = E_H$$

- Das unbeladene Portal wiegt 58 % des beladenen Portals; somit wird für die Rückfahrt nur 58 % der Energie benötigt.

Die Gesamtkapazität der Batterie muss mindestens für einen Einlagerungsvorgang ausreichen. Dabei wird eine Sicherheit von 3 zugrunde gelegt um Degradation und weiteren Leistungsbedarf abdecken zu können.

$$E_{ges} = 3 \times (2E_H + 1,58E_B + 1,58E_K + 1,58E_E) = 25 \text{ kWh}$$

Somit wird eine Batteriegröße von 25 kWh benötigt. Eine solche Batterie würde in etwa 280 kg wiegen und ein Volumen von 0,25 m³ haben. Sowohl Baugröße wie auch Volumen sind problemlos auf den Grundträgern des Portals unterzubringen, ohne die Außenmaße zu erhöhen.

3.3.7 Behälteraufnahme – Tragwerk und Tragbalken

Das Konzept der Tragbalkenlösung wurde von der ELV für die vertikale Bohrlochlagerung übernommen (Filbert et al., 2010). Aufgrund ähnlich dimensionierter Masse und Maßen der Abfallgebinde, kann das Tragwerk ebenfalls POLLUX®-Behälter aufnehmen. Eine Differenz

zwischen dem Transferbehälter der vertikalen Bohrlochlagerung und dem POLLUX®-Behälter liegt in der unterschiedlichen Höhendifferenz der Tragzapfenlage. An beiden Behältern liegt ein Tragzapfenpaar höhenverschoben zum anderen vor. Die Höhendifferenz ist allerdings nach den jeweils vorliegenden Behälterzeichnungen unterschiedlich. Daher wird die Lage der Schlüssellochkontur passend zum POLLUX®-Behälter platziert. Die Tragbalken sind über jeweils 2 Bolzen befestigt. Dadurch ist ein einfacher Wechsel der Tragbalken möglich. Dies ist besonders vorteilhaft, sollten mehrere Behältertypen im Endlager eingelagert werden.

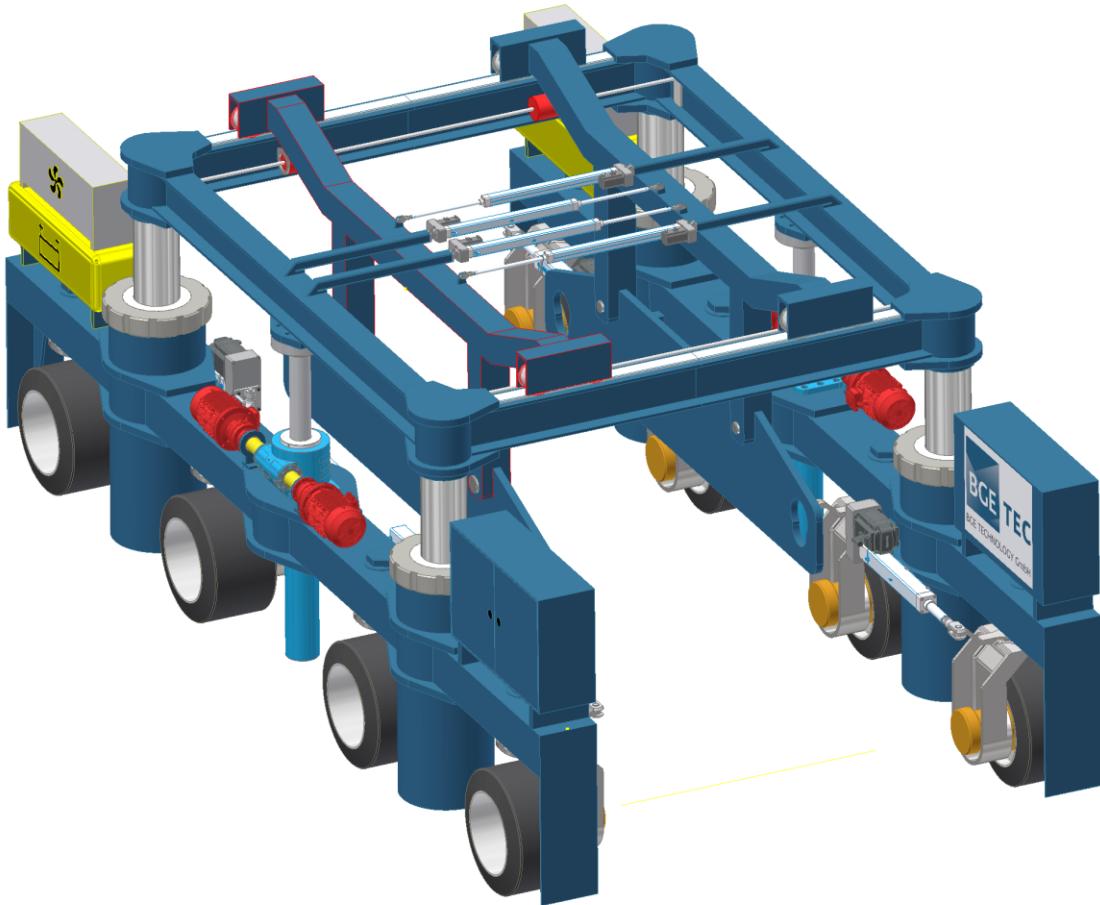


Abbildung 36: Ansicht des Portals von oben; gut sichtbar das Tragwerk mit Verschiebezylindern und Tragbalken mit Bolzenbefestigung

Wie in Abbildung 36 zu sehen, wird das Tragwerk mit Hilfe von Zylindern verschoben. Die Verschiebung führt die Tragbalken zum Aufnehmen oder Ablegen des Behälters zu den Tragzapfen bzw. von diesen weg. Da aufgrund des radgebundenen Transportsystems, im Vergleich zu einem gleisgebundenen, die Ausrichtung zum Plateauwagen deutlich schwieriger ist, besteht ebenfalls die Möglichkeit, die Tragbalken synchron seitlich zu verfahren um auch außermittig platzierte Behälter aufnehmen zu können. Erst mit Hilfe der Hubbewegung durch die Gewindespindeln werden die Tragzapfen des Behälters in der Schlüssellochkontur des Tragbalkens arretiert und der Behälter wird vom Portal aufgenommen. Durch diese Entkopplung der Hubbewegung mit der Positionierung des Tragbalkens, liegt auf dem Antrieb zur Verschiebung des Tragwerks keine Last, wenn der Behälter aufgenommen wird. Die Tragwerke werden nur verfahren, wenn das Abfallgebinde auf Plateauwagen bzw. der Sohle oder einem Sockel

aufliegt. Des Weiteren verfügt das Tragwerk über vier elektrisch betätigten Bremsaktuatoren um die Last beim Transport zu sichern. Jeder dieser vier Aktuatoren verfügt über 40 kN Haltkraft.

3.3.8 Steuerung und Elektronik

Bei der Entwicklung einer neuen Maschine entfällt heute auf die Entwicklung der Steuerung und Regelung ein großer Zeitanteil. Dieser wird meist unterschätzt, da die Software an einer Maschine nicht sichtbar in einer entsprechend ihres Zeitbedarfes großen Hardwarekomponente vorliegt. Auch schon bei der Entwicklung der Einlagerungsvorrichtung in Strecken in Engelmann et al. (1995) wurde der Testbetrieb durch unzureichende Programmierung behindert. Demnach werden meist erst bei der Erprobung eines Prototypens und im Mock-up, wenn der Prototyp im gesamten Maschinenverbund agieren kann, fehlerhafte Programmierungen sichtbar. Diese zu beheben erfordert ebenfalls einen großen Zeitanteil, da zunächst die Logik der Programmierung nachvollzogen und die fehlerhafte Stelle im Programmcode identifiziert werden muss. Sollte außerdem für die Einlagerung ein teilautonomer Betrieb angestrebt werden, vervielfacht sich der Aufwand der Programmierungsleistungen. Programmierarbeiten wurden im Rahmen dieses Vorhabens nicht durchgeführt.

Seit Engelmann et al. (1995) gab es im Bereich der Sensorik und der Positionserkennung zahlreiche Weiterentwicklungen. Gerade durch die Forschung an autonom fahrenden PKW wurden neue leistungsfähige Sensorsysteme erforscht und entwickelt. Sensorik für die Positionierung des Portals und die Hinderniserkennung kann man in Nah-, Mittel- und Fernfeldüberwachung unterteilen. Grundsätzlich ist für den Einsatz der verschiedenen Technologien zu prüfen, inwieweit die radioaktive Strahlung in der Nähe der Abfallgebinde die Funktionsfähigkeit beeinträchtigen kann bzw. inwiefern durch konstruktiven Mittel eine ausreichende Abschirmung der Sensoren erreicht werden kann.

Zunächst muss der Nahfeldbereich um die Vorrichtung überwacht werden. Abstände können mithilfe von Ultraschallsensoren bis auf den mm genau erkannt werden und so vor Kollisionen waren. Diese Sensoren haben Reichweiten bis 6 m und eine Messgenauigkeit von 0,3 % (Texas, 2021). Eine weitere Möglichkeit, um die Genauigkeit im Nahfeld zu steigern, wäre ein 77Ghz Radarsystem (Blickfeld, 2021). Dieses hat eine Reichweite von 10 bis 0,5 m und deckt den Bereich zwischen Ultraschallsensoren und Lidar (light detection and ranging) ab. Zusätzlich wird der Bereich um die Einlagerungsvorrichtung mit Kameratechnik überwacht. Für die Überwachung des Mittel- und Fernfeldes kann ein Solid State 3D Lidar-System zum Einsatz kommen. Diese Systeme befinden sich derzeit in der Entwicklung. Jedoch bieten sie gegenüber konventionellen Lidar-Systemen entscheidende Vorteile. Da diese Systeme über keine mechanisch bewegten Bauteile verfügen, sind diese gut gegen Umwelteinflüsse zu kapseln. Eine aufwändige Wartung von verschlissenen Bauteilen sowie eine Empfindlichkeit gegen Vibratoren entfällt ebenfalls. Ein Lidar-System tastet die Umgebung mithilfe eines Laserstrahles ab. Der Strahl wird an Objekten reflektiert und teilweise zurückgeworfen. Aus der gemessenen Laufzeit der Reflexion kann die Position des Hindernisses ermittelt werden. Ein Lidar System gibt die Umgebung als Messpunktewolke aus. Diese Daten können zu einem 3D Bild auf-

bereitet werden. Damit erfährt der Maschinenführer genau, an welcher Position sich die Maschine in der Strecke befindet. Somit können Hindernisse wie ein anderes Fahrzeug bereits aus 50 m und mehr erkannt werden. Im Gegensatz zur Kameratechnik wird das Lidar nicht durch schlechte Sicht oder mangelnde Beleuchtung behindert (Blickfeld, 2021). Die Minimalreichweite dieser Sensoren liegt jedoch bei 5 m.

3.3.9 Konstruktionsbeschreibung Plateauwagen

Die Konstruktion des Plateauwagens gliedert sich in den Unterwagen mit Fahrgestell sowie den Oberwagen. Der Unterwagen des Plateauwagens inklusive dem Fahrgestell wurde von der Konstruktion des Plateauwagens der vertikalen Bohrlochlagerung übernommen. Das maximale Gewicht der POLLUX®-Behälter liegt unterhalb des Gewichtes des beladenen Transferbehälters, der bei der vertikalen Bohrlochlagerung zum Einsatz kommt. Unterbau und Fahrgestell sind daher für den Transport der POLLUX®-Behälter ausreichend dimensioniert. Der Oberwagen aus der vertikalen Bohrlochlagerung wurde an die Maße des POLLUX®-10-Behälters nach WTI (2020) angepasst. Es wird davon ausgegangen, dass nur eine Behältervariante je Plateauwagen zum Einsatz kommt. Für unterschiedliche Behältergrößen kann die Tragwanne des Oberwagens leicht konstruktiv angepasst werden. Im Vergleich zur Konstruktion bei der vertikalen Bohrlochlagerung entfallen an der Tragwanne die Aussparungen für die Behälterschleusen.

Weiterhin zu beachten ist, dass die Aufnahmepunkte für die Tragzapfen zwischen dem vorderen und dem hinteren Paar eine Höhendifferenz aufweisen. Konstruktiv wird dies durch die Tragzapfengestaltung des POLLUX®-Behälters vorgegeben. Eine entsprechende Ausrichtung während der Behälterüberladungen ist zu berücksichtigen, um unnötige Rangierarbeiten zu vermeiden. Zur Unterstützung des Arbeitsablaufes kann eine unterschiedliche Markierung der Tragzapfenpaarungen sowie der Tragzapfenaufnahmen am Oberwagen und am Portal hilfreich sein. Abbildung 37 zeigt das Modell des Plateauwagens für die Streckenlagerung.

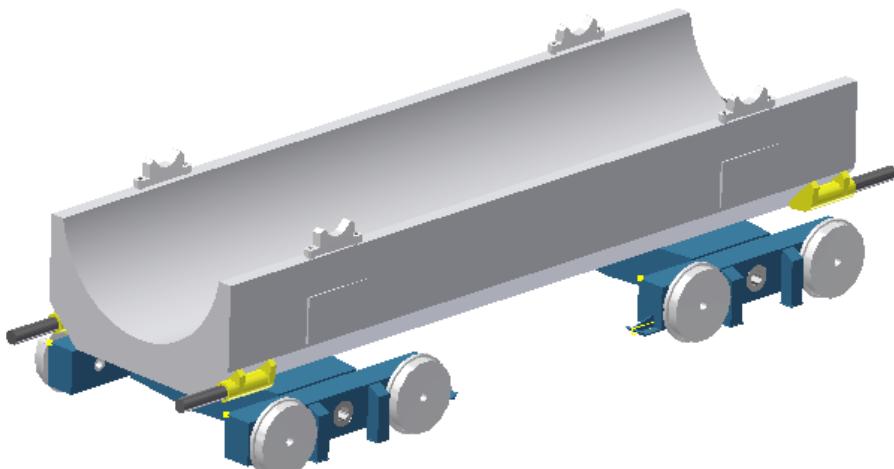


Abbildung 37: Plateauwagen zum gleisgebundenen Transport des POLLUX®-10

3.3.10 Arbeitsablauf Einlagerung

Da das entwickelte Portal selbstfahrend ist, unterscheidet sich der Betriebsablauf bei Einlagerung von dem in Engelmann et al. (1995). Der in Abbildung 38 dargestellte Einlagerungszyklus ermöglicht es, den Streckenquerschnitt der Einlagerungsstrecken zu minimieren, da keine Umladevorgänge in den Einlagerungsstrecken selbst stattfinden. Auch die Abzweigungen zwischen Querschlägen und Einlagerungsstrecken können aufgrund des kleinen Wendekreises des Portals enger als auf Schienen ausgeführt werden.

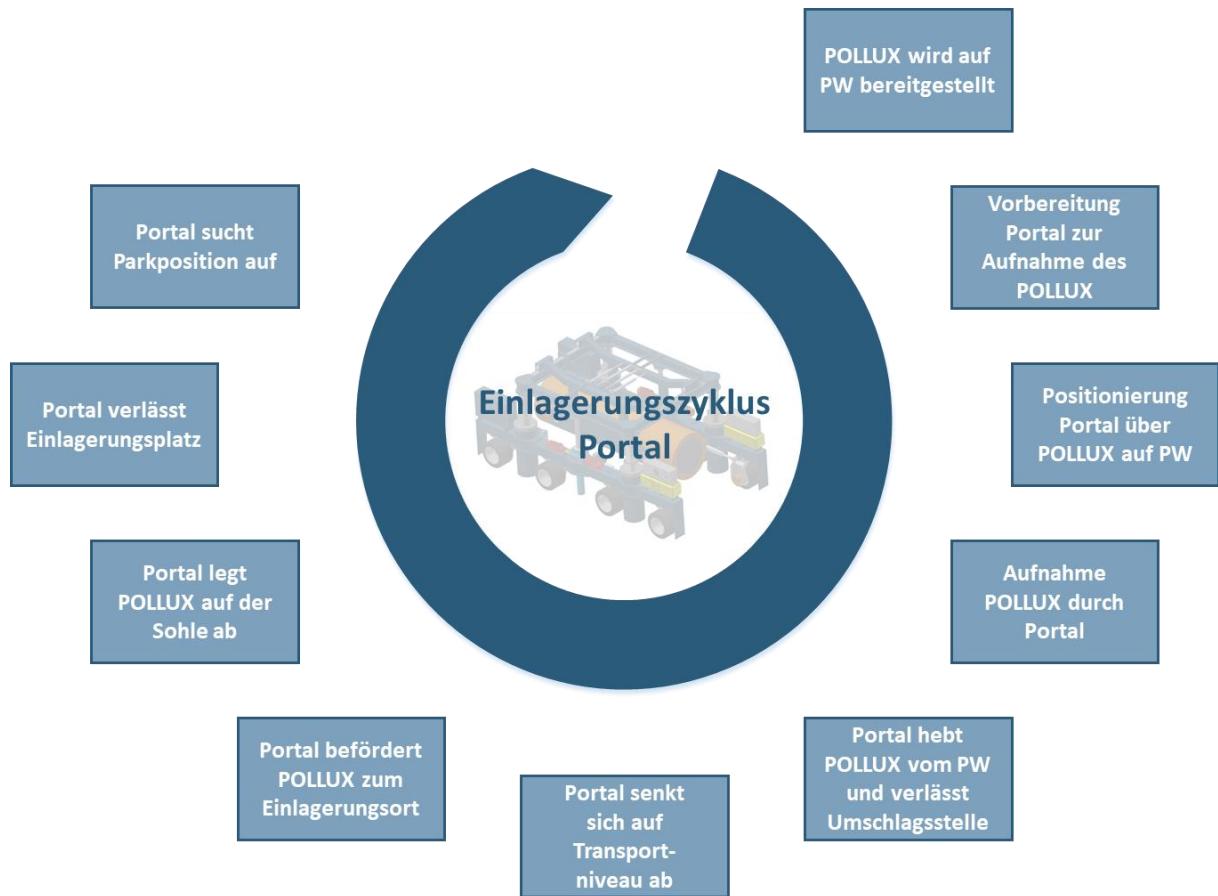


Abbildung 38: Betriebsablauf im Einlagerungszyklus der Streckenlagerung bei Verwendung des Portals zur Einlagerung in Strecken

Der Einlagerungszyklus unterteilt sich in zehn Arbeitsschritte. Er beginnt mit der Bereitstellung des Abfallgebinde auf dem Plateauwagen (PW) und endet mit dem Aufsuchen einer Parkposition, in der das Portal die Möglichkeit hat, aufgrund des Fahrwerks geforderte Pausenzeiten abzuwarten und seine Batterie aufzuladen.

3.3.11 Ablage mit Auflager in der Strecke

Für die Streckenlagerung im Tongestein und Kristallingestein wird in der Regel ein Sockel aus verfestigten Betonitblöcken für die Ablage des Abfallgebinde vorgesehen (z. B. in Bertrams

et al., 2017; Jobmann & Lommerzheim, 2014). Für die Herstellung dieses Sockels gibt es verschiedene konstruktive Möglichkeiten. Die Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (NAGRA) der Schweiz erforscht z. B. ein gemauertes Auflager bestehend aus relativ kleinen Bentonit-Blöcken (Köhler et al, 2015; Abbildung 39).



Abbildung 39: Manuell erstelltes Bentonitauflager im FE-Experiment der NAGRA (Köhler et al., 2015)

Ein per Hand gemauerter Bentonit-Sockel stellt im Betriebsablauf eines Endlagers wahrscheinlich eine erhebliche Zeitverzögerung dar und erfordert darüber hinaus Personaleinsatz in den Einlagerungsstrecken. Daher bietet sich, aus Sicht der Herstellung des Sockels, für die Streckenlagerung im Tongestein die Ablage des POLLUX®-Behälters auf gleichförmigen, aneinander gereihten Bentonit-Blöcken (Abbildung 40) an. Dabei ist darauf zu achten, dass die Blöcke nicht zu groß gestaltet werden, um durch die verwendeten Maschinen bei der Einlagerung handhabbar zu bleiben. In Saari et al. (2010) hat POSIVA berichtet, dass große Bentonit-Blöcke aufgrund von Fertigungsungenauigkeiten meist aufwendig nachbearbeitet werden mussten, sodass kleinere Elemente der Bentonit-Blöcke bevorzugt werden sollten. Demnach sind die Spaltgröße zwischen den Elementen des Sockels und Aspekte wie die Verfüllung mit Versatzmaterial und die Langzeitstabilität der so geformten Bentonit-Umgebung weiter zu untersuchen.

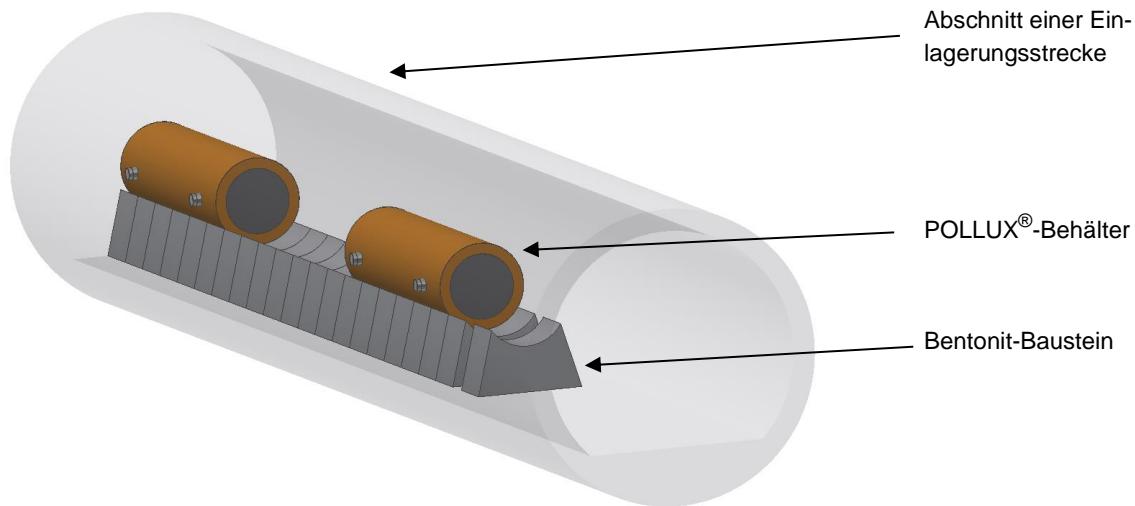


Abbildung 40: Sockelkonzept für POLLUX®-Behälter in der Streckenlagerung

Vorteile eines solchen Bentonit-Sockels ergeben sich durch die kontinuierliche maschinelle Erstellbarkeit des Damms. Der Aufbau des Sockels ist dadurch vereinfacht, dass es nur eine einzige Form der Bausteine gibt. Die Blöcke können demnach in kontinuierlicher Arbeitsweise und gleichem Verfahren aneinander gereiht werden.

Zur Handhabung der Bentonit-Formsteine kann eine Saugglocke, vergleichbar mit derjenigen aus Saari et al. (2010) verwendet werden (Abbildung 41). Vorstellbar ist eine Saugglockenkonstruktion, welche durch die Tragzapfenaufnahme, des Portals aufgenommen werden kann. Dadurch können ein oder mehrere Formsteine aus einem Transportcontainer herausgehoben, zum Einlagerungsort transportiert und dort abgestellt werden. Vorteilhaft hierbei ist es, dass keine neue Maschine im Endlagerbetrieb notwendig wird und das die Saugglocke als Hebewerkzeug autark funktioniert. Außerdem kann durch die steife Verbindung zwischen Tragzapfenaufnahme und Hebeworkzeug eine genaue und sensorbasierte Ablage durchgeführt werden. Dadurch bleibt auch eine unbemannte Einlagerung weiterhin möglich.



Abbildung 41: Autarke Saugglocke von POSIVA zum Anheben von Bentonitblöcken mit Hilfe eines

Hallenkrans (Saari et al., 2010)

Bislang wurde noch kein Bentonitsockel für die Ablage von Abfallgebinden in Strecken innerhalb der Endlagerkonzepte in Deutschland dimensioniert. Bei einer Ablage des Behälters auf einem Sockel ist zu prüfen, ob die Hubhöhe des Portals zum Abheben vom Plateauwagen und Absetzen auf der Sohle zu diesem Zweck ebenfalls ausreichend bemessen ist. Andernfalls sind dadurch bedingte Änderungen an der Portalkonstruktion, wie die Anpassung der Stützen und Gleitzylinder, vorzunehmen.

4 Technik der vertikalen Bohrlochlagerung

4.1 Anforderungen

Die Beschreibung der Anforderungen an die Transport- und Einlagerungstechnik der Einlagerungsvariante Vertikale Bohrlochlagerung beginnt mit der Erläuterung der erforderlichen Funktionen für die Umsetzung der Transport- und Einlagerungsvorgänge. Darauf folgend werden Anforderungen ausgeführt, die sich aus den Randbedingungen des Endlagerbetriebs, den ermittelten Funktionen und weiteren technischen Sachverhalten ergeben.

Da in diesem Vorhaben überwiegend Weiter- und keine Neuentwicklungen angestrebt werden, wird in den Anforderungen an die Transport- und Einlagerungstechnik zur vertikalen Bohrlochlagerung der konzeptionelle Aufbau der bestehenden Einlagerungsvorrichtung (ELV) aus dem Vorhaben Filbert et al. (2010) in den folgenden Beschreibungen berücksichtigt.

Vorgehensweisen, die sich aus Vorschriften und Normen ergeben, werden im Text an den passenden Stellen aufgeführt. Die im Maschinenbau einschlägigen Normen, insbesondere mit Bezug zur Maschinensicherheit, werden berücksichtigt, z. B. das ProdSG oder DIN EN ISO 12100. Von besonderer Wichtigkeit sind die KTA.

4.1.1 Allgemeine Funktionsbeschreibung

Die Einlagerungsvorrichtung soll dazu dienen, Transferbehälter, beladen mit einer BSK, von einem schienengebundenen Transportfahrzeug aufzunehmen und anzuheben, um das anschließende Entfernen des Transportfahrzeugs zu ermöglichen. Die Längsachse des Transferbehälters wird anschließend von der horizontalen Ausrichtung des Transports in die Vertikale überführt. Sobald die vertikale Positionierung des Transferbehälters über der Bohrlochschleuse verifiziert ist, wird der Transferbehälter abgesenkt und mit der Schleuse verbunden. Dabei werden Riegel in der Schleuse gelöst und diese für eine Öffnung freigegeben. Das Absenken der BSK in das vertikale Bohrloch wird vorbereitet, indem die Behälterschleuse auf der Oberseite des Transferbehälters geöffnet und ein Greifhaken abgesenkt wird. Dieser Greifhaken verbindet sich mit der BSK. Anschließend wird diese angehoben und die untere Schleuse geöffnet. Die BSK wird mit Hilfe einer Seilwinde in das Bohrloch abgelassen. Der Haken wird von der abgelegten BSK gelöst und das Seil aus dem Bohrloch gezogen. Die Schleusen werden geschlossen und der Transferbehälter durch die Einlagerungsvorrichtung gehoben und gedreht. Das schienengebundene Transportfahrzeug fährt unter die Einlagerungsvorrichtung. Diese wird abgesenkt und legt den Transferbehälter ab. Der Transferbehälter wird abtransportiert. Der Einlagerungsvorgang muss reversibel sein. Alle eingesetzten Werkstoffe müssen den Bedingungen unter Tage gerecht werden. Die geforderten Arbeitsschritte werden wie folgt zusammengefasst:

- 1 Positionierung der Einlagerungsvorrichtung über der Bohrlochschleuse
- 2 Positionierung des Plateauwagens mit Transferbehälter unter der Einlagerungsvorrichtung
- 3 Aufnahme des Transferbehälters vom Plateauwagen
- 4 Anheben des Transferbehälters; Plateauwagen verlässt den Arbeitsbereich der Einlagerungsvorrichtung
- 5 Drehen der Längsachse des Transferbehälters von der horizontalen in die vertikale Ausrichtung
- 6 Absenken des Transferbehälters auf die Bohrlochschleuse und Entriegelung dieser
- 7 Absenken der Abschirmhaube auf den Transferbehälter und Entriegelung der oberen Schleuse
- 8 Öffnen der oberen Schleuse des Transferbehälters
- 9 Aufnehmen und Anheben der BSK durch die Lastanschlagvorrichtung der Seilwinde der Einlagerungsvorrichtung
- 10 Öffnen der Bohrlochschleuse und der unteren Schleuse des Transferbehälters
- 11 Absenken der BSK in das Bohrloch
- 12 Lösen der Lastanschlagvorrichtung und Anheben dieser bis oberhalb des Transferbehälters
- 13 Schließen der Bohrlochschleuse und der Schleusen des Transferbehälters
- 14 Anheben der Abschirmhaube
- 15 Heben und Schwenken des Transferbehälters in die Horizontale und Anheben für die Verladung
- 16 Einfahren des Plateauwagens unter die Einlagerungsvorrichtung
- 17 Absenken des Transferbehälters, um ihn auf dem Transportwagen abzulegen
- 18 Abtransport des Plateauwagens mit leerem Transferbehälter

4.1.2 Maße und Massen der Abfallgebinde

Bestehende Konzepte für Abfallbehälter wurden bereits in Kapitel 2.3 dargestellt. Für die vertikale Bohrlochlagerung wird in den Wirtsgesteinen Steinsalz und Tongestein die dort beschriebene rückholbare Brennstabkokille BSK-R verwendet. Die technischen Daten sind in Tabelle 6 aufgeführt.

Tabelle 6: Technische Daten der konisch geformten, rückholbaren Brennstabkokille BSK-R (Bollingerfehr et al., 2012)

	Länge/Höhe [mm]	Durchmesser (mm)	Abfallgebindemasse (Mg)
BSK-R	5.060	470-520	5,3

Für die Einlagerung im Kristallingestein wird auf kupferummantelten Behälter auf Basis der BSK zurückgegriffen. Die Stärke des Kupfermantels beträgt bis zu 50 mm. Daraus ergeben sich die technischen Daten, wie sie in Tabelle 7 aufgelistet sind.

Tabelle 7: Technische Daten der kupferummantelten Brennstabkokille BSK-Cu (Bertrams et al., 2017)

	Länge/Höhe [mm]	Durchmesser (mm)	Abfallgebindemasse (Mg)
BSK-Cu	5.080	530-540	9,8

Die Weiterentwicklung der Transport- und Lagertechnik berücksichtigt beide Behältertypen und ist mithin für die größere und schwerere BSK-Cu auszulegen. Für beide Behältertypen wird davon ausgegangen, dass ein Tragpilz zum Greifen der BSK zur Verfügung steht. Grundsätzlich ist gerade für kupferummantelte BSK eine Ringnut denkbar (Bertrams et al., 2017), für die ein vollständig anderer Greifmechanismus zum Einsatz käme.

Entsprechend den Erläuterungen in Kapitel 2.3.2 wird beim Transport von BSK ein abschirmender Transferbehälter benötigt. Im Rahmen dieses Vorhabens wird davon ausgegangen, dass ein Transferbehälter für die BSK-Cu dieselben Abmessungen (Länge und Durchmesser außen) besitzt wie der Transferbehälter der BSK, da das Kupfer der BSK-Cu eine höhere Dichte als der Gusswerkstoff des Transferbehälters und damit eine mindestens so gute Abschirmwirkung wie die äquivalente Schicht an Gusswerkstoff besitzt. Der Innenraum des Transferbehälters vergrößert sich also, ohne dass sich seine Außenmaße verändern.

In der Tabelle 8 sind die wichtigsten Daten des Transferbehälters zusammengestellt.

Tabelle 8: Abmessungen und Masse des Transferbehälters (Bollingerfehr et al., 2011)

	Länge/Höhe [mm]	Durchmesser ohne/mit Zapfen [mm]	Behälter- volumen [m³]	Behältermasse [Mg]
Transferbehälter	5.570	1.305/1.530	7,4	Ca. 45,7

4.1.3 Fahrbahn

Für die Einlagerung in vertikaler Bohrlochlagerung wurde in Filbert et al. (2010) eine Fahrbahn entwickelt. Deren technischen Daten werden auch in diesem Vorhaben zugrunde gelegt:

- Spurbreite: 1.990 mm
- Schienenprofil: Vignolschiene 60E1 (UIC 60), alternativ Rillenschiene RiPh37A
- Gütegrad: R260

4.1.4 Weitere allgemeine Anforderungen

Neben den baugruppenspezifischen Funktionen und Anforderungen bestehen Anforderungen an die Transport- und Einlagerungstechnik, die sich aus den Umweltbedingungen und weiteren Randbedingungen ergeben. Diese sind in der folgenden Liste aufgeführt:

- Trockentemperatur der Wetter ca. 40° C, max. 52° C
- Der Einlagerungsvorgang muss grundsätzlich reversibel sein
- Luftfeuchtigkeit variiert je nach Wirtsgestein
- Anwesenheit von Staub (korrosiv und/oder abrasiv)
- Gesteinsfestigkeit variiert: Salz 15-25 MN/m², Kristallin ab 100 MN/m²
- In einem Endlager in Tongestein werden sämtliche Grubenräume mit Beton ausgebaut. Die Fahrbahn wird entsprechend der Anforderungen aus der betrieblichen Belastung hergestellt.
- Max. Streckengefälle 1°
- Fahrbahn Untergrund: Steinsalz, Kristallingestein oder hergestellte Fahrbahn, z. B. aus Schotter
- Automatisches Feuerlöschesystem, Pulverlöschanlage
- Oberflächen dekontaminierbar
- Gedichtete und gekapselte Lager
- Möglichst wartungsarme Konstruktion
- Alle Verschleißteile und Wartungspositionen einfach zugänglich
- Möglichst geringe Brandlast mit zugelassenen Schmierstoffen und Fluiden
- Schachttransport muss in Einzelteilen möglich sein. Zerstörungsfrei trennbare Verbindungen sind zu bevorzugen. Schweißen nur in Ausnahmefällen zulässig.
- Erhöhte Sicherheitsanforderungen sind durch Redundanz und hohe Sicherheitsfaktoren zu berücksichtigen
- Möglichst kompakte Bauweise
- Sonderanfertigungen sind zu vermeiden. Bei Funktionsteilen möglichst auf Serienkomponenten oder seriennahe Teile zurückgreifen.

4.1.5 Anforderungsliste – Einlagerungsvorrichtung

Für die Einlagerungsvorrichtung ergeben sich folgende konkrete Funktionen und Anforderungen:

Erforderliche Funktionen:

- Aufnehmen des Transferbehälters vom Plateauwagen
- Drehen des Transferbehälters in die Vertikale
- Öffnen und schließen der oberen Schleuse des Transferbehälters
- Verankern der BSK mittels Lastanschlagmittel
- Absenken der BSK in das Bohrloch
- Lösen der Verankerung an der BSK und heben des Seils
- Ablegen des Transferbehälters auf den Plateauwagen

Anforderungen:

- Mit Bohrlochkeller (Salzgestein, Tongestein), ohne Bohrlochkeller (Kristallingestein)
- Bauhöhe so gering wie möglich in jedem Betriebszustand
- Energieversorgung über Grubenstrom
- Selbsthemmende Antriebe sind zu bevorzugen
- Vorrichtung zum Aufnehmen des Transferbehälters
- Vorrichtung zum Drehen des Transferbehälters in die Vertikale
- Vorrichtung zum Absenken des Transferbehälters
- Vorrichtung zum Öffnen der Schleusen des Transferbehälters
- Hebevorrichtung für BSK entsprechend KTA 3902
- Vorrichtung zum Greifen der BSK
- Fernbedien- und überwachbar vom Leitstand
- Möglichkeit des Transportes der Vorrichtung auf Plateauwagen
- Förderseillängen für eine Bohrlochteufe von bis zu 300 m (im Salzstock) und Tongestein/Kristallingestein (bis zu 50 m)
- Einlagerungsvorgang muss reversibel sein
- Drehungsfreie Drahtseile sind zu verwenden, wenn nur ein Laststrang besteht

4.1.6 Anforderungsliste – Transportwagen

Für den Transportwagen ergeben sich folgende konkrete Funktionen und Anforderungen:

Erforderliche Funktionen:

- Transport des Transferbehälters über Gleisnetz
- Transport der ELV über Gleisnetz
- Koppelbar mit Lokomotive

Anforderungen:

- Max. 5 km/h (2,5 km/h bei Weichenüberfahrt) Höchstgeschwindigkeit für Transport
- Feststellbremse
- Antrieb erfolgt über Lokomotive
- Keine Betriebsbremse vorgesehen
- Zul. Achslast max. 20 Mg
- Gleisgebunden
- möglichst geringen Gleisverschleiß berücksichtigen
- gefederte Aufnahmepunkte für Transferbehälter
- zusätzliche Dämpfung wird nicht als nötig erachtet
- Signaleinrichtungen für Fahrt in beide Richtungen
- Radbruchsicherung vorsehen
- Anschlagpunkte für das Aufgleissystem
- Energieversorgung über Koppelung mit Lokomotive

4.1.7 Anforderungsliste – Bohrlochschleuse

Für die Bohrlochschleuse ergeben sich folgende konkrete Funktionen und Anforderungen:

Erforderliche Funktionen:

- Schutz vor Staub und Strahlungsaustritt aus Bohrloch
- Absaugvorrichtung für im Bohrloch entstandene Gase und Stäube
- Kopplung mit dem Transferbehälter und der Bohrlochverrohrung (Vermeidung der Freisetzung von Radionukliden)
- Öffnen und Schließen des Bohrlochs bei Bedarf und nur bei korrekt aufgesetztem Transferbehälter

Anforderungen:

- Transportabel von Bohrloch zu Bohrloch
- Energieversorgung über Grubenstrom oder ELV
- Mechanische (und/oder elektrische) Schnittstelle zu ELV
- Anschluss für Absauganlage
- Möglichkeit der Notver-(ent-)riegelung
- Die Bohrlochschleuse muss mit dem Bohrlochliner dicht verschraubt werden können. Zwischen Liner und Bohrlochschleuse ist eine Dichtung vorzusehen

4.1.8 Anforderungen – Lokomotive

In Engelmann et al. (1995) und Filbert et al. (2010) wurde als Antriebsmaschine eine batteriebetriebene Lokomotive verwendet. Eine solche kommt auch weiterhin zum Einsatz. Jedoch wird die bekannte Lokomotive durch eine moderne batteriebetriebene Lokomotive ersetzt, die den aktuellen Anforderungen genügt. Für die vertikale Bohrlochlagerung ist eine Spurbreite von 1.990 mm zur Überfahrung der Bohrlöcher notwendig, ansonsten gelten die Anforderungen wie in Kapitel 3.1.7.

Da die Antriebsmaschine in allen Einlagerungsvarianten verwendet wird, wird sie gesondert in Kapitel 8 vorgestellt.

4.2 Bedarf zur Weiterentwicklung

4.2.1 Bohrlochkeller und Widerlager eines Bohrlochverschlusses

In den parallel zu TREND laufenden Vorhaben ANSICHT II (FKZ 02 E 11658B), CHRISTA II (FKZ 02 E 11617A) und KOREKT (FKZ 02 E 11728), für die noch keine Abschlussberichte vorliegen, wird u.a. die Einlagerung von Abfallgebinden in vertikale Bohrlöcher betrachtet. Während die Vorhaben ANSICHT und CHRISTA ihren Fokus auf der Langzeitsicherheit für

Endlager im Tongestein bzw. Kristallingestein haben, beschäftigt sich KOREKT mit der Rückholung von Abfällen eines Endlagers im Kristallingestein. Die bestehende Einlagerungstechnik zur Einlagerung in vertikalen Bohrlöchern wurde jedoch für die Endlagerung in Steinsalz entwickelt und erprobt. Sie erfordert für die vertikale Positionierung des Abfallgebides über dem Bohrloch einen sogenannten Bohrlochkeller, ein frei geschnittenes Volumen unterhalb der Sohle. Für die Einlagerung in Steinsalz stellt die Herstellung des Bohrlochkellers, z. B. mit einer Kettenschrämmmaschine, kein Problem dar. Nachteilige Einflüsse auf die Langzeitsicherheit konnten ebenfalls nicht festgestellt werden (Bollingerfehr et al., 2012, Bollingerfehr et al., 2018). Die Forschung zur Endlagerung und Rückholung im Tongestein sowie Kristallingestein stieß aber auf wesentliche offene Fragen in Bezug auf das Nahfeld eines Bohrlochs, inklusive des Bohrlochkellers, wenn diese Einlagerungsvariante und -technik ohne Anpassung auf diese Wirtsgesteine übertragen wird. Änderungen am Einlagerungsort verändern die Randbedingungen zur Weiterentwicklung der Einlagerungstechnik. Deshalb wird in diesem Vorhaben zunächst eine Lösung für die Geometrie des Nahfelds eines Bohrlochs erarbeitet. Diese Geometrie stellt dann eine Grundlage für die technische Weiterentwicklung der Einlagerungstechnik dar. Die wesentlichen offenen Fragen zum Bohrlochkeller in Tongestein und Kristallingestein sind im Folgenden aufgelistet:

1. Der technische, zeitliche und finanzielle Aufwand zur Erstellung aller Bohrlochkeller wird im harten und abrasiven Kristallingestein als enorm eingeschätzt. Weiterhin steigt durch die Einlagerung von nur bis zu 3 BSK je Bohrloch der spezifische Aufwand gegenüber dem ursprünglichen Konzept im Steinsalz signifikant an. Die Herstellbarkeit von Bohrlochkellern im Tongestein, das als druckhaft angenommen wird, ist aufgrund der gebirgsmechanischen Randbedingungen sehr fragwürdig.
2. Die Erstellung des Bohrlochkellers erzeugt eine zusätzliche Auflockerungszone in der Kontur des Bohrlochkellers. Diese ist für den sicheren Einschluss nachteilig, wenn in räumlicher Nähe ein Bohrlochverschluss vorgesehen ist und/oder Anforderungen an die Gebirgspermeabilität und Klüftigkeit gestellt werden. Da davon ausgegangen wird, dass ein Bohrlochverschluss im Barrierensystem aufgrund des vertikalen Einbaus ohne Firstspaltproblematik die qualitativ hochwertigste geotechnische Barriere für den sicheren Einschluss darstellt, ist er von besonderer Bedeutung. Seiner Optimierung ist der Vorzug zu geben gegenüber der in Sicherheitskonzepten oft geforderten Minimierung von Hohlraumvolumen und Streckenquerschnitten.
3. Anzahl und Nähe der Bohrlochkeller zueinander verursachen eine sehr aufwändig zu erstellende Streckenkontur.

Ein einzelner Bohrlochkeller hatte in Filbert et al. (2010) eine Länge von 5,5 m, eine Breite von 2,2 m und eine Tiefe von 2,85 m. Im Kristallingestein, gerade im Konzept mit multiplem ewG, wird angestrebt, aufgrund der angeführten Argumente auf den Bohrlochkeller zu verzichten. Für diesen Fall wird im Folgenden ein Lösungsvorschlag unterbreitet. Statt des Bohrlochkellers wird die Sohle ca. 60 cm hoch mit einem Material aufgefüllt, das als Gleisbett dienen kann (z. B. Schotter). Die Position der Bohrlochschleuse über den Bohrlöchern wird ausgespart, sodass die Bohrlochschleuse direkt auf dem Gestein aufliegen kann. Dieses Konzept wird in Abbildung 42 skizziert. Dadurch, dass die Bohrlochschleuse in die Sohlauffüllung versenkt wird, wird ein Aufprall eines aus der Horizontalen fallenden Transferbehälters in der Auffüllung gedämpft, sodass er nicht unmittelbar auf die Bohrlochschleuse aufschlagen kann. Durch den

Verzicht auf den Bohrlochkeller muss die Einlagerungsvorrichtung (ELV) in die Lage versetzt werden, den Transferbehälter soweit anzuheben, dass er über der Fahrbahn frei gedreht werden kann. Dadurch vergrößert sich die Bauhöhe der ELV und damit auch die notwendige Firsthöhe der Einlagerungsstrecke. Der Verzicht auf den Bohrlochkeller im Kristallingestein führt mit dem bestehenden Konzept der Einlagerungsvorrichtung also zu deutlich größeren Streckenquerschnitten, weshalb es sinnvoll erscheint, auch über ein anderes Maschinenkonzept für diesen Fall nachzudenken.

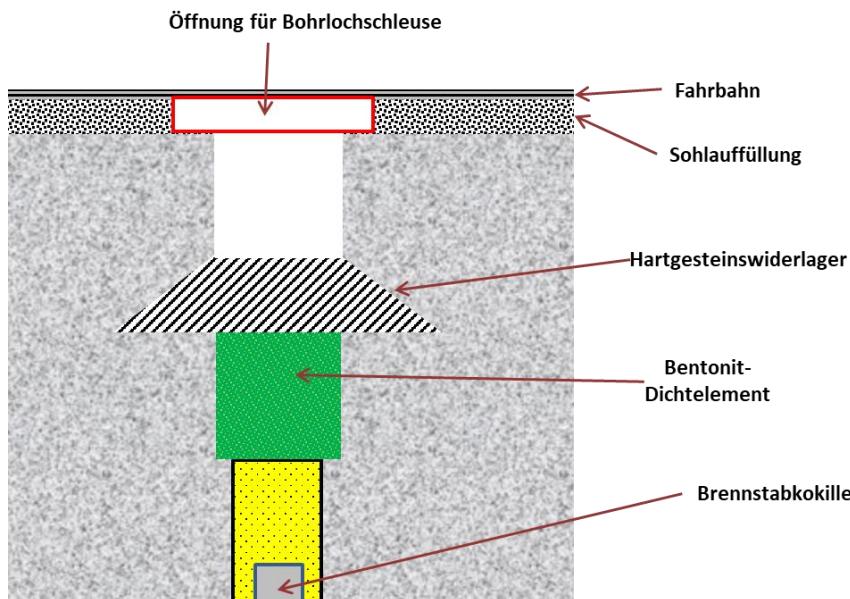


Abbildung 42: **Skizze des Nahfeld des Einlagerungsbohrlochs im Kristallingestein nach Einbau des Widerlagers**

Im Tongestein legen die Ergebnisse des ebenfalls parallel zu TREND laufenden Vorhabens AGENT (FKZ 02 E 11718 A) und die Erfahrungen aus Schacht Konrad nahe, für die Endlagerstrecken im Tongestein aufgrund der druckhaften gebirgsmechanischen Randbedingungen insbesondere für langlebigere Strecken eine runde Querschnittsform zu wählen und die Strecken mit einem massiven Betonausbau zu sichern. Die Bohrlochüberfahrungsstrecken fallen in diese Kategorie der langlebigen Strecken. Es ist deshalb anzunehmen, dass diese Strecken neben Spritzbeton und Gebirgsankern direkt nach Erstellung eine zusätzliche Innenschale aus Ort beton oder Fertigbetonteilen (Tübbing) erhalten. Die Anpassung der Form des Streckenquerschnitts erlaubt folgenden Umgang mit dem Bohrlochkeller, mit dem dessen Erstellung im Gestein vollständig vermieden wird: Nach Auffahrung und Ausbau einer Einlagerungsstrecke wird die Strecke zur Herstellung einer befahrbaren Sohle soweit aufgefüllt, dass ein ausreichend breites Planum für die Betriebsprozesse zur Verfügung steht. Darüber hinaus wird die Sohle soweit aufgefüllt, dass der Bohrlochkeller von 2,85 m Tiefe in der Sohlauffüllung Platz findet. Als Material kann aus technischer Sicht z. B. Schotter oder eine massive Bodenkonstruktion aus Beton verwendet werden. Beim Auffüllen der Sohle werden die vorgesehenen Bohrlochkeller der jeweiligen Strecke durch versetzbare Trennwände (z. B. Betonkonstruktionen) ausgespart. Nach Herstellung der Sohle werden die Einlagerungsbohrlöcher gebohrt. Dies geschieht durch den Ausbau in der Sohle hindurch. Nach erfolgter Einlagerung und Einbau des Dichtelements wird ein Widerlager wie folgt erstellt: Oberhalb des Dichtelements wird das Bohrloch mit Beton verfüllt. Oberhalb des Bohrlochs wird der Betonausbau der Strecke im

Bereich des Bohrlochs so verschlossen, dass seine Qualität der ursprünglichen Ausbauröhre, die gegen den Gebirgsdruck ausgelegt ist, möglichst nahekommt. Dann kann die Ausbauröhre nicht nur dem aufkriechenden Gebirge, sondern auch dem Quelldruck des Dichtelements als Widerlager dienen. Eine neue Anforderung an die ELV entsteht bei dieser Variante nicht.

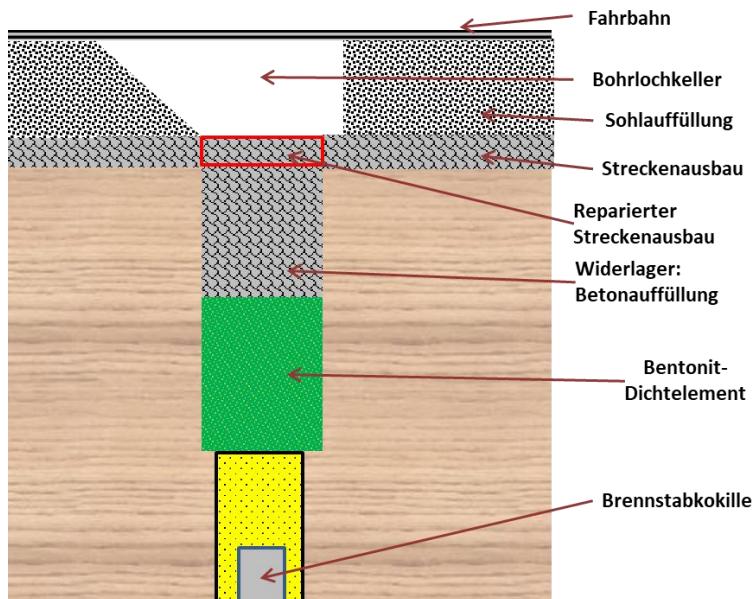


Abbildung 43: Skizze des Nahfelds des Einlagerungsbohrlochs im Tongestein nach Ertüchtigung des Ausbaus als Widerlager

Beide Lösungen zum Umgang mit dem Bohrlochkeller und dem Widerlager wurden interdisziplinär erarbeitet, um die Blickwinkel der Langzeitsicherheit und Rückholung aus den oben genannten Vorhaben zu berücksichtigen und um den Bedarf einer entsprechenden Weiterentwicklung abzuleiten.

4.2.2 Stabilität des Gesteins unterhalb der Einlagerungsvorrichtung

In Filbert et al. (2010) wurde die ELV zur Einlagerung im Steinsalz ausgelegt. Die Stützen der ELV werden direkt auf der Sohle in Nachbarschaft zum Bohrlochkeller positioniert und leiten das Gewicht der Maschine, der Nutzlast (beladener Transferbehälter) und veränderliche betriebliche Lasten in die Sohle ab. Deshalb wurde die Stabilität der Sohle, insbesondere mit Blick auf ein mögliches Abrutschen der Wände des Bohrlochkellers, mit numerischen Berechnungen untersucht. Folgende Daten wurden berücksichtigt:

Einlagerungsmaschine	65	Mg
Bohrlochschleuse	6,5	Mg
Behältermassen: (Transferbehälter inkl. BSK)	50	Mg
Durchmesser der Bohrlochzentrierung	0,8	m
Außendurchmesser des Aufnahmehrohrs	1,15	m
Außendurchmesser der Bohrlochschleuse	1,5	m

Durch die Auffahrung des Bohrlochkellers im Steinsalz ergibt sich eine wesentliche Entlastung des Gesteins, insbesondere an den seitlichen Wänden des Bohrlochkellers (Abbildung 44). Die Stützweite der ELV ist so groß, dass die Aufstandsflächen außerhalb des von Auflockerungen betroffenen Bereichs des Bohrlochkellers im dauerstandfesten Bereich liegen. Allerdings besteht nur ein geringer Abstand zum aufgelockerten Bereich, insbesondere auf der Seite der Zufahrt mit dem Transportwagen. Es wird eine Vergrößerung der Stützweite in Längsrichtung um ca. 0,5 bis 1 m empfohlen.

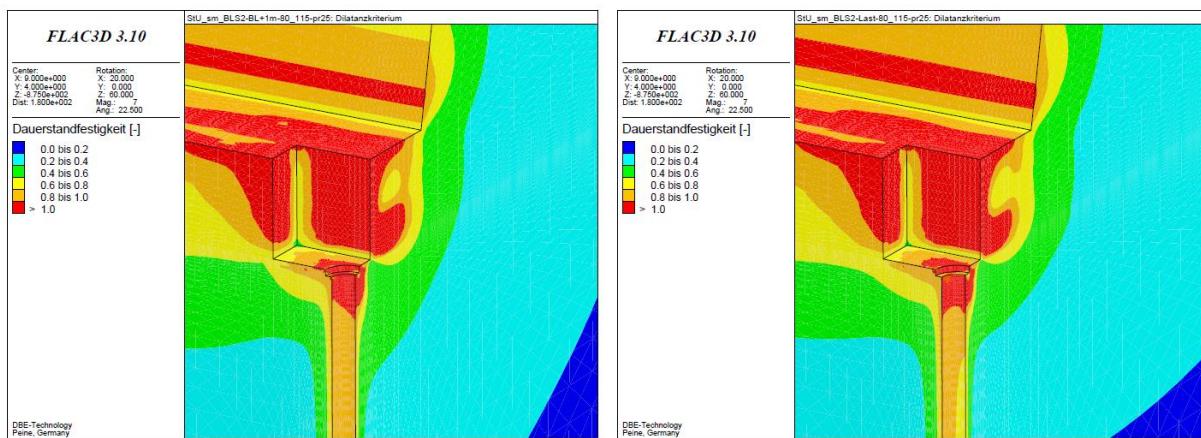


Abbildung 44: Links: Dauerstandfestigkeit unmittelbar vor Belastung durch Bohrlochschleuse und beladenen Transferbehälter; Rechts: Dauerstandfestigkeit unmittelbar nach Belastung durch Bohrlochschleuse und beladenen Transferbehälter (Filbert et al., 2010)

4.2.3 Einstufung der Einlagerungstechnik nach KTA

Für die Auslegung von Technik zum Transport und zur Einlagerung von hochradioaktiven Abfällen bestehen keine gültigen kerntechnischen Regeln. Sinngemäß können die KTA herangezogen werden. Für die Transport- und Einlagerungstechnik kann vor allem die KTA 3902 „Auslegung von Hebezeugen in Kernkraftwerken“ von Nutzen sein. Insbesondere für die Einlagerungstechnik für die vertikale Bohrlochlagerung eignet sich diese Norm, da es sich bei der Einlagerungstechnik auch tatsächlich um ein Hebezeug handelt. Die KTA 3902 sieht verschiedene Einstufungen der Hebezeuge vor, nach denen sich Strenge und Umfang der Anforderungen richten:

Einstufung als Hebezeug nach allgemeinen Bestimmungen

Die geringste Einstufung nach KTA 3902 ist die als „Hebezeug nach allgemeinen Bestimmungen“. Hier ist KTA 3902 Abschnitt 3 maßgebend. Es wird gefordert, dass die Hebezeuge den allgemein anerkannten Regeln der Technik und den allgemeinen Sicherheitsvorschriften, Arbeitsschutzvorschriften des Bundes und der Länder sowie den Vorschriften der Träger der gesetzlichen Unfallversicherung genügen sollen. Neben den allgemeinen Bestimmungen sind nach KTA 3902 Abschnitt 4 weitere Aspekte bei der Konstruktion zu berücksichtigen:

1. Es muss ein Nachweis gegen „Einwirkungen von außen“ geführt werden, wenn dieser auch für das Gebäude in dem das Hebezeug betrieben wird geführt wird.

2. Umgebungsbedingungen wie z. B. Druck, Temperatur, Umgebungsmedien und Strahlenbelastung sind bei der Konstruktion zu berücksichtigen.
3. Die Dekontaminierbarkeit muss bei der Konstruktion berücksichtigt werden.

Einstufung als Hebezeug mit zusätzlichen Anforderungen

Bei Einstufung als Hebezeug mit zusätzlichen Anforderungen sind neben den in Abschnitt 3 genannten Anforderungen weitere Anforderungen aus KTA 3902 Abschnitt 6 zu berücksichtigen. Die in Abschnitt 6 genannten Anforderungen dienen überwiegend der Erhöhung der Sicherheit. Gefordert sind hier zum Beispiel Überlastsicherungen, Wegbegrenzer, Betriebsstunden- oder Lastspielzähler sowie die Beachtung ergonomischer Prinzipien bei der Konstruktion, die z. B. Fehlbedienungen oder falsche Montagen verhindern sollen. Zudem wird ein formschlüssiges Anschlagen von Lasten gefordert.

Einstufung als Hebezeug mit erhöhten Anforderungen

Hier sind neben den vorher erläuterten Anforderungen nach KTA 3902 Abschnitt 3 und 4, Teilen von Abschnitt 6 auch die Anforderungen nach KTA 3902 Abschnitt 7 zu erfüllen. Hier werden weitere Anforderungen an die Konstruktion der Hebezeuge gestellt. Gefordert sind zum Beispiel die Verwendung einer doppelten Triebwerkskette. Zudem wird die redundante Anordnung vieler Bauteile gefordert. Bei Ausfall von Bauteilen muss der Stillstand herbeigeführt werden.

Einstufung der Einlagerungstechnik zur vertikalen Bohrlochlagerung

Die Einstufung der Technik erfolgt nach dem entsprechenden Flowchart der KTA 3902 (Abbildung 45). Maßgeblich ist, dass bei einem Versagen der Einlagerungstechnik, z. B. bei Seilriss des Förderseils, ein Radionuklidastrag zu erwarten ist. Auch wenn aufgrund der Verwendung einer Bohrlochschleuse erwartet werden kann, dass sich ergebende Strahlenexpositionen unterhalb der genannten Grenzwerte bleiben, kann eine Exposition $< 5 \text{ mSv}$ bzw. $< 1 \text{ mSv}$ nicht garantiert werden. Darüber hinaus wird die nach EndlSiAnfV geforderte Rückholbarkeit der Abfallgebinde durch einen Behälterabsturz sehr erschwert oder sogar unmöglich gemacht. Aus diesem Grund erfolgt die Bewertung, dass eine Beeinträchtigung sicherheitstechnisch wichtiger Komponenten nicht ausgeschlossen werden kann. So ergibt sich für die Einlagerungstechnik die Einstufung zu „zusätzliche Anforderungen“. Für die Weiterentwicklung der ELV bedeutet das insbesondere eine Berücksichtigung von Redundanz sicherheitsrelevanter Funktionen, z. B. die Verwendung von zwei Förderseilen statt einem und eine Anpassung des Greifers. Bei der Entwicklung der ELV in Filbert et al. (2010) bestand noch keine Forderung zur Rückholbarkeit, weshalb diese nach den „allgemeinen Bestimmungen“ ausgeführt wurde.

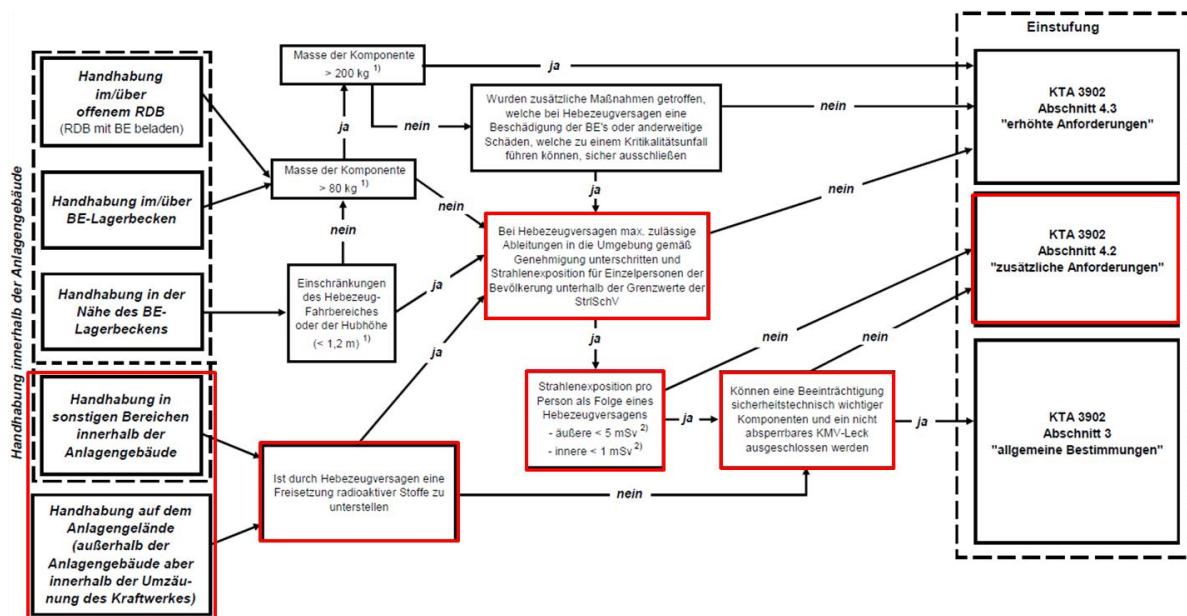


Abbildung 45: Flowchart zur Einstufung von Hebezeugen nach KTA 3902; in rot: Einstufung der Einlagerungstechnik für vertikale Bohrlochlagerung

4.2.4 Vorüberlegungen und Prinziplösungen

Zur Analyse, inwieweit die bestehende Konstruktion der ELV aus Filbert et al. (2010) dem Regelwerk entspricht, wird sie in funktionale Unterbaugruppen unterteilt. Deren Erfüllung der zutreffenden Normen wird dann einzeln bewertet und Weiterentwicklungsbedarf abzuleiten. Die Unterbaugruppen umfassen die vier Standbeine mit dem Hebework, die Hubeinrichtung mit Förderseil und Umlenkung, das Schwenkwerk mit der Behälteraufnahme und der Greifer mit Seilanschlag. Die Schnittstellen zwischen den Unterbaugruppen müssen selbstverständlich auch gängige Normen und Richtlinien erfüllen. Da es sich dabei jedoch meistens um statische Konstruktionen handelt, wird die Umsetzbarkeit als unkritisch angenommen. Besondere Betrachtung sollen die, hinsichtlich der Funktion und Umsetzbarkeit, kritischen Komponenten finden. Als solche Komponenten werden bewegliche und lasttragende Einrichtungen eingestuft.

Hebework und Grundrahmen

Das Hebework kann die Arbeitshöhe des Grundrahmens der ELV verstetzen. Es besteht aus vier Hubsäulen welche gleitgelagert sind. Der Antrieb erfolgt über eine von einem Elektromotor angetriebene Spindel. Für die Bestimmung der Hubhöhe sind an jeder Säule Sensoren verbaut.

Entsprechend der Einstufung der ELV nach KTA 3902 (Kapitel 4.2.3) erfolgt die Einstufung als „Lastaufnahmeeinrichtung mit zusätzlichen Anforderungen“. Es wird für diesen Fall gefordert die Lastspielzahlen der Einrichtung über die Lebensdauer zu ermitteln und die Spannungsspielzahl zu bestimmen. Liegt die Spannungsspielzahl unter 2×10^4 ist kein Betriebsfestigkeitsnachweis erforderlich. Es kann davon ausgegangen werden, dass für die Einlagerung jeder BSK ca. 6 Lastwechselvorgänge nötig sind. Der erste Lastwechselvorgang ist das Aufnehmen

des Transferbehälters und das Absetzen auf der Bohrlochschleuse. Beim Wiederaufnehmen des Transferbehälters und dem Ablegen auf dem Plateauwagen entsteht der zweite Lastwechselvorgang. Dieser Zyklus wiederholt sich pro BSK jeweils mit zwei mit Sand gefüllten Behälter zum Verfüllen des Hohlraums im Bohrloch. Für die 15.671 BSK mit einer Beladung von Brennstäben aus drei Brennelementen (Bertrams et al., 2017) ergibt sich somit eine geschätzte Lastspielzahl von 94.026 Lastspielvorgängen. Daraus folgt, dass ein Nachweis erst dann erforderlich ist, wenn weniger als fünf ELV zum Einsatz kommen. Ein Betriebsfestigkeitsnachweis ist also nach KTA 3902 nicht erforderlich, wenn die Einlagerung der BSK durch mindestens fünf ELV erfolgt, die eine gleich große Anzahl von BSK einlagern. Um diese Bedingung prüfbar einhalten zu können, sollte die Lastspielzahl in der Steuerung der ELV erfasst werden. Des Weiteren sollte sichergestellt werden, dass die ELV ohne Demontage und Montage zwischen den Einlagerungsstrecken transportiert werden kann, da sonst ein Betriebsfestigkeitsnachweis erforderlich werden kann. Da ein Betriebsfestigkeitsnachweis aufwendig ist und ein Risiko im Genehmigungsverfahren darstellt, wird für die Entwicklung der ELV vorausgesetzt, dass eine ausreichende Anzahl von ELV eingesetzt wird, so dass jede einzelne ELV weniger als 2×10^4 Lastwechselvorgänge erfährt.

Zum Transport der ELV wird ein Transportträger eingeschraubt. Dieser Vorgang wird nicht als Montagevorgang gewertet, da keine signifikanten Montagelasten auftreten und sich der Kraftfluss während des Transportes kaum von jenem im Betrieb unterscheidet. Eine Sicherheitsbremse der Hubsäulen ist nicht erforderlich, da die Spindeltriebe selbsthemmend ausgelegt sind. Eventuelle Reparaturen sind im Fehlerfall durchführbar, da ein ausreichender Sicherheitsabstand zum Transferbehälter gewährleistet ist.

Zusammenfassend wird festgestellt, dass das Hebwerk und der Grundrahmen der ELV bereits den Bedürfnissen der KTA 3902 entsprechen.

Hubeinrichtung und Förderseil

Die Hubeinrichtung mit Förderseil dient dazu den Greifer mit BSK im Bohrloch abzusenken bzw. zu heben. In der jetzigen Konfiguration werden die Vorgaben der KTA 3902 nicht komplett erfüllt. Es sollte jedoch eine Abwägung erfolgen, ob eine höhere Komplexität, um die Vorgaben zu erfüllen, tatsächlich zu einer Steigerung der Sicherheit der Einrichtung führt. Die KTA 3902 fordert in tiefster Lasthakenstellung mindestens zwei Sicherheitswindungen auf der Trommel. Diese Forderung ist problemlos in die bestehende Konstruktion der ELV integrierbar. Eine weitere Forderung, die enthalten ist, bezieht sich auf die Seiltrommel. Es wird vorgeschrieben, dass die Seiltrommel, um Fehler beim Aufwickeln zu minimieren, nur einlagig bewickelt werden darf, da mehrlagige Wicklungen in der Regel zu häufigen Wicklungsfehlern führen. Unter der Annahme, dass die Seiltrommel einen Durchmesser von 3.000 mm, das Seil einen Durchmesser von 30 mm und die maximale Bohrlochhöhe 300 m beträgt, ist es möglich, die geometrischen Abmessungen der Anlage abzuschätzen. Die Breite für die Wicklungen auf der Seiltrommel beträgt damit mindestens 955 mm. Bei nur einem Seilstrang sollte laut DIN 15020 ein drehungsfreies Seil verwendet werden. Diese Seilart erzeugt ein geringeres Drehmoment unter Belastung. Dies ist wichtig, um ein Rotieren der Last und unkontrollierte Bewegungen des Greifers beim Lösen der Last wirksam zu vermeiden. Gleichzeitig wird für einen problemlosen Betrieb in der DIN 15020 eine Seilablenkung auf der Trommel von maximal $1,5^\circ$ gefordert. Dies würde bei der oben genannten Trommelbreite einen Abstand von 18.241 mm zwischen

Trommel und Seilscheibe erfordern. Dieser Abstand würde die aktuelle Länge der ELV (ca. 5,5 m) weit überschreiten. Der geometrische Zusammenhang aus Seillänge, Trommelbreite, maximalem Ablenkwinkel und damit Länge der ELV ergibt auf Basis der aktuellen Konstruktion demnach Maße, die keine sinnvolle Konstruktion ermöglichen.

Es gibt diverse technische Möglichkeiten um die ELV für die genannten Anforderungen der KTA 3902 tauglich zu machen. Zum einen wäre es möglich eine an die Windenposition gekoppelte Seilführung zu verbauen, um die Gefahr von Wicklungsfehlern auch bei mehr als einer Lage zu minimieren. Die Koppelung kann mechanisch über ein Getriebe oder mechatronisch über eine Regelung und einen Antrieb erfolgen. Da zwischen Seilführung und Seil zwangsläufig Reibung entsteht und sich unter Tage Partikel ablagern können, deren abrasive Wirkung auf Seil und Führung zu Verschleiß führt, ist eine regelmäßige Kontrolle nötig. Des Weiteren steigert dieses System die Anfälligkeit der ELV hinsichtlich technischer Defekte durch eine hohe Anzahl der erforderlichen beweglichen Bauteile und durch die notwendige Steuerungstechnik.

Eine andere Möglichkeit zur Minimierung des Ablenkwinkels ist, die Seiltrommel verschiebbar gelagert auszuführen. Um eine Seilführung zu umgehen, wäre es sinnvoll, einen Verfahrweg von mind. 955 mm zu realisieren. Zum jetzigen Zeitpunkt ist kein solches System auf dem Markt bekannt. Es wird davon ausgegangen, dass die Seiltrommel samt Antrieb gelagert werden muss. Die Lagerung ist dabei mit hohen Sicherheitsbeiwerten auszulegen. Ein Verschieben der Trommel im Betrieb erfordert hohe Kräfte, da die Seillasten auf die Lagerung wirken. Des Weiteren steigert ein solches System ebenfalls die Komplexität und die Anforderungen an die Regelungstechnik des Gesamtsystems. Hier ist ebenfalls zu prüfen in wie weit eine Kategorisierung nach KTA 3902 die Gesamtsicherheit und Zuverlässigkeit steigert.

Der Hauptgrund warum die KTA 3902 einlagige Seiltrommeln fordert ist der Sachverhalt, dass es beim Aufwickeln des Förderseils zu weniger und kontrollierbareren Zwischenfällen kommen kann. Als Gegenmaßnahme zur Minderung dieses Risikos könnte das Förderseil, anstatt durch Personaleinsatz im Kontrollbereich, mit optischen Systemen überwacht werden. Diese Systeme werden im Seilbahnbetrieb eingesetzt und können bei Seilgeschwindigkeiten bis 0,5 m/s eine zuverlässige Überwachung gewährleisten (z. B. Fa. Winspect, 2020). Lediglich die letzten 2 Meter Förderseil zwischen Greifer und Überwachungseinrichtung sind der Kontrolle entzogen. Da das Förderseil sauber gehalten werden kann, ist eine Beeinträchtigung der Überwachung nicht zu erwarten. Das System erkennt laut Herstellerangaben zuverlässig eine Verringerung des Seildurchmessers, Veränderungen in der Schlaglänge, außenliegende Drahtbrüche, Welligkeit und die sogenannte Korbbildung. Eine derartige Überwachung des Seils, welches bereits mit hohen Sicherheitsbeiwerten ausgelegt wurde, schließt ein Versagen des Seils mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit aus. Die Funktionstüchtigkeit dieser Art der Überwachung im Zusammenhang mit radioaktiver Strahlung in der Nähe von Abfallgebinden ist weiter zu untersuchen.

Eine Auslegung des Förderseils selbst sollte nach DIN 15020 erfolgen. Es wird davon ausgegangen, dass die Anlage später täglich zwischen 2 und 4 Stunden fördert. Dabei wurden 8 Einlagerungsvorgänge pro Arbeitstag von jeweils 15 Minuten Dauer angenommen. Die Zeit resultiert aus einer mittleren Förderlänge im Steinsalz von 200 m und einer Geschwindigkeit von

ungefähr 0,5 m/s. Laut DIN 15020 würde dies der Triebwerksgruppe 2m entsprechen. Unter Berücksichtigung des Gewichts einer BSK von ca. 5 Mg und dem Gewicht des Greifers von 0,5 etwa Mg erhält man einen minimalen Seildurchmesser von 27,7 mm. Die bestehende Konstruktion erfüllt mit 30 mm Seildurchmesser diese Anforderung.

Bei der Endlagerung im Ton- und Kristallingestein ist eine deutlich geringere Förderlänge erforderlich. Im Folgenden wird von einer mittleren Förderlänge von 20 m ausgegangen. Dies würde bei 8 Einlagerungsvorgängen einer Betriebsdauer von 11 Minuten pro Tag entsprechen. Dies ergibt ebenfalls Triebwerksgruppe 2m. Bei einem BSK-Cu Gewicht von 10 Mg und einem Greifergewicht von 0,5 Mg ergibt sich ein Mindestseildurchmesser von 38,2 mm. Die bestehende Seiltrommel der ELV ist für diese Seildicke nicht kompatibel, sodass das bestehende Konzept die Anforderungen an die Einlagerung im Kristallingestein mit kupferummantelten BSK nicht erfüllt.

Von daher ist zu überlegen, unterschiedliche Seiltrommeln für die jeweiligen Anwendungsfälle einzusetzen. Vorteilhaft ist dann, dass die Winkelabweichung beim einlagigen Seil im Tongestein und Kristallingestein ohne komplexe technische Modifikationen aufgrund der geringeren Seillänge unter die geforderten 1,5° fällt. Zum anderen kann der Seildurchmesser im Salz deutlich geringer gewählt werden als bei einer kombinierten Konstruktion. Da die Trommel im Ton- und Kristallingestein eine deutliche kürzere Seillänge aufwickeln muss, kann sie auch schmäler ausgeführt werden. Aufgrund der komplexeren Geometrie durch die große Bohrlochteufe von bis zu 300 m beziehen sich die folgenden Vorüberlegungen zunächst auf die Endlagerung im Steinsalz.

Da der Innendurchmesser des Transferbehälters mind. 450 mm beträgt, ist es möglich, den Greifer an einer Traverse aufzuhängen und damit die Last gleichmäßig auf zwei Seilstränge aufzuteilen (Abbildung 46). Daraus folgt aus der Berechnung nach DIN 15020 ein Mindestseildurchmesser von 17,9 mm. Es wird in der weiteren Berechnung von einem 20 mm Seil ausgegangen. Das Seil ist nicht dehnungsarm, sodass ein Ablenkwinkel von 4° zulässig ist.



Abbildung 46: Traverse, Ausführung mit 2 Seilen und Wippe zum Seillastausgleich

Anhand des durch die Bohrlochgeometrie bedingten maximalen Abstandes der beiden Umlenkrollen zueinander von 250 mm, des nach DIN 15020 zulässigen Ablenkwinkels von 4° und eines abgeschätzten Achsenabstandes der Seiltrommel von 6.250 mm kann die Breite der Seiltrommel berechnet werden. Zwei Seilwindungen haben aus Sicherheitsgründen immer auf der Seiltrommel zu verbleiben. Es wird angenommen, dass die zwei zusätzlich geforderten Windungen außerhalb der geforderten 4° Ablenkung liegen dürfen. Daraus ergibt sich eine ungefähre Trommelbreite von 550 mm. Mit diesem Wert und einer maximalen Bohrlochteufe von 300 m kann der Seiltrommelmeldurchmesser ermittelt werden. Für Seile nach DIN 15020 ergibt sich ein Mindestdurchmesser der Trommel von 3.540 mm und für Spezialseile ein Trommelmeldurchmesser von 2.700 mm. Das Spezialseil erfordert einen geringeren Durchmesser, da es einen deutlich höheren Verseilungsfaktor und Füllgrad im Vergleich zum genormten Seil hat. Eine Berechnung des Spezialseils erfolgt nach ISO 4308. Eine erste Überschlagsrechnung mit der entsprechenden Triebwerksgruppe M6 und 66 % der Nennlast auf jedem Seil ergibt eine erforderliche statische Zugkraft von 203 kN. Ein 15 mm „Turboplast“ Seil der Fa. Casar übertrifft diesen Wert mit 205 kN (CASAR (a), 2020). Daher kann davon ausgegangen werden, dass mit einer Seiltrommel von 3 m Durchmesser und zwei nicht drehungsfreien Seilen die Anforderungen aus KTA 3902 erfüllt werden können.

Schwenkwerk

Das Schwenkwerk wird in seiner Ausführung als hinreichend sicher eingestuft. Alle lasttragen- den Teile sind mit hohen Sicherheitsbeiwerten versehen und redundant ausgelegt. Der Klapp- mechanismus ist durch den Kniehebel selbsthemmend ausgelegt und kann im Falle eines Mo- tordefektes nicht selbstständig öffnen. Die Schwenkeinrichtung selbst wird von vier Motoren bewegt. Es wird angenommen, dass der Prozess des Schwenkens auch von drei Motoren sichergestellt werden kann. In Filbert et al. (2010) gelang das Schwenken sogar mit nur zwei Motoren.

Greifer

Der Greifer kann ebenfalls als Lastaufnahmeeinrichtung eingestuft werden. Der Ausfall eines einzelnen Greiferarms kann zum Absturz einer BSK im Bohrloch führen. Dieses Risiko könnte z.B. durch Redundanz der Greiferarme verringert werden, sofern dies konstruktiv möglich ist. In dem Fall könnte die Anzahl der Greiferarme von drei auf fünf angehoben werden. Des Wei- teren sollte der Greifer mit einem zweiten Linearaktuator ausgestattet werden, da derzeit bei einem Ausfall des Aktuators ein Öffnen des Greifers vom Leitstand nicht mehr möglich ist. Das Seil der ELV nach Filbert et al. (2010) ist mit einem Kunststoffverguss am Greifer befestigt. Diese Befestigungsart ist zwar eine der Zuverlässigsten nach Stand der Technik (Verreet, 2003), dennoch fordert die KTA 3902 einen Metallverguss. Dies sollte problemlos und ohne konstruk- tive Änderung umsetzbar sein.

4.2.5 Mögliche konstruktive Optimierungen

Einlagerungsvorrichtung

Eine Optimierung der ELV hinsichtlich des Einlagerungsbetriebes im Steinsalz wird als möglich erachtet. Um den aufgefahrenen Streckenquerschnitt zu verkleinern, kann geprüft werden, ob eine Konstruktionsänderung sinnvoll ist. Die Bauhöhe der ELV kann mit zwei Maßnahmen um ungefähr 500 mm reduziert werden. Zum einen müsste der Plateauwagen geändert werden um die notwendige Hubhöhe des Transferbehälters zu reduzieren. Zum anderen ist eine Än- derung in der Mechanik der Abdeckhaube denkbar. Ein horizontales Verfahren der Haube könnte gegenüber einem vertikalen Verfahrweg deutliche Vorteile bringen.

Plateauwagen

Den Umfang der möglichen Optimierungen am Plateauwagen wird als gering erachtet. Falls elektrische oder elektronische Bauteile auf dem Plateauwagen zum Einsatz kommen (z.B. Sensorik), können diese entweder über eine lokale Batterie oder über elektrische Kupplung zum Zugfahrzeug versorgt werden. Des Weiteren besteht die Möglichkeit, die Bauhöhe des Wagens zu optimieren. Je tiefer die Last auf dem Wagen positioniert ist, desto geringer kann die Höhe der ELV ausfallen. Außerdem kann die Geometrie der Behälterauflage überarbeitet werden, um die nötige Hubhöhe zum Herausheben des Transferbehälters zu verringern. Im jetzigen Zustand müssen die angebauten Behälterschleusen des Transferbehälters über die konkave Kontur des Wagens hinausgehoben werden.

Einschätzung zur Einlagerungstechnik der SKB/von Posiva Oy

Die Einlagerungstechnik, wie sie von der SKB und Posiva Oy zur Endlagerung hochradioaktiver Abfälle vorgesehen ist (Pettersson & Lönnberg, 2008) funktioniert prinzipiell ähnlich zu der aus Filbert et al. (2010). Das nicht selbst abschirmende Abfallgebinde wird in einem abschirmenden Overpack zum Einlagerungsbohrloch transportiert. Dort wird das Overpack in die Vertikale gedreht. Von oben greift ein Hebezeug aus einer Abschirmhaube heraus das Abfallgebinde und lässt es ins Bohrloch ab. Ein Unterschied besteht darin, dass SKB/Posiva mit einem bereiften Fahrzeug auskommt, während Filbert et al. (2010) von einem gleisgebundenen Transportwagen und einer stationären Einlagerungsvorrichtung ausgeht. Da in den skandinavischen Konzepten nur ein Behälter pro Bohrloch eingelagert wird, stellt ein bewegliches Fahrzeug einen großen Vorteil dar. Der wichtigste Unterschied besteht jedoch in den Komponenten, die ein strahlengeschütztes Arbeiten trotz der vergleichsweise hohen Ortsdosisleistungen der BSK möglich machen: Der Transferbehälter nach Filbert et al. (2010) umschließt das Abfallgebinde vollständig. Die Bohrlochschleuse verschließt dauerhaft das Bohrlochinnere. Nur durch Kontakt der Schleusen und Kontakt der oberen Behälterschleuse mit der Abschirmhaube kann der Transferbehälter geöffnet werden. Gerade bei Fehlfunktionen, die ein menschliches Arbeiten am Einlagerungsort erfordern, ist das Personal durch die Schleusensysteme immer gut vor radioaktiver Strahlung geschützt. Dieses Sicherheitskonzept wird auch für die Weiterentwicklung im Vorhaben TREND verfolgt.

4.3 Änderungskonstruktion mit Bohrlochkeller

Die Entwurfskonstruktion erfolgt mittels des CAD Programms Autodesk Inventor. Die Konstruktion fokussiert sich auf die für die Umsetzung kritischen Details und Funktionen. Verkabelungen, Hydraulikleitungen, Sensorik und Regelungstechnik werden nicht dargestellt. Berechnungen erfolgen als Handrechnung oder computergestützt mittels Finiter Elemente Methode. Für eine Bewertung der Ergebnisse wird, sofern nicht anders angegeben, die Zug-Druck Wechselfestigkeit der Baustahlsorte S355 herangezogen. Diese beträgt 205 MPa. Sollte diese Festigkeit nicht ausreichen, werden Materialien vorgeschlagen, welche die Anforderungen erfüllen.

4.3.1 Grundrahmen mit Hubwerken

Der Stahlbau des Grundrahmens wird weitestgehend von Filbert et al. (2010) übernommen. Die Stahlbauanschlüsse werden um 50 cm verlängert, um den Bohrlochkeller zu entlasten und den Abstand der Stützen zu den Bohrlochkellerwänden zu erhöhen. Der Grundrahmen ist aus mehreren Kastenprofil-Schweißkonstruktionen zusammengeschraubt, um den Transport gewährleisten zu können. Des Weiteren dient die Unterteilung des Rahmens in mehrere Einzelteile dazu, die Anforderungen an die Maßhaltigkeit zu reduzieren. Leichter Verzug aufgrund des Schweißprozesses kann beim Verschrauben ausgeglichen werden. Im hinteren Teil des Grundrahmens befindet sich das Plateau für die Seiltrommel. Zentraler Bestandteil sind die Anschlagpunkte für das Schwenkwerk und die Befestigung bzw. Führung der Abschirmhaube.

In den seitlichen Bereichen des Rahmens ist genügend Bauraum vorhanden, um die Steuerungselektronik unterbringen zu können. Abbildung 47 zeigt die Einlagerungsvorrichtung mit angepasstem Grundrahmen.

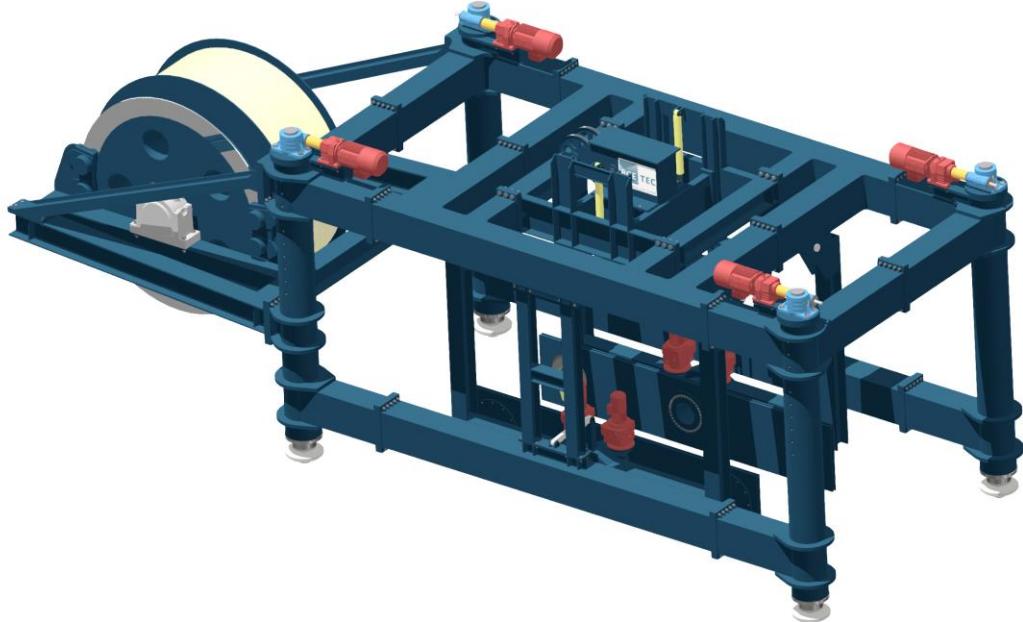


Abbildung 47: Einlagerungsvorrichtung nach KTA-Regelwerk

Die Hubwerke sind mit selbsthemmenden Trapezgewindespindeln ausgerüstet. Deren Motoren verfügen ebenfalls über eine Bremse, sodass im Falle eines Stromausfalls oder Motorwellenbruches die Stütze in Position bleibt. Die Gewindespindeln verfügen über eine dynamische Traglast von 500 kN. Dies stellt sicher, dass der Betrieb mit drei funktionsfähigen Stützen weiter gewährleistet ist. Da die Mutter über die Spindel gleitet, wird ein hoher Anteil der notwendigen Leistung in Wärme umgewandelt. Da diese Abwärme nicht aktiv abgeführt wird, ist die Hubsäule nur für den Kurzzeitbetrieb zugelassen. Für die angestrebte Anzahl von ein bis zwei Einlagerungen am Tag ist dies jedoch ausreichend und führt nicht zu einer Überhitzung des Systems.

Eine Überprüfung der Stahlbaukonstruktion mittels Finiter Elemente Analyse (Abbildung 48) zeigt deutlich, dass unter den gegebenen Randbedingungen die Konstruktion eine ausreichende Sicherheit von über 3 aufweist. Es wird ein Behälter mit 50 Mg Gewicht gehoben, wobei das Gewicht der Seiltrommel von 10 Mg auf dem hinteren Teil der Maschine lastet. Als Material wurde niedrig legierter Baustahl der Gütekasse S235 angenommen. Als Widerlager für die Bewegung in z-Richtung dient die Aufnahme der Gewindespindeln. Die Bewegung in Y- und X-Richtung wird durch die Gleitlagerung der Stützen unterdrückt.

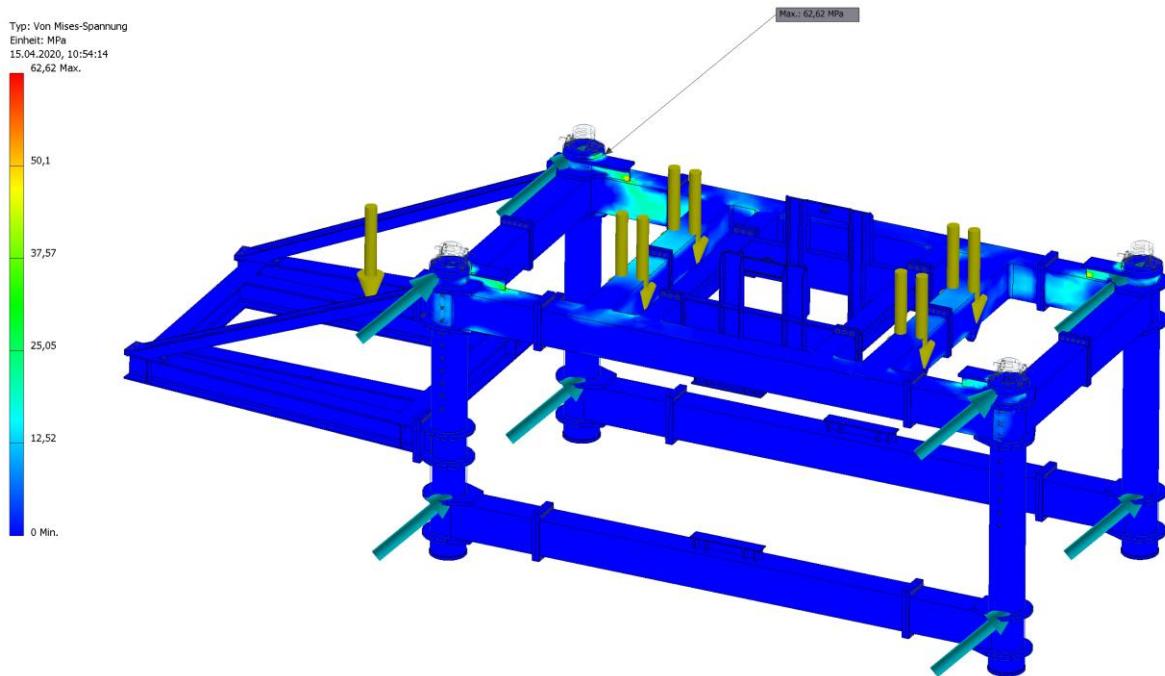


Abbildung 48: Vergleichsspannungen im Stahlbau

Auf Abbildung 49 wird gezeigt, wie sich der Stahlbau verhält, sobald eine Stütze ausfällt. Wie zu erkennen ist, muss die Last über den Rahmen auf die anderen Stützen verteilt werden. Dabei kommt es zu einer höheren Belastung des Seiltrommeltragrahmens. Dies sollte bei einer Detailkonstruktion berücksichtigt werden, da sich die Richtung der Spannungsvektoren in diesem Fall ändern kann und die Beanspruchungsart wechselt. Einflüsse von Schweißnähten und Verschraubungen sind für weiterführende Stabilitätsberechnungen zu berücksichtigen.

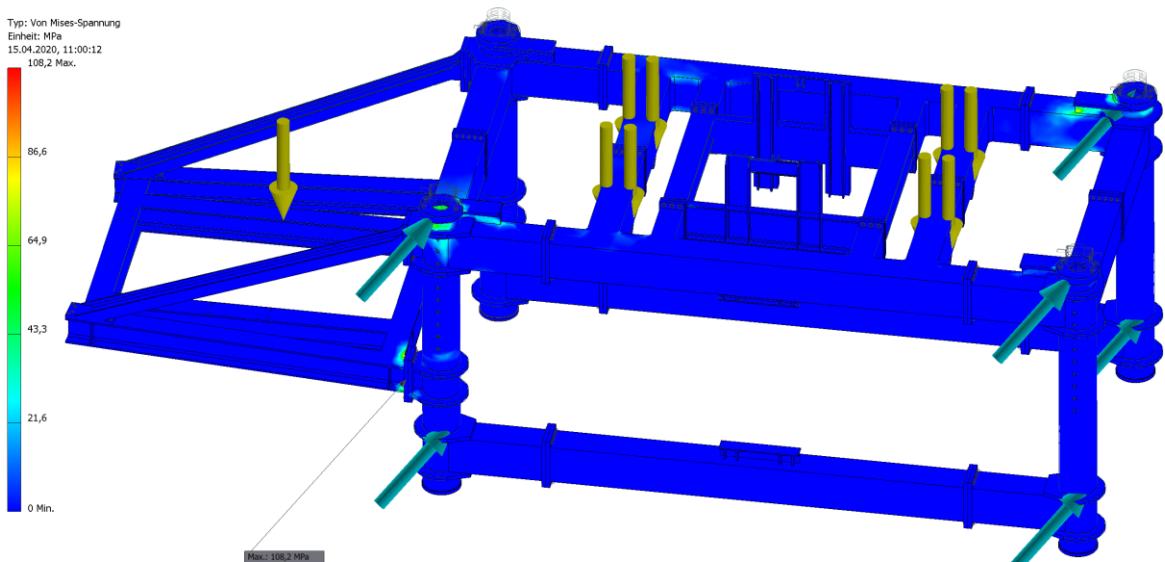


Abbildung 49: Vergleichsspannung beim Ausfall der hinteren linken Stütze

4.3.2 Seil und Seiltrommel

Ein wesentlicher Aspekt der Einlagerungsvorrichtung nach Filbert et al. (2010) ist die nach KTA 3902 geforderte einlagige Seiltrommelbewicklung.

Die einlagige Wicklung ist mit dem bestehenden Seil nicht zu realisieren. Der Abstand zwischen Trommel und erster Umlenkrolle müsste deutlich vergrößert werden, um den maximalen Ablenkinkel von 1.5° möglich zu machen. Da die Anzahl der Laststränge auf zwei erhöht wird, kommt ein nicht drehungsfreies Seil zum Einsatz. Dieses ermöglicht einen zulässigen Ablenkinkel von 4° . Die Auslegung wird beispielhaft an einem PARAPLAST Seil der Fa. CASAR (Kirkel) durchgeführt (Casar (b), 2020). Dieses Seil wurde gewählt, da es eine verdichtete Oberfläche besitzt und dadurch gut dekontaminierbar ist. Außerdem ist der Verseilfaktor deutlich höher als beim vergleichbaren DIN 15020-Seil. Der Seildurchmesser berechnet sich laut KTA 3902 und DIN 15020 für ein Spezialseil wie folgt:

$$c \times \sqrt{\frac{0,825 \times 0,455}{k \times f}} \times \sqrt{m \times 9,81 \times 0,66} = d_{min}$$

Das Gewicht einer BSK beträgt ca. 5.000 kg. Da die Seile (600 kg) und der Greifer (200 kg) zusammen 800 kg wiegen, müssen diese auch bei der Seilberechnung berücksichtigt werden. Der Füllfaktor des gewählten Seils beträgt $f = 0,709$ und der Verseilfaktor $k = 0,87$. Der Beiwert für diese Seilart in der Triebwerksgruppe 2m entspricht $c = 0,106$. Damit ergibt sich ein minimaler Seildurchmesser von $d_{min} = 16 \text{ mm}$. Es wird ein Seil mit 16 mm Durchmesser gewählt.

Bei einem Trommeldurchmesser von 3.000 mm und einer Seillänge von 350 m ergibt sich, inklusive der geforderten 2 Sicherheitswindungen auf der Trommel, eine Windungsanzahl von 40 Windungen und damit einer Trommelbreite von 640 mm pro Seil. Aus der Entfernung von der Seiltrommel zu Umlenkrolle und dem äußersten Punkt des Seils von 490 mm, ergibt sich ein maximaler Ablenkinkel von $3,73^\circ$. Die Mindestwandstärke der Trommel berechnet sich laut KTA 3902 überschlägig wie folgt:

$$h_{min} = \frac{S_{max} \times \nu}{R_{p0,2} \times s} = \frac{56.898 \text{ N} \times 1,5}{355 \text{ N/mm}^2 \times 16 \text{ mm}} = 15 \text{ mm}$$

Es wird eine Trommelwandstärke von 20 mm gewählt. Abbildung 50 zeigt das Modell einer Trommel des Doppeltrommelsystems.

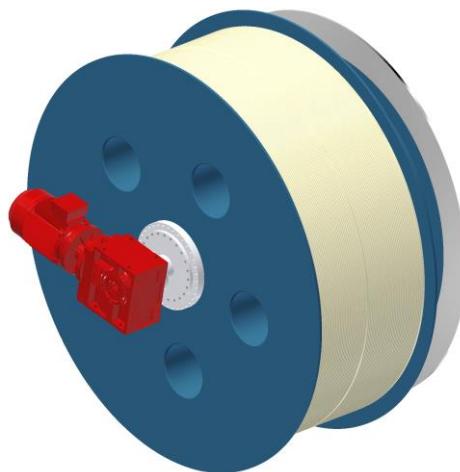


Abbildung 50: Seiltrommel mit Planetengetriebe und Winkelgetriebe

Aufgrund von seitlichen Bauraumbeschränkungen muss das Getriebe der Seiltrommel modifiziert werden. Es wird ein Liebherr PEG 650 Planetengetriebe gewählt. Dieses Getriebe kann in der Seiltrommel versenkt werden und benötigt dadurch keinen seitlichen Bauraum. Der Elektromotor wird über ein Kegelradgetriebe an das Planetengetriebe angeflanscht. Das erforderliche Drehmoment an der Seiltrommel beträgt 85.347 Nm. Das PEG 650 Getriebe ist 1:88 unterersetzt, sodass sich ein Eingangsmindestdrehmoment von 1.399 Nm ergibt. Der gewählte Motor (SEVA TEC, 2020) hat am Getriebeausgang ein Drehmoment von 1.459 Nm. Die maximale Drehzahl beträgt 189 U/min. Dies resultiert in einer maximalen Fördergeschwindigkeit von 29,2 m/min bzw. 0,49 m/s. Ein Vorteil des gewählten Getriebes ist, dass es bereits das Festlager für die Seiltrommel beinhaltet und dadurch ein Lagerbock eingespart werden kann.

4.3.3 Abschirmhaube

Die Abschirmhaube wurde weitestgehend von der bestehenden Konstruktion der Einlagerungsvorrichtung übernommen. Aufgrund der zwei Laststränge müssen die Umlenkrollen geändert werden. Es werden jeweils zwei Umlenkrollen auf einer Welle montiert. Der Wellendurchmesser wurde übernommen. Da sich die Last auf beide Scheiben verteilt und diese näher an den Lagerpunkt verschoben sind, ist das Biegemoment auf der Welle geringer. Von daher wird davon ausgegangen das diese Konstruktion die Anforderungen ebenso erfüllt wie die bestehende Konstruktion. Die Seilscheiben wurden gemäß DIN 15020 ausgelegt:

$$D_{min} = h_1 \times h_2 \times d_{min} = 20 \times 1 \times 15 \text{ mm} = 300 \text{ mm}$$

Aufgrund des ausreichend vorhandenen Bauraumes werden 500 mm gewählt. Der größere Durchmesser reduziert die Seilbelastungen durch Umlenkung und erhöht somit deren Lebensdauer.



Abbildung 51: Abschirmhaube modifiziert für 2 Laststränge

4.3.4 Greifer

Im Greifer befindet sich ein Linearaktuator. Dieser muss mit Strom versorgt werden. Des Weiteren sind Positionssensoren verbaut, sodass Signale übertragen werden müssen. Es können hierbei zwei Möglichkeiten in Betracht gezogen werden. Die bevorzugte Möglichkeit ist die Energieversorgung über die Förderseile. Es ist mit dem Hersteller der Förderseile zu prüfen, ob dies möglich ist. Die zweite Möglichkeit ist die Platzierung einer Kabeltrommel mittig zwischen den beiden Förderseilen. Diese Energieleitung kann mehrlagig gewickelt und zwischen den beiden Umlenkrollen der Förderseile in die Abschirmhaube geführt werden. Von dort wird es zum Greifer umgelenkt. Bei dieser Lösung wird das Kabel jedoch nicht vom Stahl der Förderseile geschützt. Auf Abbildung 52 wird die mögliche Position der Kabeltrommel dargestellt. Die Kabeltrommel wird zwischen den Hubstützen positioniert. Das Ab- und Aufrollen des Kabels muss mit den Förderseilen synchronisiert werden. Die kann elektronisch über eine Drehzahlregelung geschehen.

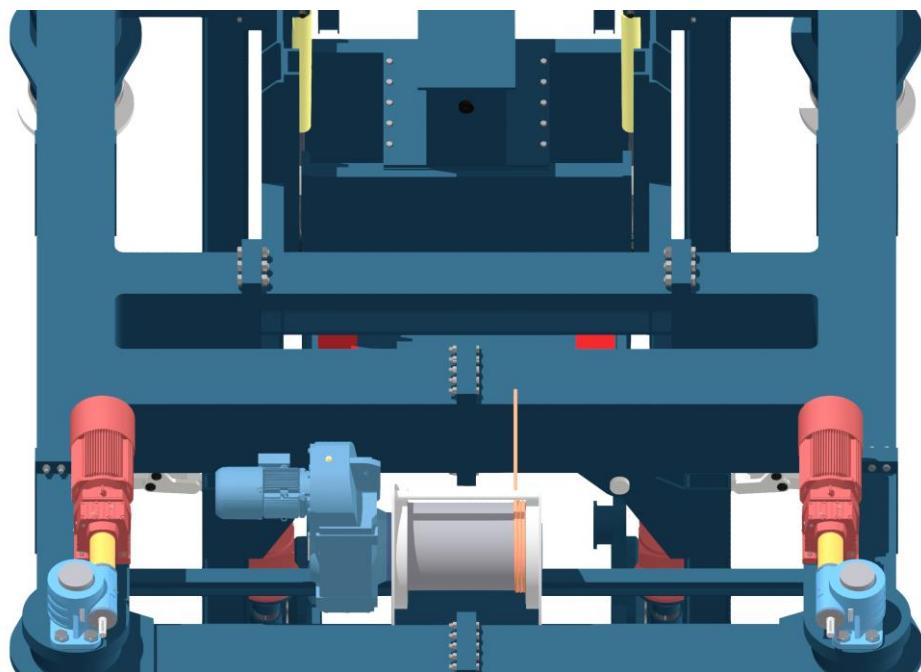


Abbildung 52: Ansicht auf Kabeltrommel für Energieversorgung

Vom bestehenden Greifer wird lediglich der Linearaktuator übernommen. Der bestehende Greifer wird nicht konform zur KTA 3902 betrachtet. Sollte ein Greiferarm brechen, würde dies zum Absturz der Last führen. Das Hinzufügen von weiteren Greiferarmen zum Aufbau von Redundanz ist konstruktiv nicht möglich, da der Bauraum für die Montage der Befestigungsbolzen nicht vorhanden ist. Zur Absicherung der BSK bei Bruch eines Greiferarms wird eine Neukonstruktion des Greifers durchgeführt.

Die konstruktive Umsetzung der Greiferarme ist von besonderer Bedeutung. Ein Absturz der BSK wird vermieden, indem die BSK seitlich geführt wird und auch bei Ausfall einzelner Greifarme nicht aus den verbleibenden Greifarmen herausrutschen kann. Am Greifarm führt ein gängiger Freistich mit kleinem Radius zu sehr hohen lokalen Spannungen am Umlenkpunkt der Spannungsvektoren (Abbildung 53). Wird dieser Freistich durch einen Korbbogen ersetzt, werden die Spannungen homogener über den Bauteilquerschnitt verteilt (Abbildung 54). Zusätzlich sollten in den Korbbogenbereich Druckeigenspannungen eingebracht werden. Diese können durch einen Kugelstrahlprozess oder durch Rollieren eingebracht werden. Diese Spannungen wirken den Zugspannungen entgegen und heben die Mittelspannung an. Dadurch wird die Dauerfestigkeit des Bauteils gesteigert.

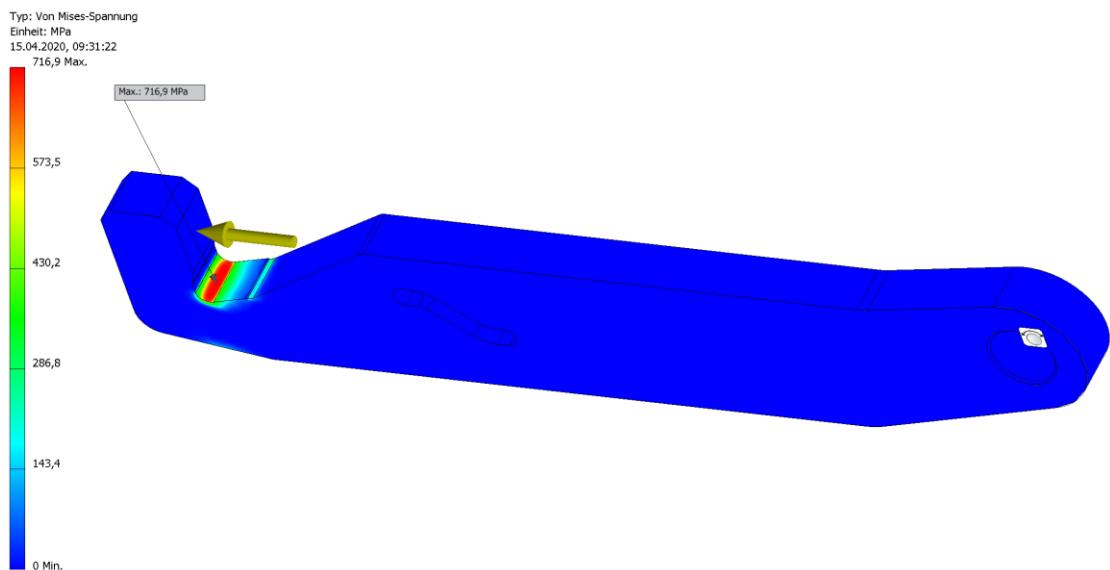


Abbildung 53: Mechanische Belastung der Greiferarme ohne Optimierung

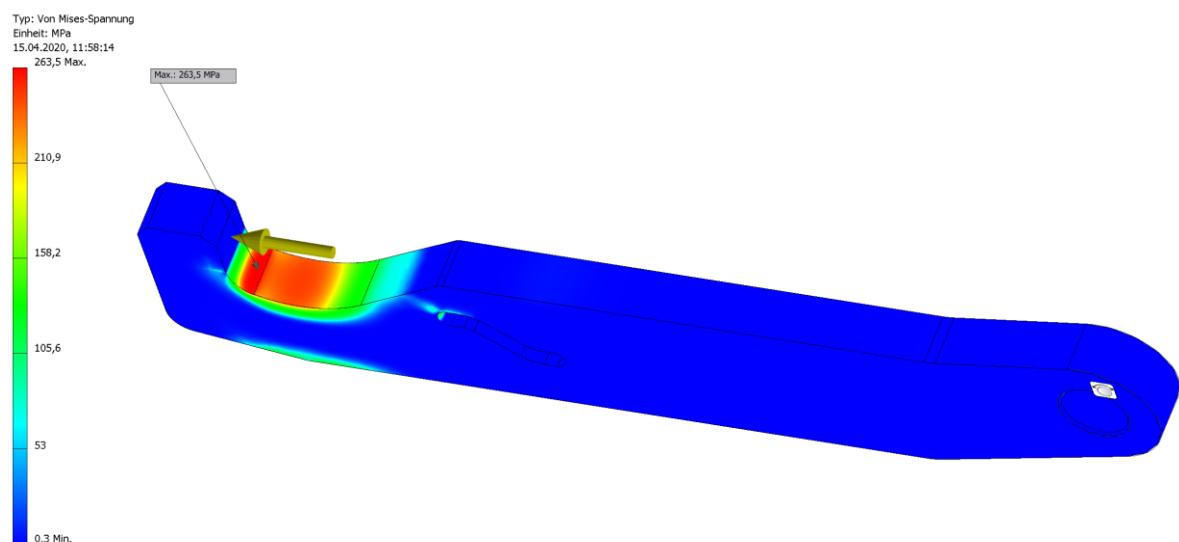


Abbildung 54: Mechanische Belastung der Greiferarme mit Optimierung

Die Greifarme sind an einer Grundplatte angeschlagen. Diese weist ähnlich hohe Spannungswerte wie die Greifarme auf (Abbildung 55). Hier werden die gleichen Maßnahmen zur Steigerung der Dauerfestigkeit empfohlen.

Der Greifer wird über einen Hubspindelaktuator bewegt. Dieser erzeugt mittels Kurvengetriebe die Schwenkbewegung der Greiferarme. Ein Teil ist in die Greifarme eingefräst. Das Gegenstück besteht aus gehärteten Passstiften. Der Hubspindelaktuator ist gebremst und selbsthemmend. Im Falle eines Stromausfalls bleibt der Greifer in Position. Sollte eine BSK gegriffen sein, kann diese in den Transferbehälter gezogen und dort abgestellt werden. Anschließend wird durch Bohrungen in der Abschirmhaube eine Arretierbolzen gelöst. Nun kann durch eine zweite Öffnung der gesamte Aktuormechanismus bewegt und die Greifarme geöffnet werden. Dies funktioniert auch, wenn die Aktuatorspindel brechen sollte und sich die Greifarme

nicht mehr öffnen. Die Greifarme sind selbsthemmend ausgelegt. Die Mechanik muss leicht entlastet werden bevor sich die Arme selbsttätig öffnen können. Eine Entlastung findet nur statt, wenn die BSK im Transferbehälter oder im Bohrloch abgestellt wird.

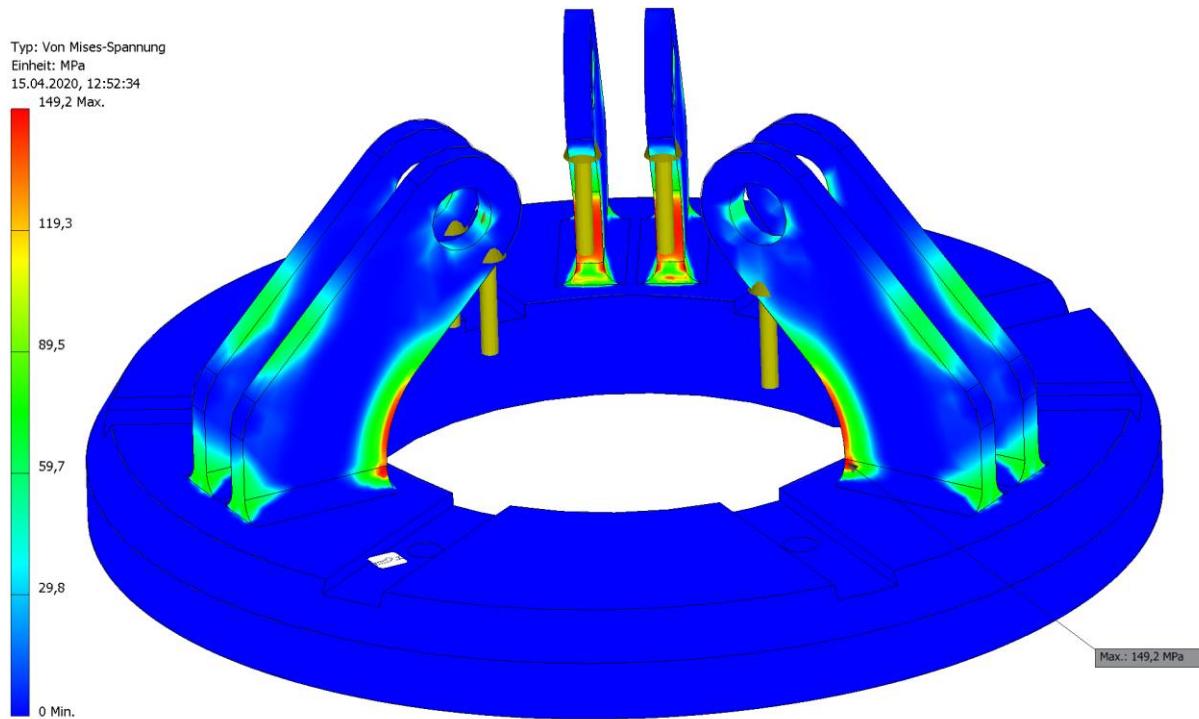


Abbildung 55: Belastungen der Greifergrundplatte

Der Seilanschlag erfolgt über einen Tragbalken (Abbildung 56). Dieser dient dazu, Längentoleranzen in den beiden Seilsträngen auszugleichen. Die Seile werden mit Vergussseilendhülsen am Tragbalken befestigt. Abbildung 57 zeigt das vollständige Modell des neu entwickelten Greifers.

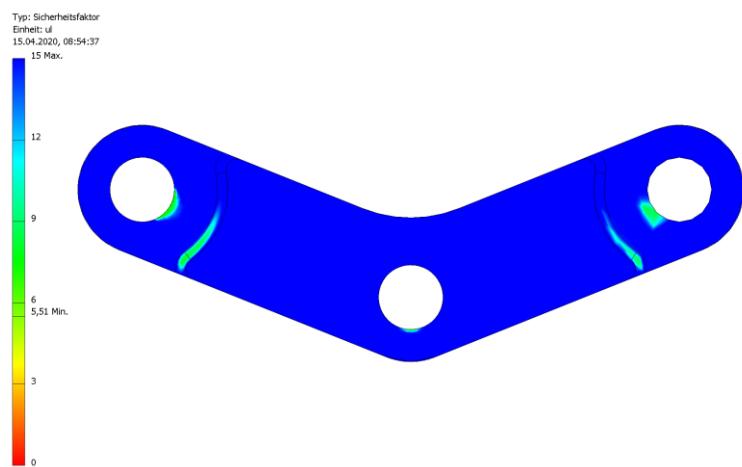


Abbildung 56: Belastungen des Tragbalkens

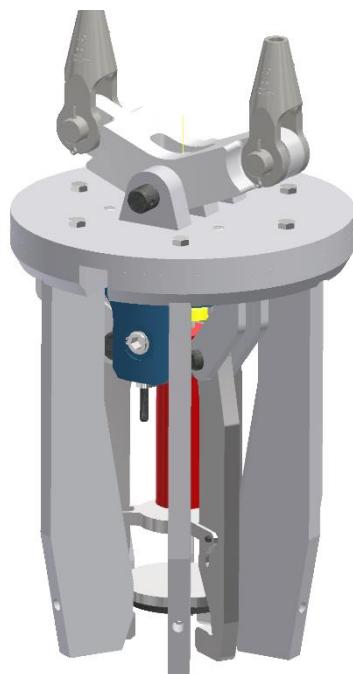


Abbildung 57: Modell des Greifers

4.3.5 Schwenkbalken

Das Schwenkwerk wird unverändert übernommen. Sowohl der Schwenkantrieb als auch die Antriebsmotoren sind unverändert verfügbar. Eine Überprüfung der Konstruktion zeigt, dass der Stahlbau, insbesondere der Anbau der oberen Lager, besondere Aufmerksamkeit erfordert. Die Ausführung des Anschlusses der Bleche an das IPE-Profil wird als kritisch betrachtet, da hier eine Umlenkung der Kraftrichtung sowie Schweißnähte aufeinandertreffen.

Die Versuche aus Filbert et al. (2010) haben gezeigt, dass die Gleitlagerung der Transferbehälteraufnahmen eine hohe Güte aufweisen muss. Während der ersten Versuche wies die Gleitlagerung einen zu hohen Reibwert auf und eine Bewegung fand nicht statt. Deshalb wird der Schwenkbalken mit einer Gleitlagerbuchse aus PTFE ((Polytetrafluorethylen) versehen. Bei diesem Material ist aufgrund der geringen Oberflächenenergie der Haftreibwert identisch mit dem Gleitreibwert. Dadurch ist kein initiales Losbrechmoment von Nötten, um die Bewegung in Gang zu setzen. Abbildung 58 zeigt Modell und Berechnung des Schwenkbalkens.

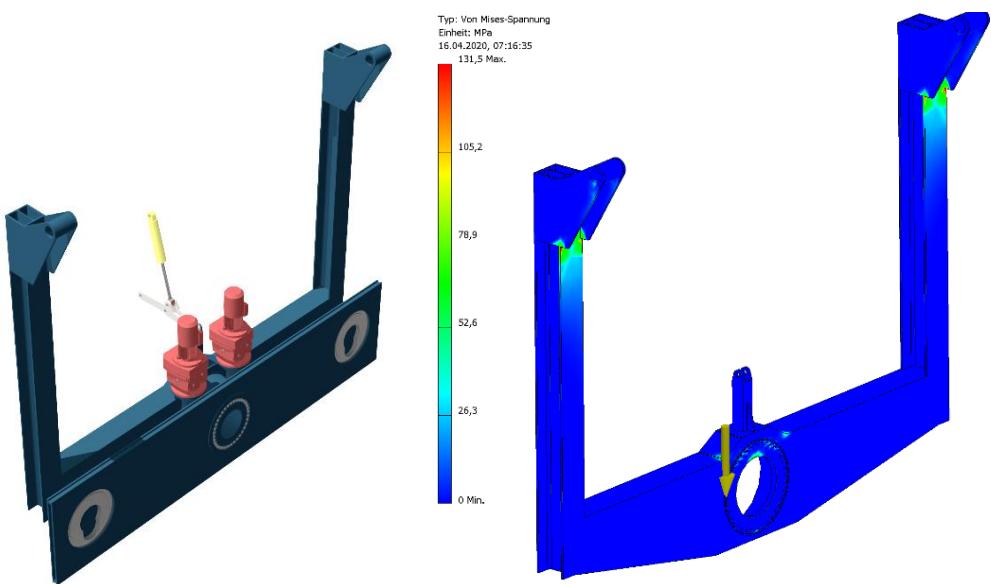


Abbildung 58: Schwenkbalken und Vergleichsspannungen

4.3.6 Transport der ELV

Es ist vorgesehen, die ELV im voll montierten Zustand auf einem Plateauwagen transportieren zu können. Die ELV ist dafür mit Tragzapfen am Schwenkbalken sowie am Stahlbau (Richtung Trommel) ausgestattet. Zum Transport werden die Hubstützen der ELV ausgefahren, um genügend Freiraum für den Plateauwagen zu schaffen. Anschließen fährt der Plateauwagen unter die ELV und hält auf einer vorher definierten Position. Die ELV wird langsam auf den Plateauwagen abgesenkt. Die Stützen werden bis zum Endanschlag eingefahren. Der Schwerpunkt der ELV liegt dann genau mittig über dem Plateauwagen. Das Gewicht der ELV wird über Tragzapfen auf dem Plateauwagen verlagert. Die eine Hälfte des Gewichts wird von den Schwenkbalken, die andere durch den Stahlbau der ELV getragen (Abbildung 59). Der Abstand des Anschlagpunktes zum Drehwerk beträgt 245 mm. Das resultierende Reaktionsmoment, welches das Drehwerk abfangen muss, beträgt 42.875 Nm pro Drehwerk. Das zulässige Haltmoment für die Schwenkwerke beträgt laut Hersteller 99.010 Nm. Die FEA zeigt eine Verschiebung (Abbildung 60) von unter 2 mm am Schwenkwerk. Dies ist ausreichend maßhaltig, um einen sicheren Transport zu gewährleisten. Für die ELV besteht keine Gefahr, aufgrund von Deformation vom Plateauwagen zu rutschen.

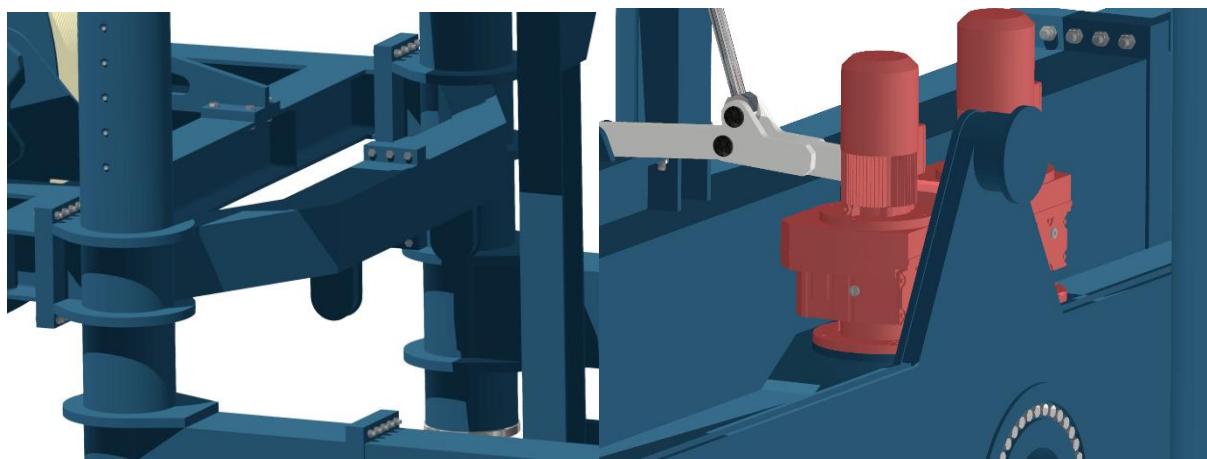


Abbildung 59: Tragzapfen am Stahlbau (links) und Schwenkbalken (rechts)

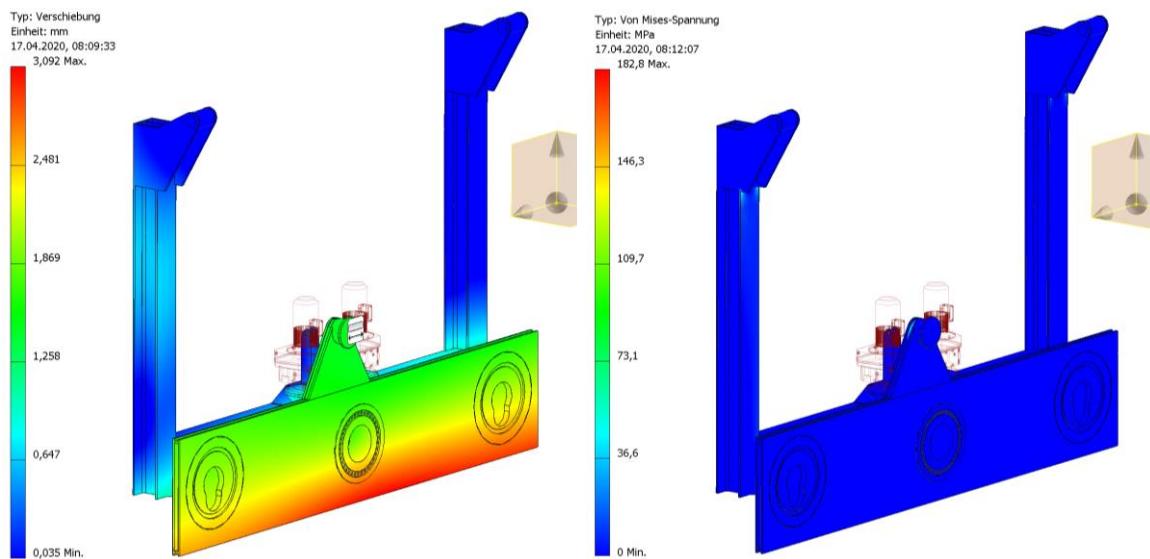


Abbildung 60: Verschiebung bei Transport (links) und Vergleichsspannungen bei Transport (rechts) am Schwenkbalken

Die Vergleichsspannungen im Stahlbau (Abbildung 61) liegen beim Transport deutlich unter den maximal zulässigen Werten. Die Konstruktion ist für den Transport ausreichend bemessen. An den hinteren Tragelementen sind die Stützen angeschweißt. Auf der Mittelebene der ELV treffen sich beide Tragbalken und sind dort miteinander verschraubt. An dieser Stelle wird ebenfalls eine geringe Verschiebung (Abbildung 61) von max. 2 mm erwartet, so dass hier keine Probleme durch Abrutschen oder hohe Reaktionslasten zu erwarten sind.

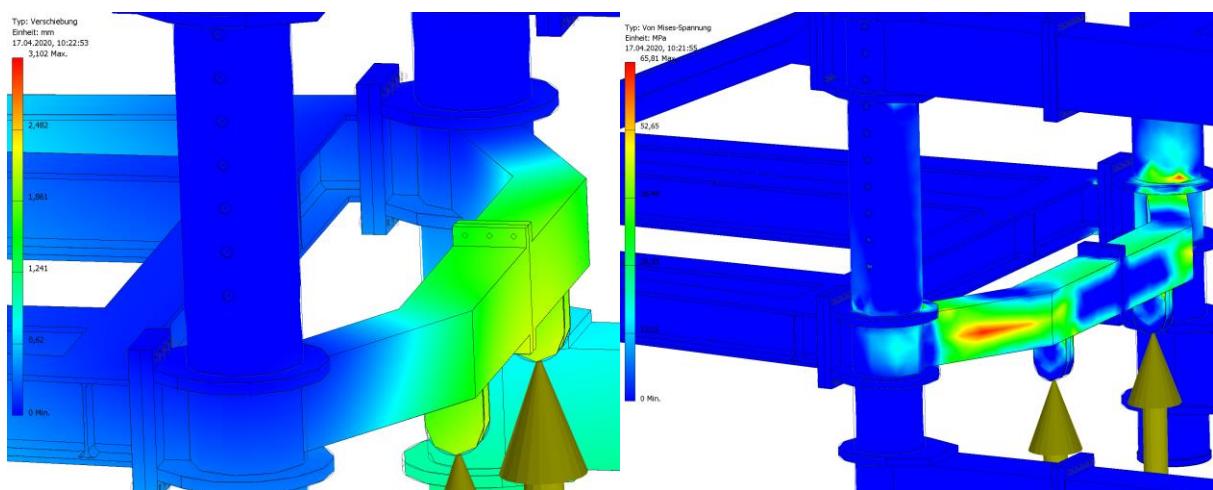


Abbildung 61: Verschiebung bei Transport (links) und Vergleichsspannungen bei Transport (rechts) am Stahlbau

4.3.7 Plateauwagen

Der Plateauwagen (Abbildung 62) wird um die Tragwanne herum aufgebaut. Die Tragwanne bietet Montagepunkte für das Los- und das Festlager der Drehkästen. Des Weiteren sind die Aufnahmepunkte für ELV bzw. Transferbehälter untergebracht. Die Aufnahmepunkte sind über Tellerfederpakete vom Plateauwagen entkoppelt. Am vorderen und hinteren Ende des Wagens befinden sich Aufpralldämpfer. Der Wagen verfügt über keinen eigenen Antrieb und kann nur mit einer Zugmaschine bewegt werden. Jedoch sind Feststellbremsen vorhanden um ein Wegrollen des Wagens zuverlässig zu verhindern.

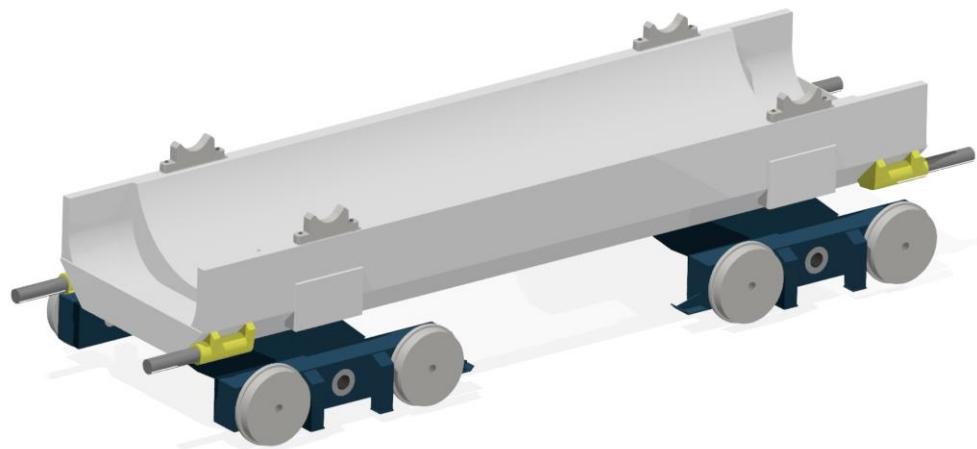


Abbildung 62: Modell des Plateauwagens

Es ist genügend Bauraum für Bremsscheiben mit dem Durchmesser von 400 mm vorhanden. Es können 4 Bremsanlagen mit jeweils 2 Bremszylindern an den inneren 4 Rädern montiert werden. Die Bremsanlage wird im 3D Model nicht dargestellt. Es wird angenommen, dass die

Bremsen in der Lage sein müssen, 100 Mg an einem 2° Gefälle sicher zu halten. Die 100 Mg wurden großzügig gewählt, um auch ein Zugfahrzeug im Notfall halten zu können.

$$F_{Brems} = m \times g \times \sin \alpha = 100.000 \text{ kg} \times 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \times \sin(1,15^\circ) = 19.688 \text{ Nm}$$

Das nötige Bremsmoment an einer 400 mm Bremsscheibe (mittlerer Reindurchmesser 350 mm) beträgt:

$$M_B = F_{Brems} \times \frac{D_{Reib}}{2} \div n = 19.688 \text{ N} \times \frac{350 \text{ mm}}{2} \div 8 = 215,3 \text{ Nm}$$

Eine SB17MX-132 Bremse hat bei 400 mm Bremsscheibendurchmesser ein maximales Bremsmoment von 435 Nm. Die Haltekraft würde bei einem Ausfall von 4 Bremszylindern immer noch ausreichen, um den beladenen Plateauwagen sicher am Gefälle zu halten. Der Rad durchmesser berechnet sich nach DIN 15070. Diese Norm wurde von DIN EN 13001 abgelöst, jedoch wird weiterhin die Möglichkeit geboten, eine unkomplizierte Überschlagsrechnung für den Raddurchmesser durchzuführen. Zunächst wird die Radkraft berechnet:

$$R = \frac{m_{ges} \times g}{8} = \frac{80.000 \text{ kg} \times 9,8 \text{ m/s}^2}{8} = 98,1 \text{ kN}$$

Nach DIN 15070-Tabelle 2 beträgt für eine Schiene mit 590 N/mm² Zugfestigkeit die maximale Flächenpressung 5,6 N/mm². Die nutzbare Schienenkopfbreite beträgt für eine RiPH37A Schiene 37,58 mm. Für den Drehzahlbeiwert und den Betriebsdauerbeiwert werden jeweils 1 angenommen. Damit ergibt sich ein benötigter Mindestraddurchmesser von:

$$d = \frac{R}{c_{2an} \times c_{3an} \times p_{zul} \times b} = 465 \text{ mm}$$

Es wird ein Raddurchmesser von 500 mm gewählt. Dies sollte eventuelle Abweichungen in den Beiwerthen hinreichend kompensieren. Damit sichergestellt ist, dass genügend Bauraum für die Radsatzwellen vorhanden ist, werden diese überschlägig wie folgt berechnet:

Der Hebelarm zwischen Rad und Wippenkasten beträgt laut CAD ungefähr 100 mm. Mit der bereits berechneten Radkraft ergibt sich ein Biegemoment von $M_B = 9.807 \text{ Nm}$ am Wellenende. Da zusätzlich zu der Achse eine Bremswelle benötigt wird, wird diese als Hohlachse ausgeführt. Es wird ein Außendurchmesser von $d_A = 100 \text{ mm}$ gewählt. Um die Dauerfestigkeit zu gewährleisten wird die Biegespannung auf maximal $M_b = 150 \text{ Nm}$ festgelegt. Das erforderliche Widerstandsmoment für die Welle beträgt:

$$w_{erf} = \frac{M_B}{\sigma_{Bzul}} = 65.378 \text{ mm}^3$$

Der Innendurchmesser für eine Hohlwelle berechnet sich damit wie folgt:

$$d_i = \sqrt[4]{d_a^4 - \frac{32 \times d_a \times w_{erf}}{\pi}} = 76 \text{ mm}$$

Bei der Berechnung des Tragwannenentwurfs (Abbildung 63) zeigt sich, dass es zu Maxima der Vergleichsspannungen kommt, welche die Materialeigenschaften des Baustahls überschreiten. Diese lokalen Spannungsmaxima entstehen durch die lokal hohe Steifigkeit des Stirnbleches. Bei der Detailkonstruktion sollte angestrebt werden, den Wagen über den Lagern auszusteifen. Dies reduziert den Steifigkeitssprung und verteilt die Spannungen gleichmäßig über den Querschnitt. Damit sollten die Materialparameter, selbst mit einem ausreichenden Sicherheitsbeiwert, nicht überschritten werden. Dies zeigt auf, dass bei einer Grobauslegung bei komplexen Geometrien, eine sehr hohe Abweichung zwischen Handrechnung und FEA auftreten kann. Betrachtet man nur den Schnitt über dem Lager, ist die Biegespannung deutlich geringer, da das Stirnblech nicht betrachtet wird.

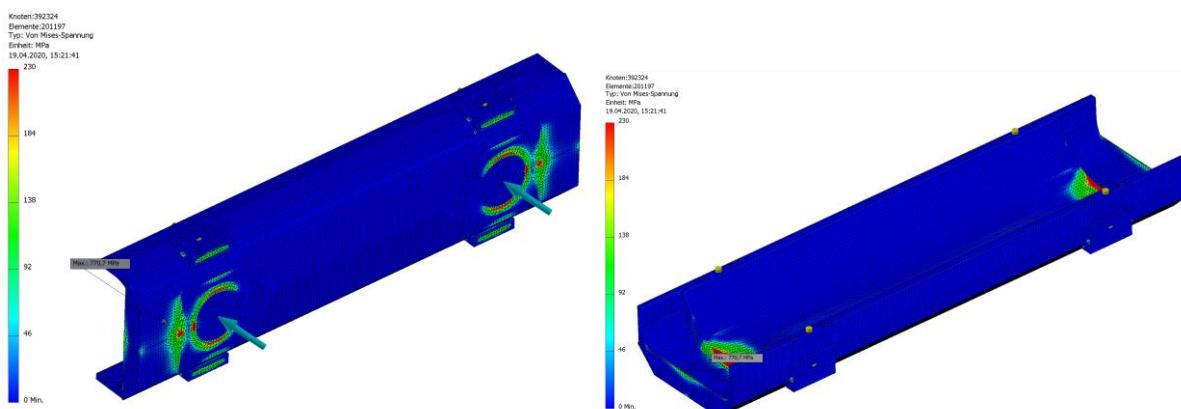


Abbildung 63: Spannungen an der Tragwanne an der Unterseite (links) und Oberseite (rechts)

Die Berechnungsergebnisse des Radschemelkastens und des Wippenkastens sind auf Abbildung 64 dargestellt. Die Belastung überschreitet die Materialkennwerte für die Dauerfestigkeit nur punktuell. Auch hier kann eine gewissenhafte Detailkonstruktion mit konstruktionsbegleitender Berechnung zu einer dauerfesten Baugruppe führen, welche unter den gegebenen Randbedingungen die Materialeigenschaften nicht überschreitet.

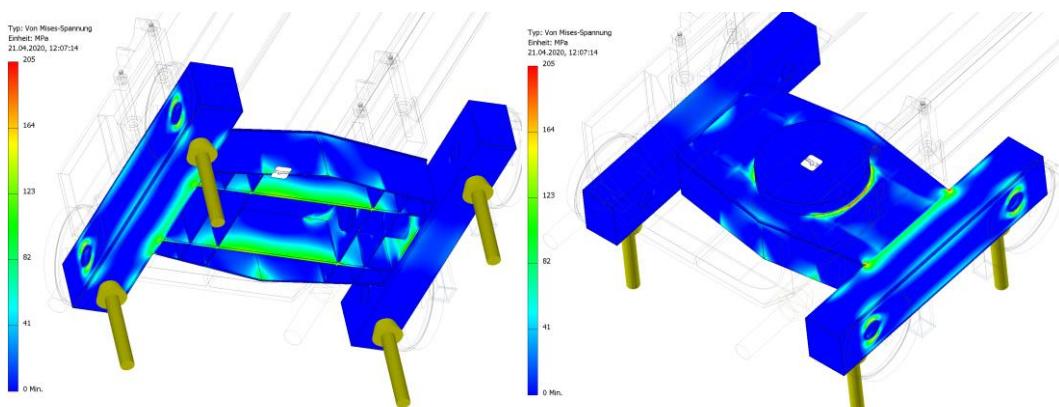


Abbildung 64: Spannungen am Radschemelkasten und Wippenkasten

Auf Abbildung 65 und Abbildung 66 wird der Plateauwagen mit ELV als Nutzlast dargestellt. Diese Belastung dient als Auslegungskriterium für die Komponenten. Die ELV hat während des Transports einen Abstand zum Boden von 100 mm.

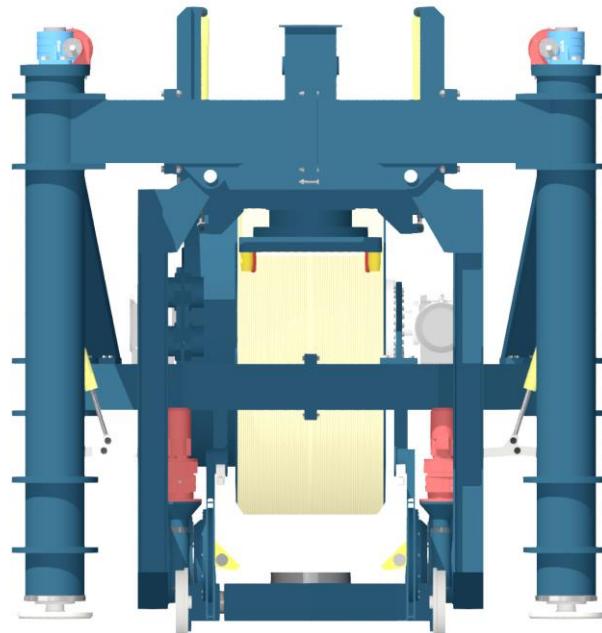


Abbildung 65: Frontalansicht bei Transport

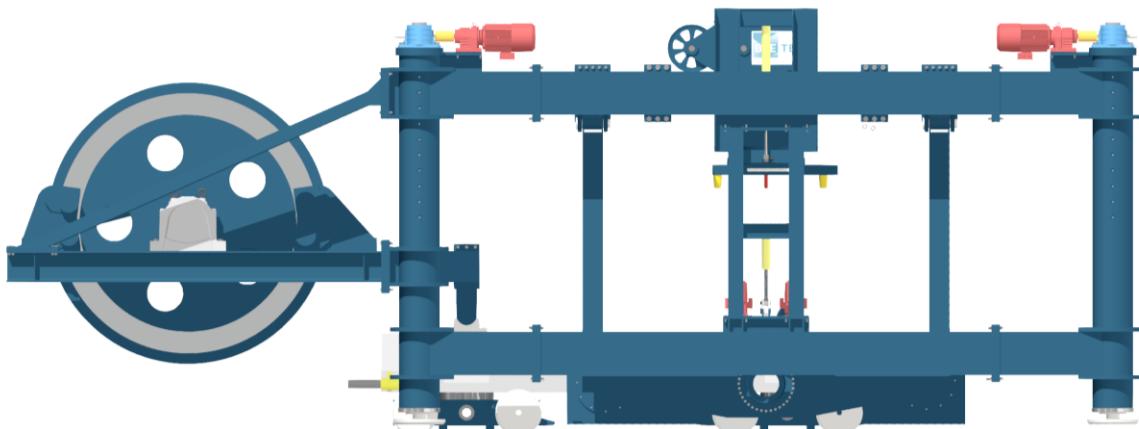


Abbildung 66: Seitenansicht bei Transport

4.3.8 Transferbehälter

Der von GNS entwickelte Transferbehälter (Abbildung 67) erfüllt weiterhin die Anforderungen des Einlagerungsvorganges. Von daher wird der Transferbehälter unverändert übernommen. Die CAD Daten wurden durch GNS bereitgestellt und aufgearbeitet, um diese in das Modell der Gesamtbaugruppe einzufügen zu können. Dadurch ist es möglich, Bewegungsabläufe zu animieren und zum Beispiel Bauteilkollisionen aufzuzeigen. Der Transferbehälter wiegt inkl. Behälterschleusen 45,7 Mg.

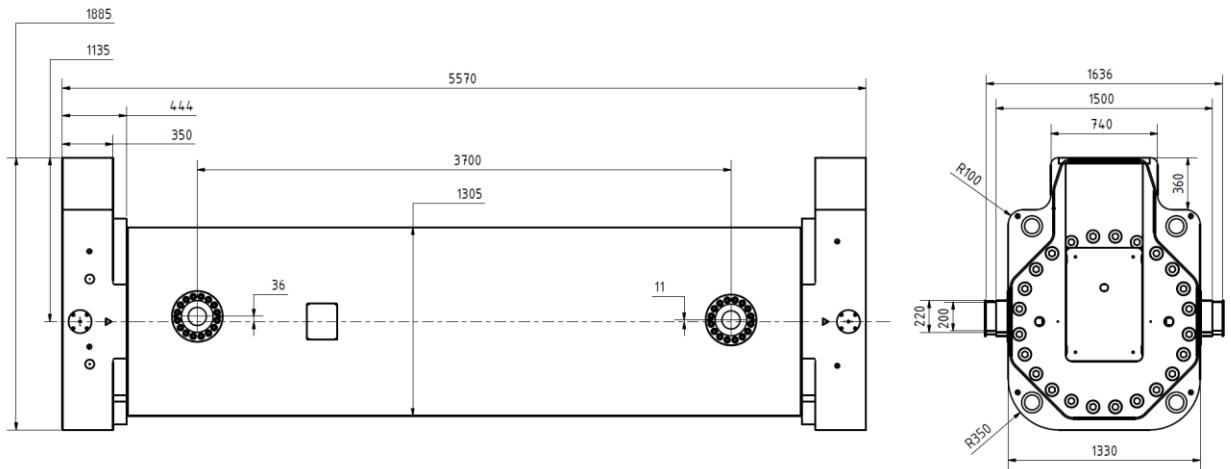


Abbildung 67: **Technische Skizze des Transferbehälters (Filbert et al., 2010)**

4.3.9 Bohrlochschleuse

Die Bohrlochschleuse (Abbildung 68) wurde in Verbindung mit dem Transferbehälter ebenfalls von der GNS entwickelt. Da es sich um ein abgestimmtes System handelt und kein Änderungsbedarf zu erkennen ist, wird die Bohrlochschleuse unverändert übernommen. Die bereitgestellten CAD Daten wurden hier ebenfalls aufbereitet und für eine Bewegungssimulation angepasst.

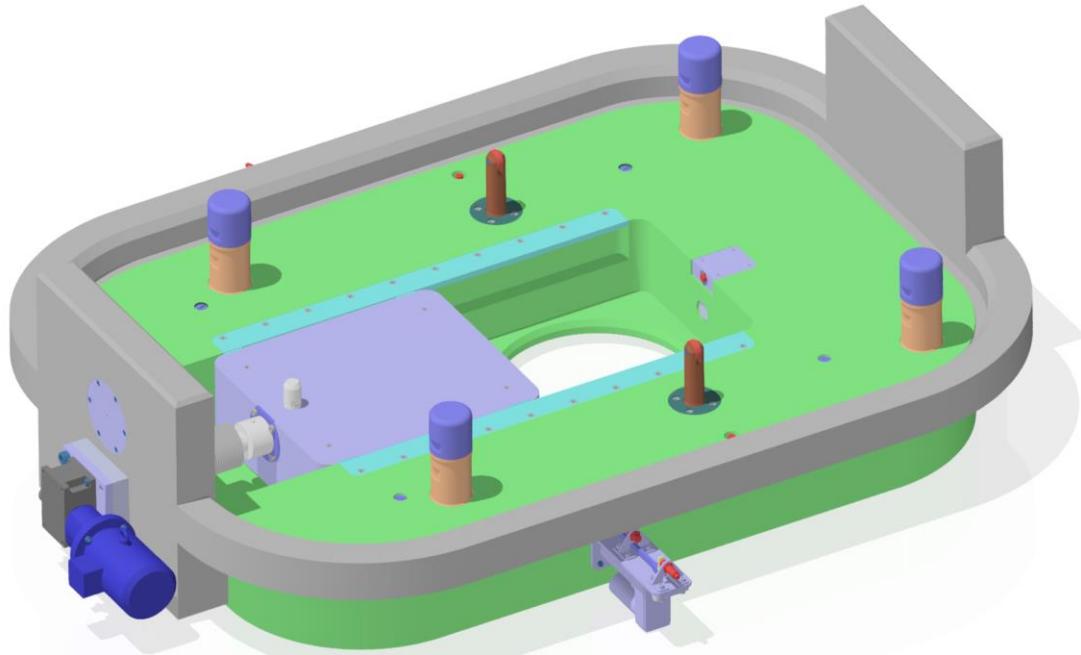


Abbildung 68: **Modell der Bohrlochschleuse**

4.3.10 ELV Schleuse

Zum Öffnen der oberen Transferbehälterschleuse wird diese mit ihrem Gegenstück auf der ELV verbunden. Dieses Gegenstück wird im Folgenden als ELV Schleuse bezeichnet. Bei der Entwurfskonstruktion der ELV wurde festgestellt, dass der Schieberantrieb der bestehenden Konstruktion mit dem Stahlbau kollidieren würde.

Eine Änderung an der ELV würde die Bauhöhe erhöhen. Eine weitere und die hier verfolgte Möglichkeit ist, die Schieberantriebe an die Seite der Abschirmhaube zu verlegen. An den Seiten ist ausreichend Bauraum vorhanden. Die Dichtwirkung der Abschirmhaube kann weiterhin gewährleistet werden, wenn dieser Mechanismus mit einer gedichteten Haube abgedeckt wird. Dies würde gleichzeitig auch den Schmutzeintrag reduzieren. Die bewegten Dichtungen an der Gewindestange, sowie die Faltenbälge entfallen ebenfalls. Dies steigert die Zuverlässigkeit. Außerdem ist Redundanz durch die zweimotorige Auslegung gegeben. Abbildung 69 zeigt das Modell der bauraumoptimierten ELV Schleuse.

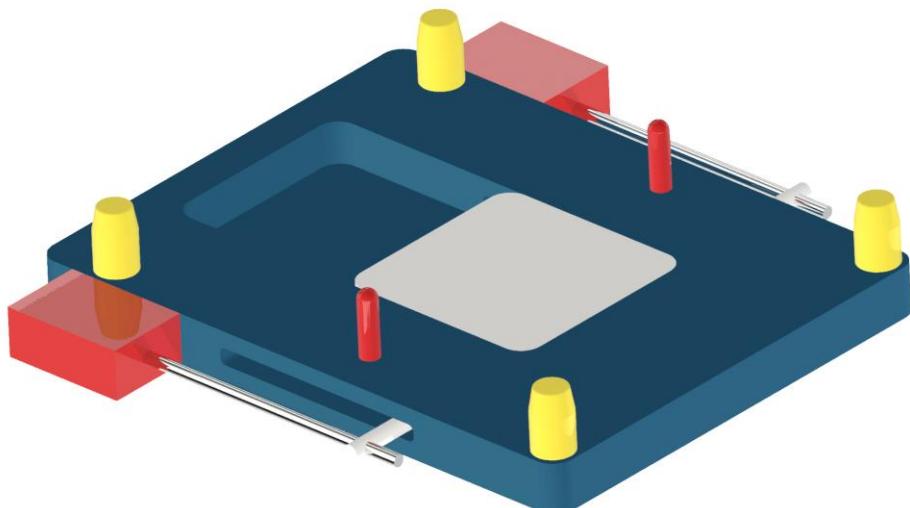


Abbildung 69: Konzept für eine bauraumoptimierte ELV Schleuse

4.3.11 Bohrlochkeller

Die Geometrie des Bohrlochkellers, wie in Abbildung 70 dargestellt, sollte als Minimalgröße angesehen werden. Der Bohrlochkeller bietet gerade genügend Raum für Bohrlochschleuse und Gleistragwerk. Die schräge Wand des Bohrlochkellers gibt die Rotationsrichtung des Transferbehälters in die Vertikale und zurück vor.

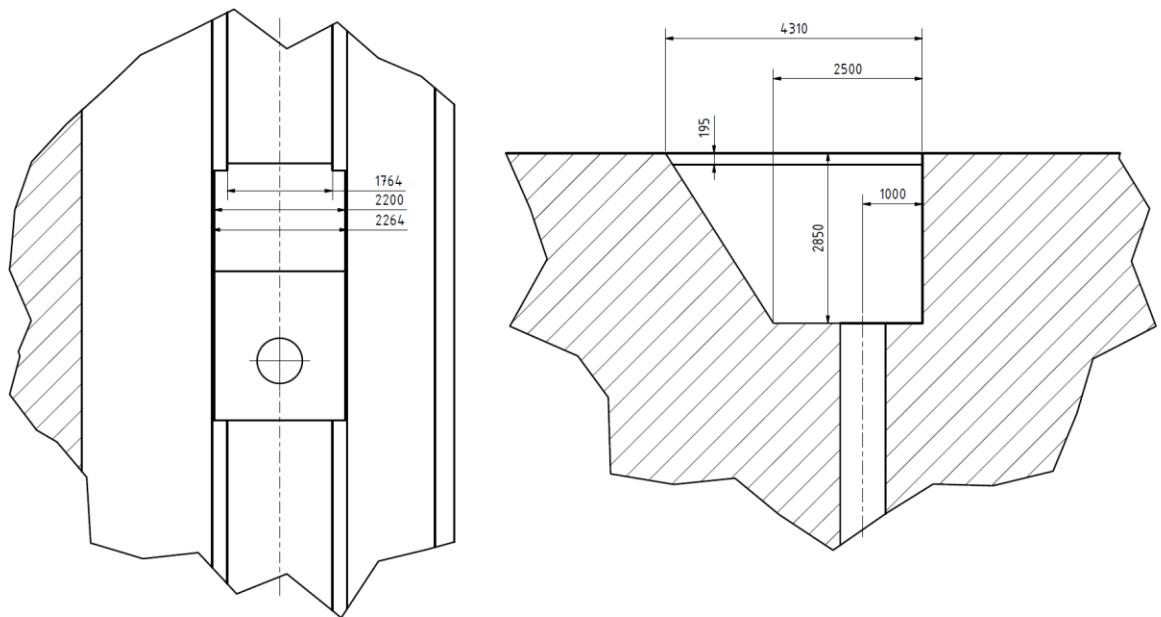


Abbildung 70: Minimalmaßmaße des Bohrlochkellers

4.3.12 Gleise innerhalb der Bohrlochüberfahrungsstrecke

Für den Gleisbau werden Nuten im Grundgebirge (Abbildung 71) erstellt. Es sollten erhöhte Anforderungen an die Ebenheit dieser Nuten gestellt werden. Das Gleis wird in diese Nuten verlegt. Mithilfe von Ausgleichsplatten zwischen Sohle und Gleis kann die Ebenheit der Gleisanlage sichergestellt werden. Die Ausgleichsplatten sollten eine Mindestdicke aufweisen. Diese ist nötig, damit der Mörtel zwischen Gleis und Gebirge eingebracht werden kann. Nicht vollständig unterfüllte Gleise könnten ansonsten beschädigt werden. Die Gleise werden auf einer Stahlkonstruktion (Abbildung 71) über den Bohrlochkeller hinweg geführt.

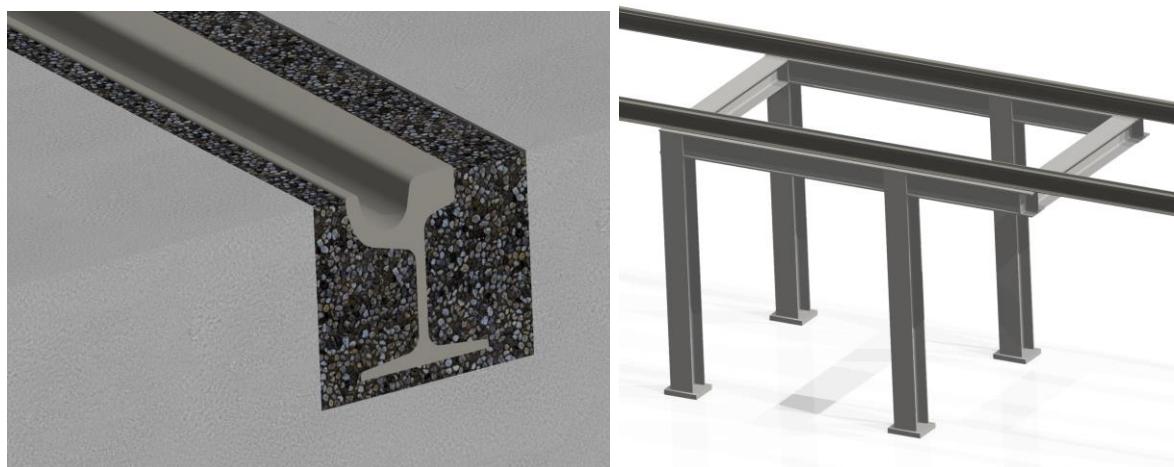


Abbildung 71: Gleisaufbau unter Tage (links) und Stahlkonstruktion zur Überfahrung des Bohrlochkellers (rechts)

4.4 Alternativbetrachtung 1 ohne Bohrlochkeller

Für den Einlagerungsvorgang im Kristallingestein oder im Tongestein werden im Gegensatz zum Steinsalz deutlich kürzere Bohrlöcher in Erwägung gezogen, in denen nur bis zu drei BSK eingelagert werden. Für diese Bohrlöcher lässt sich eine abdeckende Teufe von 50 m ansetzen. Im Kristallingestein soll außerdem, insbesondere in der Variante des multiplen ewG, auf den Bohrlochkeller verzichtet werden. Für Kristallingestein kann außerdem aufgrund der Kupferummantelung von einem erhöhten Gewicht des einzulagernden Gebindes von bis zu 10 Mg ausgegangen werden. Für die Einlagerung ohne Bohrlochkeller ist der Hub der Teleskopstützen nicht ausreichend. Der Freihub vom Plateauwagen ist zwar weiterhin möglich, jedoch würde der Transferbehälter beim Schwenkvorgang mit dem Gleisbett kollidieren. Des Weiteren ist die Behältermasse des Abfallgebindes aufgrund der Kupferummantelung des Behälters zur Einlagerung im Kristallingestein etwa doppelt so groß. Dies macht eine Modifikation des Antriebsstrangs nötig. Die entsprechenden Anpassungen an der ELV werden im Folgenden untersucht.

4.4.1 Anpassung der Stützen

Die bereits erprobte Bauart der Stützen stößt in der Variante ohne Bohrlochkeller an die Grenzen des technisch Möglichen. Da ein Hub von ca. 3 m erforderlich ist, muss bei der bestehenden Konstruktion entweder die Führungslänge der Lagerung halbiert oder das Stützengehäuse nach oben hin um 1 m verlängert werden. Von der Reduzierung der Führungslänge und der gleichzeitigen Erhöhung des Hubs wird abgesehen, da es die Stabilität drastisch reduzieren würde. Eine Verlängerung des Stützengehäuses ist ebenfalls problematisch, da die Transportstrecken dann einen vergrößerten Querschnitt benötigen und die Erstellungskosten stark steigen würden. Deshalb wird ein zweistufiger Teleskopmechanismus bevorzugt. Die Führungslänge der Stützen zueinander wird bei 2 m belassen. Das Rohr am Fuß des Teleskopes behält seinen Außendurchmesser und das Gehäuserohr wächst im Durchmesser (Abbildung 72).

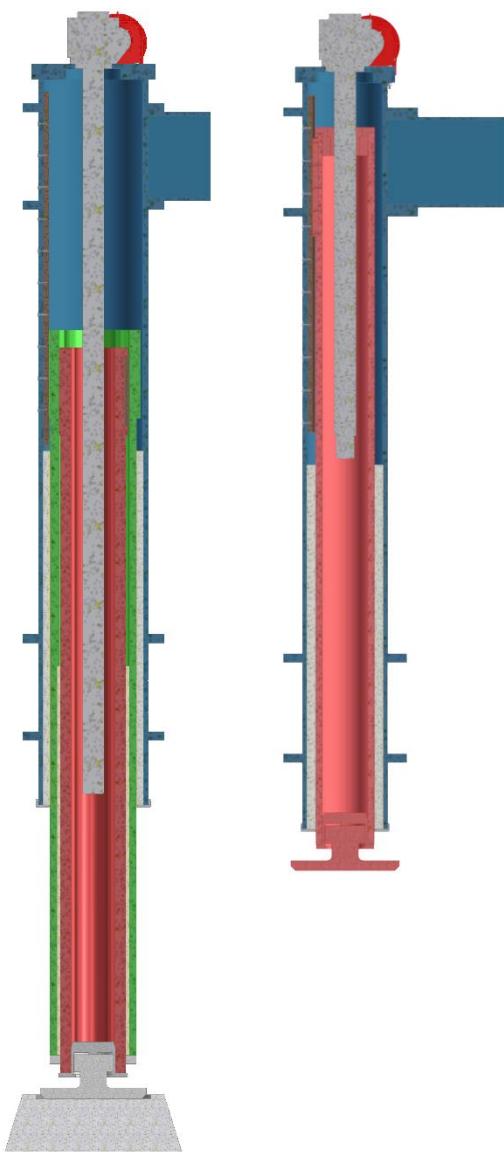


Abbildung 72: Vergleich der beiden Stützenkonstruktionen mit der einstufigen Stütze rechts und der zweistufigen Teleskopstütze links

Für den sicheren Stand der Einlagerungsvorrichtung wird ein Betonsockel unter jedem Stützenfuß benötigt. Dieser Betonsockel wird nötig, da die Gleise in diesem Fall nicht in Schlitzen in der Sohle versenkt sind, sondern auf einem Schotterbett liegen (vgl. Kapitel 4.2.1). Der Schüttkegel des Schotterbettes würde ohne Betonsockel in die Aufstandsfläche hineinragen. Der Antrieb der Stützen bleibt bis auf die Gewindespindellänge unverändert.

4.4.2 Anpassung der Seiltrommel

Da sich das Behältergewicht durch die Kupferummantelung der BSK verdoppelt, wird auch die doppelte Seilzugkraft benötigt. Diese wird erreicht, indem der Seiltrommelmardurchmesser auf 1.500 mm halbiert wird. Von einer Verdopplung des Motordrehmoments oder Getriebeunter-

setzung wird abgesehen. Dies macht einen Nachweis für zwei unterschiedliche Antriebskonzepte nötig. Eine „Gleichteile-Strategie“ ermöglicht eine wenig aufwändige Anpassung der Maschinen auf unterschiedliche Wirtsgesteine.

Für die existierenden Konzepte der Bohrlochlagerung im Kristallingestein ist die Annahme von Bohrlöchern mit 50 m Tiefe ausreichend. Es wird deshalb eine vergleichsweise geringe Seillänge benötigt, sodass es keine Probleme gibt, den maximalen Ablenkinkel einzuhalten. Der Seildurchmesser wird für eine Behältermasse von 10 Mg gemäß Kapitel 4.3.2 ausgelegt. Für das dort genannte Spezialseil ergibt sich ein Mindestdurchmesser von 21,04 mm. Es wird ein Seildurchmesser von 22 gewählt. Für 50 m Seillänge sind 11 Windungen auf der Seiltrommel notwendig, damit ergibt sich eine notwendige Trommelbreite von weniger als 250 mm pro Seilstrang. Damit ist die Seiltrommel deutlich schmäler ausgeführt als in der Variante zur Einlagerung mit Bohrlochkeller und der Ablenkinkel ist somit deutlich geringer. Die Variante der Einlagerungstechnik mit Bohrlochkeller könnte ebenfalls mit einer vergleichbaren Trommel ausgestattet werden, wenn eine geringe Bohrlochtiefe gewählt wird, z. B. bei der Einlagerung im Tongestein. Abbildung 73 zeigt die Einlagerungstechnik am Einlagerungsort mit allen erfolgten Modifikationen.

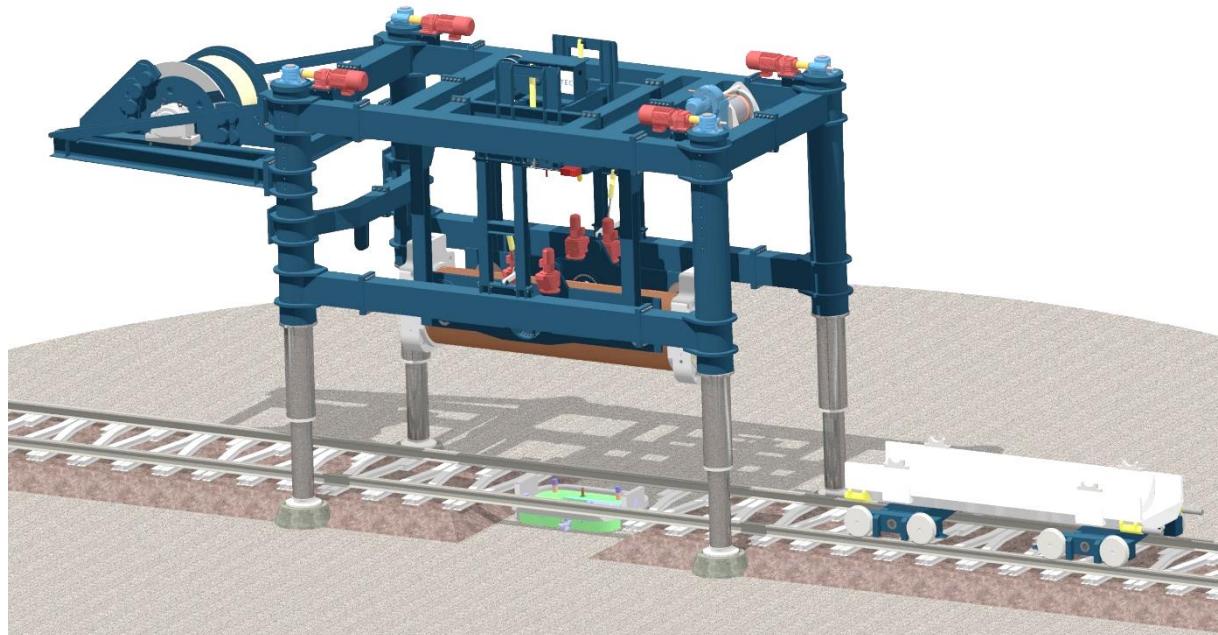


Abbildung 73: Modell der Einlagerungsvorrichtung am Einlagerungsort nach Anpassung für die Einlagerung ohne Bohrlochkeller

4.5 Alternativbetrachtung 2 ohne Bohrlochkeller

Da im Kristallingestein nur maximal ein bis drei BSK je Bohrloch für die Einlagerung vorgesehen sind, ist zu überprüfen, ob eine vollständig andere Konstruktion der Einlagerungstechnik in dieser Variante ebenfalls Vorteile bereithält. Speziell im KBS-3 Konzept muss die Einlagerungsvorrichtung für jeden Einlagerungsvorgang neu positioniert und ausgerichtet werden.

Des Weiteren müssen hohe Streckenquerschnitte innerhalb und außerhalb der Einlagerungsstrecken erstellt werden, wenn auf den Bohrlochkeller verzichtet wird. Dies ist bedingt durch die große Bauhöhe der Einlagerungsvorrichtung, welche wiederum aus der Teleskopstützenkonstruktion resultiert. Die Länge der Teleskopstützen ist direkt von der Hubhöhe abhängig. Der Schlüsselvorgang im Bewegungsablauf ist das Andocken des Transferbehälters auf die Bohrlochschleuse. Für diesen Vorgang wird ein Hub von ungefähr 250 mm benötigt. Die übrigen 2.550 mm Hubhöhe werden benötigt, um den Behälter vom Plateauwagen freihaben zu können und anschließend zu drehen. Von daher wird die Möglichkeit geprüft, den Freihub vom Plateauwagen überflüssig zu machen und somit die Hubhöhe drastisch reduzieren zu können. Zu diesem Zweck wird die (kleine) Seiltrommel direkt auf dem Plateauwagen montiert (Abbildung 74) und damit sowohl die Transport- als auch die Einlagerungsfunktion auf einer Vorrichtung kombiniert und im Folgenden als „Einlagerungswagen“ benannt.

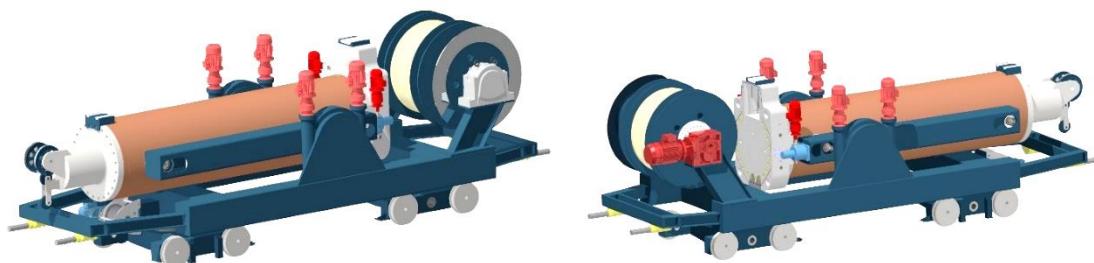


Abbildung 74: Ansichten des Modells des Einlagerungswagens der Alternativbetrachtung 2

Für den Schwenkvorgang des Transferbehälters in die Vertikale werden Schwenkantriebe vorgesehen, die in ihrer Bauart den erprobten Schwenkantrieben der ELV entsprechen. Das Drehmoment dieser Schwenkantriebe ist ausreichend, um einen um 1.500 mm außermittig gelagerten Transferbehälter zu bewegen. Der Antrieb erfolgt mittels Planetengetriebe-Elektromotoren und ist redundant ausgeführt. Die Antriebsleistung ist weiterhin ausreichend, wenn ein Motor ausfällt. Das Absenken des Transferbehälters wird durch zwei Trapezgewindespindeln gelöst. Die Tragbalken, an denen der Transferbehälter befestigt ist, können so um 250 mm verschoben werden. Eine redundante Ausführung mit vier Getriebemotoren ist ebenfalls denkbar (Abbildung 75).

Der Greifer der Einlagerungsvorrichtung befindet sich in der fest auf der Oberseite vom Transferbehälter montierten Abschirmhaube. Da die Förderseile mit dem Greifer verbunden sind, wird die Seillänge beim Schwenken des Behälters kontinuierlich nachreguliert. Dies kann über Drehwinkelgeber an Schwenkwerk und Seiltrommel realisiert werden. Um die Bauhöhe so gering wie möglich zu halten, wird die Seiltrommel in tiefst möglicher Position montiert. Dies hat zur Folge, dass das Seil mit dem Transferbehälter in Kontakt kommt. Um eine Beschädigung des Seiles zu verhindern, sind Seilführungen an der Oberseite des Transferbehälters vorgesehen. Das Fahrwerk wird vom Plateauwagen übernommen, da es bis 80 Mg ausgelegt und erprobt ist. Sollte die Gesamtmasse die 80 Mg überschreiten, ist es jedoch möglich, durch einen größeren Raddurchmesser die Tragfähigkeit zu erhöhen.

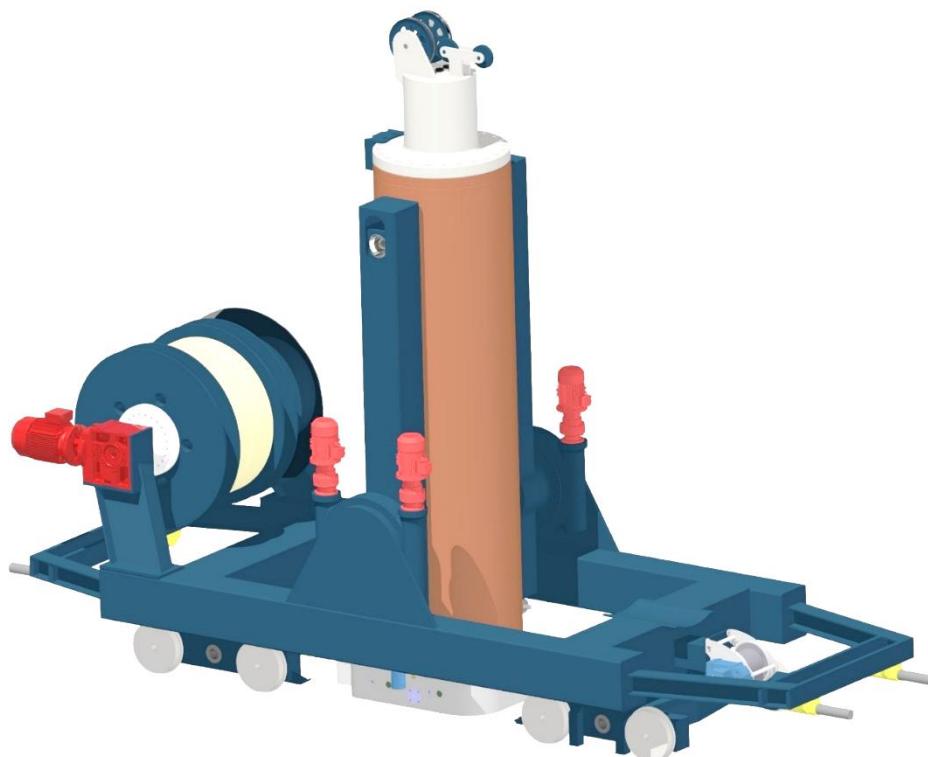


Abbildung 75: Modell des Einlagerungswagens nach Schwenken und Absetzen des Transferbehälters

Der Transferbehälter ist fest auf dem Plateauwagen montiert. Demnach wird ein neues Verfahren für die Beladung und den Transport benötigt. Der Einlagerungswagen fällt mit knapp 9.000 mm mit Blick auf den Schachttransport sehr lang aus. Die wirtschaftliche Erstellung eines passenden Schachtdurchmessers ist zumindest fragwürdig. Von daher können prinzipiell die folgenden zwei Varianten für die Umsetzung der Transport- und Umladeprozesse in Frage kommen, über die standort- und endlagerkonzeptspezifisch entschieden werden kann:

Die erste Möglichkeit ist der Transport über eine Rampe in das Bergwerk. Der Einlagerungswagen nimmt die Brennstabkokille über Tage aus Unterflurlagern auf. Dieser Prozess entspräche der Umkehrung der Einlagerung unter den kontrollierten Bedingungen der Tagesanlagen. Der Transport nach unter Tage erfolgt über eine Seil- oder Zahnradbahn in der Rampe. Untertage fährt die Lokomotive mit dem Einlagerungswagen zum Einlagerungsort.

Der Schachttransport stellt die zweite Möglichkeit dar. In diesem Fall wird der Förderkorb mit mind. zwei Ebenen ausgeführt. In der unteren Ebene befindet sich, dauerhaft montiert, ein senkrecht angeordneter Transferbehälter. Die obere Ebene bietet an den Anschlägen überwie unter Tage die Möglichkeit, mit einem Einlagerungswagen einzufahren. Die obere Ebene des Förderkorbs ist hoch genug, um den Transferbehälter des Einlagerungswagens in die Vertikale zu schwenken. So kann ein Einlagerungswagen über Tage den Transferbehälter des Förderkorbs mit einer BSK beladen, während ein weiterer Einlagerungswagen unter Tage die BSK wieder entnimmt, zum Einlagerungsort fährt und einlagert. Für die Dauer der Umladeprozesse ist der Förderkorb sicher zu halten, z. B. durch in den Schacht einfahrbare Absetzklinken und/oder eine Klemm- und Hubvorrichtung. Mit dieser Lösung kann der Schacht in üblichen

lichten Durchmessern < 10 m ausgeführt werden. Die Verwendung von Fördermitteln mit Höhen >> 10 m ist bei der Schachtförderung Stand der Technik, z. B. in Form von mehretagigen Fördergestellen oder von Fördergefäß für den Transport von Abraum.

Konzepte mit der Aufnahme des Abfallgebinde aus einer unterflurigen Bereitstellung existieren bereits in den Planungen der SKB oder von Posiva Oy (Pettersson & Lönnberg, 2008). Die wesentlichen Unterschiede im Transport- und Einlagerungsprozess entstehen aus der Verwendung des Transferbehälters aus Strahlenschutzgründen (Kapitel 4.2.5).

5 Technik der horizontalen Bohrlochlagerung

5.1 Anforderungen

Die Beschreibung der Anforderungen an die Transport- und Einlagerungstechnik der Einlagerungsvariante Horizontale Bohrlochlagerung beginnt mit der Erläuterung der erforderlichen Funktionen für die Umsetzung der Transport- und Einlagerungsvorgänge. Darauf folgend werden Anforderungen ausgeführt, die sich aus den Randbedingungen des Endlagerbetriebs, den ermittelten Funktionen und weiteren technischen Sachverhalten ergeben.

Da in diesem Vorhaben überwiegend Weiter- und keine Neuentwicklungen angestrebt werden, wird in den Anforderungen an die Transport- und Einlagerungstechnik zur horizontalen Bohrlochlagerung der konzeptionelle Ansatz, Transport und Einlagerung auf einer schienengebundenen Vorrichtung zu vereinen, aus Bollingerfehr et al. (2018) berücksichtigt.

Vorgehensweisen, die sich aus Vorschriften und Normen ergeben, werden im Text an den passenden Stellen aufgeführt. Die im Maschinenbau einschlägigen Normen, insbesondere mit Bezug zur Maschinensicherheit, werden berücksichtigt, z. B. das ProdSG oder DIN EN ISO 12100. Von besonderer Wichtigkeit sind die KTA.

5.1.1 Allgemeine Funktionsbeschreibung

Die Streckentransport- und Einlagerungsvorrichtung für horizontale Bohrlöcher transportiert Brennstabkokillen zum Einlagerungsbohrloch und lagert diese dort ein. Sie ist schienengebunden und verfügt über eine Aufnahme für einen Transferbehälter. Der Transferbehälter ist mindestens in einem Freiheitsgrad beweglich gelagert um eine sichere Verbindung mit dem Einlagerungsbohrloch herzustellen. Das Einlagerungsbohrloch verfügt über eine strahlungssichere Bohrlochschleuse. Diese kann nach dem Andocken des Transferbehälters geöffnet werden. Anschließend wird eine Vorrichtung aktiviert, die die Brennstabkokille aus dem Transferbehälter an die gewünschte Position im Einlagerungsbohrloch befördert. Nach erfolgreicher Einlagerung wird die Einschubvorrichtung zurückgezogen und die Streckentransport- und Einlagerungsvorrichtung trennt sich von der Bohrlochschleuse. Die geforderten Arbeitsschritte werden wie folgt zusammengefasst:

- 1 Aufnahmen des Transferbehälters am Füllort des Schachts
- 2 Transport des Transferbehälters zum Einlagerungsort
- 3 Verbinden des Transferbehälters mit der Bohrlochschleuse, Entriegelung
- 4 Öffnen der Schleusen am Transferbehälter und der Bohrlochschleuse
- 5 Ankoppeln der Einschubvorrichtung an die BSK
- 6 Einschieben der BSK an die Zielposition im Bohrloch
- 7 Überprüfung der Position
- 8 Abkoppeln der Einschubvorrichtung von der BSK
- 9 Zurückziehen der Einlagerungsvorrichtung in den Transferbehälter
- 10 Schließen der Schleusen des Transferbehälters und der Bohrlochschleusen, Verriegelung
- 11 Abkoppeln des Transferbehälters von der Einlagerungsstelle
- 12 Rücktransport der Transport- und Einlagerungsvorrichtung zum Füllort

5.1.2 Maße und Masse der Abfallgebinde

Bestehende Konzepte für Abfallbehälter wurden bereits in Kapitel 2.3 dargestellt. Für die horizontale Bohrlochlagerung wird in den Wirtsgesteinen Steinsalz und Tongestein die dort beschriebene Brennstabkokille BSK verwendet. Die technischen Daten sind in Tabelle 9 aufgeführt.

Tabelle 9: Technische Daten der Brennstabkokille (BSK)

	Länge/Höhe [mm]	Durchmesser (mm)	Abfallgebindemasse (Mg)
BSK	4.980	470-520	5

Die Einlagerung in horizontalen Bohrlöchern im Kristallingestein wird nicht berücksichtigt, da für diesen Fall bislang kein Endlagerkonzept unter Berücksichtigung des langzeitsicheren Einschlusses der radioaktiven Abfälle entwickelt wurde.

Für den Einschiebevorgang in das Einlagerungsbohrloch muss berücksichtigt werden, dass ein Kontakt zwischen Liner und BSK stattfinden wird. Um die Reibwerte zwischen BSK und Liner und den einhergehenden Verschleiß zu minimieren, können Gleit-/Rollelemente verwendet werden.

Beim Transport von BSK wird ein abschirmender Transferbehälter benötigt. In der Tabelle 10 sind die wichtigsten Daten des Transferbehälters zusammengestellt.

Tabelle 10: Abmessungen und Masse des Transferbehälters

	Länge/Höhe [mm]	Durchmesser ohne/mit Zapfen [mm]	Behälter- volumen [m³]	Behältermasse [Mg]
Transferbehälter	5.570	1.305/1.530	7,4	Ca. 45,7

5.1.3 Fahrbahn

Die Ausführungen zum Fahrbahnbau aus Kapitel 6 können als Grundlage für die Weiterentwicklung bei der horizontalen Bohrlochlagerung verwendet werden (Schienen-Schwellensystem mit geschottertem Unterbau):

- Spurbreite 1.435 mm (Spurbreite des deutschen Bahnnetzes)
- Betonschwellenabstand 600 mm
- Schienenprofil RT 19, Gütegrad P4 (340 – 430 HB)

5.1.4 Weitere allgemeine Anforderungen

Neben den baugruppenspezifischen Funktionen und Anforderungen bestehen Anforderungen an die Transport- und Einlagerungstechnik, die sich aus den Umweltbedingungen und weiteren Randbedingungen ergeben. Diese sind in der folgenden Liste aufgeführt:

- Trockentemperatur der Wetter ca. 40 °C, max. 52 °C
- Der Einlagerungsvorgang muss reversibel sein
- Für die Rückholung notwendige bauliche Elemente, die im Bohrloch verbleiben, ist die Auslegungstemperatur von 200 °C (Steinsalz) bzw. 150 °C (Tongestein, Kristallingestein) zu berücksichtigen
- Luftfeuchtigkeit variiert je nach Wirtsgestein
- Anwesenheit von Staub (korrosiv und/oder abrasiv)
- Gesteinsfestigkeit variiert: Salz 15-25 MN/m², Tongestein 5-50 MN/m²
- In einem Endlager in Tongestein werden sämtliche Grubenräume mit Beton ausgebaut. Die Fahrbahn wird entsprechend der Anforderungen aus der betrieblichen Belastung hergestellt.
- Max Streckengefälle 1°
- Fahrbahn Untergrund: Steinsalz, Kristallingestein oder hergestellte Fahrbahn, z. B. aus Schotter
- Automatisches Feuerlöschsystem, Pulverlöschanlage
- Oberflächen dekontaminierbar
- Gedichtete und gekapselte Lager
- Möglichst wartungsarme Konstruktion
- Alle Verschleißteile und Wartungspositionen einfach zugänglich
- Möglichst geringe Brandlast mit zugelassenen Schmierstoffen und Fluiden

- Schachtransport muss in Einzelteilen möglich sein. Zerstörungsfrei trennbare Verbindungen sind zu bevorzugen. Schweißen nur in Ausnahmefällen zulässig.
- Erhöhte Sicherheitsanforderungen sind durch Redundanz und hohe Sicherheitsfaktoren zu berücksichtigen
- Möglichst kompakte Bauweise
- Sonderanfertigungen sind zu vermeiden. Bei Funktionsteilen möglichst auf Serienkomponenten oder seriennahe Teile zurückgreifen.
- Der Liner wird mit maximal 1° Abweichung zur horizontalen erstellt und besteht aus Feinkornbaustahl

5.1.5 Anforderungsliste – Einlagerungsvorrichtung

Für die Einlagerungsvorrichtung ergeben sich folgende konkrete Funktionen und Anforderungen:

Erforderliche Funktionen:

- Aufnahme des Transferbehälters
- Bewegung des Transferbehälters um mind. 1 Freiheitsgrad
- Fortbewegung auf Schienennetz im Bergwerk
- Andocken an Bohrlochschleuse
- Einschieben der BSK in das Bohrloch
- Zurückziehen der Einschubvorrichtung
- Abkoppeln von der Bohrlochschleuse
- Kupplung für Lokomotive

Anforderungen:

- Energieversorgung über Lokomotive
- Max. zulässige Achslast 20 t
- Selbsthemmende Antriebe sind zu bevorzugen
- Vorrichtung zum Aufnehmen des Transferbehälters
- Vorrichtung zum Bewegen des Transferbehälters
- Vorrichtung zum Öffnen der Schleusen des Transferbehälters
- Vorrichtung zum Verschieben von Brennstabkokillen
- Alle zur Einlagerung nötigen Komponenten müssen aus dem Einlagerungsbohrloch entfernt werden
- Einlagerungsvorgang muss reversibel sein (optional mit zweitem Fahrzeug)
- Anschlagpunkte für das Aufgleissystem

5.1.6 Anforderungsliste – Bohrlochschleuse

Für die Bohrlochschleuse ergeben sich folgende konkrete Funktionen und Anforderungen:

Erforderliche Funktionen:

- Schutz vor Staub und Strahlungsaustritt aus Bohrloch

- Absaugvorrichtung für im Bohrloch entstandene Gase und Stäube
- Kopplung mit dem Transferbehälter und der Bohrlochverrohrung (Vermeidung der Freisetzung von Radionukliden)
- Öffnen und Schließen der Bohrlochschleuse bei Bedarf und nur bei korrekt aufgesetztem Transferbehälter
- Abkoppeln des Transferbehälters bei geschlossener Schleuse

Anforderungen:

- Transportabel von Bohrloch zu Bohrloch
- Energieversorgung über Grubenstrom oder über Einlagerungsvorrichtung
- Mechanische (und/oder elektrische) Schnittstelle zur Einlagerungsvorrichtung
- Anschluss für Absauganlage
- Möglichkeit der Notver-(ent-)riegelung
- Die Bohrlochschleuse muss mit dem Bohrlochliner dicht verschraubt werden können
- Zwischen Liner und Bohrlochschleuse ist eine Dichtung vorzusehen

5.1.7 Anforderungen – Lokomotive

In Engelmann et al. (1995) und Filbert et al. (2010) wurde als Antriebsmaschine eine batteriebetriebene Lokomotive verwendet. Eine solche kommt auch weiterhin zum Einsatz. Jedoch wird die bekannte Lokomotive durch eine moderne batteriebetriebene Lokomotive ersetzt, die den aktuellen Anforderungen genügt. Es gelten die Anforderungen wie in Kapitel 3.1.7.

Da die Antriebsmaschine in allen Einlagerungsvarianten verwendet wird, wird sie gesondert in Kapitel 8 vorgestellt.

5.2 Bedarf zur Weiterentwicklung

5.2.1 Betriebssicherheit

In Bollingerfehr et al. (2018) wurde eine Betriebsstörungsanalyse der Transport- und Einlagerungstechnik für horizontale Bohrlöcher, wie sie in Kapitel 2.3 beschrieben wurde, durchgeführt. Dafür wurden die einzelnen Prozessschritte detailliert auf mögliche Betriebsstörungen und Störfälle hin untersucht. Jede Störung wurde einer von drei Kategorien zugeordnet:

– A) zulässiger Systemzustand

Dies ist ein vom normalen Betriebszustand im Hinblick auf relative Positionen einzelner Komponenten zueinander nicht abweichender Zustand des Gesamtsystems, bei dem die primäre Störung selbst zu keinem Gefahrenzustand führt und in dessen Folge auch keine Beschädigung oder Zerstörung weiterer Komponenten oder Bauteile erfolgen kann. Eine zusätzliche Strahlenexposition für das Betriebspersonal bei der Behebung von Betriebsstörungen tritt nicht auf, da ein Austausch bzw. eine Reparatur von Antriebselementen in Abwesenheit des beladenen Transferbehälters oder bei bereits entladenem Transferbehälter durchgeführt werden kann.

- **B) unzulässiger Systemzustand**

Dies ist ein vom normalen Betriebszustand im Hinblick auf relative Positionen einzelner Komponenten zueinander abweichender Zustand des Gesamtsystems, bei dem die primäre Störung selbst zu keinem Gefahrenzustand führt und in dessen Folge jedoch eine Beschädigung oder Zerstörung weiterer Komponenten oder Bauteile erfolgen kann, die jedoch zu keinem Gefahrenzustand führt. Hieraus ergeben sich zusätzlich Anforderungen an die Überwachung der Arbeitsbewegungen der Einlagerungsvorrichtung/Bohrlochschleuse hinsichtlich des Weges und der Endlagen einzelner Komponenten oder Bauteile mit Validierung der Position für die SPS, um Beschädigungen oder Zerstörungen zu vermeiden. D. h., ein Folgeschritt kann durch einen Schaltvorgang der positionsüberwachenden Elemente nur dann eingeleitet werden, wenn die Komponente oder das Bauteil eine bestimmte vorgesehene Position eingenommen hat und ein entsprechendes, unverwechselbares Signal an die SPS geliefert worden ist. Eine Redundanz oder Diversität bei Überwachungselementen ist nicht erforderlich. Ein gleiches Sicherheitsniveau kann durch mechanische Verriegelung erreicht werden.

- **C) Gefahrenzustand (Aktivitätsfreisetzung und/oder unabgeschirmte Direktstrahlung)**

Dies ist ein vom normalen Betriebszustand im Hinblick auf relative Positionen einzelner Komponenten zueinander abweichender Zustand des Gesamtsystems, bei dem die primäre Störung entweder selbst bzw. unmittelbar zu einer Gefährdung durch Aktivitätsfreisetzung und/oder unabgeschirmte Direktstrahlung führt oder in dessen Folge eine Beschädigung oder Zerstörung weiterer Komponenten oder Bauteile erfolgen kann, die zu einer Gefährdung durch Aktivitätsfreisetzung und/oder unabgeschirmte Direktstrahlung führt. Hieraus ergeben sich im Hinblick auf die Überwachung der Arbeitsbewegungen der Einlagerungsvorrichtung/Bohrlochschleuse über die aus der Vermeidung unzulässiger Systemzustände resultierenden Anforderungen hinaus Anforderungen im Hinblick auf Redundanz oder Diversität bei der Überwachung der Wege und Endlagen einzelner Komponenten oder Bauteile, um Gefahrenzustände sicher auszuschließen. D.h., ein Folgeschritt kann nur dann eingeleitet werden, wenn beide Überwachungselemente ein entsprechendes Signal über die eingenommene vorgesehene Position einer Komponente oder eines Bauteils an die SPS übermitteln.

Für die als Gefahrenzustand bewerteten Betriebsstörungen sei nach Bollingerfehr et al. (2018) im nächsten Schritt zu untersuchen, wie die Betriebsstörung vermieden bzw. beherrscht werden kann und falls dies nicht möglich ist, wie das System bzw. die Komponente angepasst werden muss, um solch einen Fall auszuschließen. Neben auslegungsbestimmenden Brandereignissen wurden mehrere Störungen als Gefahrenzustand identifiziert, die das Zusammenspiel der Schubtechnik für den Einschub der BSK in das Bohrloch und der Bohrlochschleuse betreffen. Im Einzelnen wurden folgende Störungen als Gefahrenzustand bewertet:

Fehlfunktion der Schleusen

- Die bohrlochseitige Schleuse des Transferbehälters lässt sich nicht schließen; aufgrund der mechanischen Verriegelung mit der Bohrlochschleuse lässt sich diese dann ebenfalls nicht schließen.

- Die bohrlochseitige Schleuse des Gestängeeinschubs lässt sich nicht schließen; aufgrund der mechanischen Verriegelung mit der Bohrlochschleuse lässt sich diese dann ebenfalls nicht schließen.
- Die Bohrlochschleuse lässt sich nicht schließen.

Fehlfunktion beim Einschieben mit der Schubkette

- Die Schubkette bricht beim Einlagerungsvorgang. Das Bergen der Kettenfragmente ist im Innern von Bohrloch/Bohrlochschleuse und Transferbehälter nicht möglich aufgrund der Nähe zu den nicht abschirmenden BSK. Die Schleuse lassen sich nicht schließen aufgrund der Kettenfragmente.
- Verkanten der Schubkette im Magazin. Die Schubkette lässt sich nicht mehr bewegen und blockiert die Bohrlochschleuse und die Behälterschleuse. Bei Reparatur besteht die Gefahr, dass Kontakt zum Sperrbereich im Inneren des Transferbehälters hergestellt wird.

Fehlfunktion beim Gestängeeinschub

- Das Schubgestänge bricht beim Einlagerungsvorgang. Das Bergen der Gestängefragmente ist im Innern von Bohrloch/Bohrlochschleuse und Einhausung des Gestänges nicht möglich aufgrund der Nähe zu den nicht abschirmenden BSK. Die Schleusen lassen sich nicht schließen aufgrund der Kettenfragmente.

Diese Gefahrenzustände treten auf, da eine Apparatur Kräfte mechanisch von außerhalb des Bohrlochs durch die Schleusen auf die BSK im Innern des Bohrlochs überträgt. Bricht diese mechanische Verbindung oder hat eine schwerwiegende Fehlfunktion, ist eine Reparatur kaum durchführbar, da Betriebspersonal einem hohen Risiko von Direktstrahlung aus den hochradioaktiven Abfällen in den BSK ausgesetzt ist. Aus diesem Grund besteht wesentlicher Bedarf zur Überarbeitung der Mittel zur Kraftübertragung bei Einschub einer BSK.

5.2.2 Einstufung der Einlagerungstechnik nach KTA

Für die Auslegung von Technik zum Transport und zur Einlagerung von hochradioaktiven Abfällen bestehen keine gültigen kerntechnischen Regeln. Sinngemäß können die KTA herangezogen werden. Für die Transport- und Einlagerungstechnik kann vor allem die KTA 3902 „Auslegung von Hebezeugen in Kernkraftwerken“ von Nutzen sein. Diese KTA sieht verschiedene Einstufungen der Hebezeuge vor, nach denen sich Strenge und Umfang der Anforderungen richten.

Die Einlagerungstechnik für horizontale Bohrlöcher wird nach der geringsten Einstufung nach KTA 3902 als „Hebezeug nach allgemeinen Bestimmungen“ weiterentwickelt. Hier ist KTA 3902 Abschnitt 3 maßgebend. Es wird gefordert, dass die Hebezeuge den allgemein anerkannten Regeln der Technik und den allgemeinen Sicherheitsvorschriften, Arbeitsschutzvorschriften des Bundes und der Länder sowie den Vorschriften der Träger der gesetzlichen Unfallversicherung genügen sollen. Neben den allgemeinen Bestimmungen sind nach KTA 3902 Abschnitt 4 weitere Aspekte bei der Konstruktion zu berücksichtigen:

1. Es muss ein Nachweis gegen „Einwirkungen von außen“ geführt werden, wenn dieser auch für das Gebäude in dem das Hebezeug betrieben wird geführt wird.
2. Umgebungsbedingungen wie z. B. Druck, Temperatur, Umgebungsmedien und Strahlenbelastung sind bei der Konstruktion zu berücksichtigen.
3. Die Dekontaminierbarkeit muss bei der Konstruktion berücksichtigt werden.

Die Einstufung der Technik erfolgt nach dem entsprechenden Flowchart der KTA 3902 (Abbildung 76). Maßgeblich ist, dass auch bei einem Versagen der Einlagerungstechnik, z. B. durch Fallenlassen des Abfallgebinde, aufgrund der Behälterauslegung und der geringen möglichen Fallhöhe kein Radionuklidastrag zu erwarten ist. Die Übertragbarkeit der Anforderungen aus KTA 3902 auf die Einlagerungstechnik für TLB ist jedoch nur eingeschränkt sinngemäß möglich. Die Fokussierung der KTA 3902 auf die Verwendung von Seiltrieben und Krananlagen erschwert ihre Anwendung auf Maschinenkonzepte, die diese Komponenten nicht benutzen.

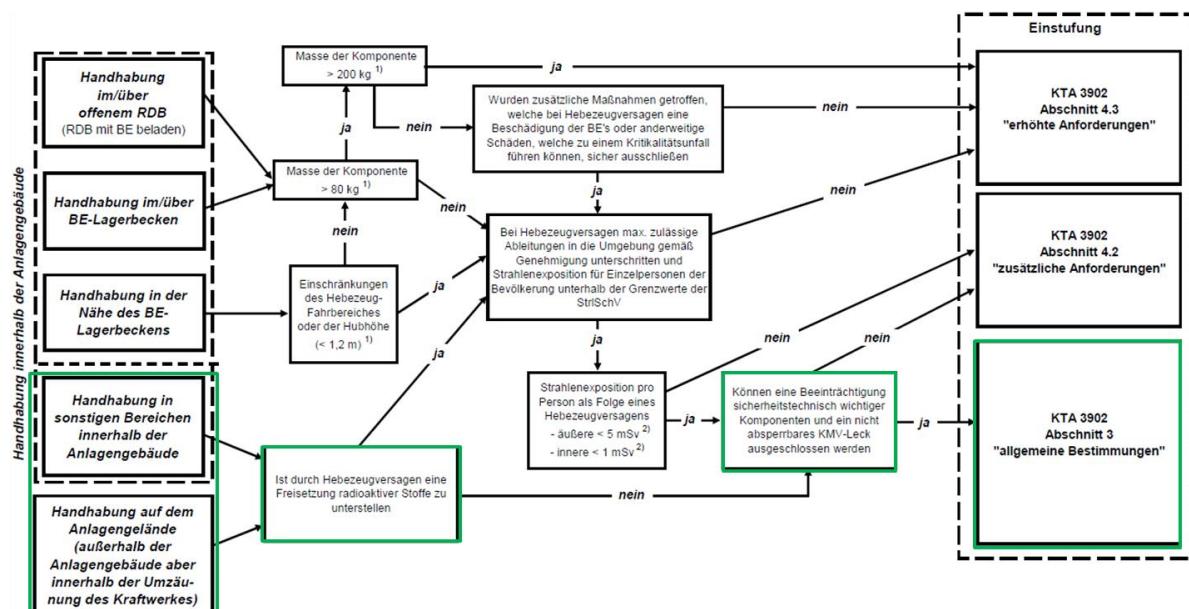


Abbildung 76: Flowchart zur Einstufung von Hebezeugen nach KTA 3902; in grün: Einstufung der Transport- und Einlagerungstechnik für horizontale Bohrlöcher

5.2.3 Prinzipielle Lösungen

Der Einschub von Kokillen in horizontale Bohrlöcher wird durch die „Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs“ (ANDRA) in Frankreich verfolgt (ANDRA, 2014). Der dort vorgesehene Roboter wurde in Bollingerfehr et al. (2018) bei der Abwägung der Vorzugsvariante betrachtet, jedoch für den Einsatz unter den Bedingungen in Deutschland verworfen. Die notwendige Vorschubkraft des Roboters der ANDRA beträgt 40 kN für den Schub von drei Kokillen mit einem Gesamtgewicht von 6,6 Mg. Diese Masse wurde erfolgreich im Test auf Zirconia Kufen bewegt. Daraus lässt sich schlussfolgern, dass der Reibwert zwischen Stahl und Zirconia einen Wert von $\mu = 0,617$ nicht übersteigt. Legt man das Gewicht der BSK zugrunde, benötigt die Vorschubvorrichtung, welche in diesem Projekt entwickelt wird, eine Vorschubschubkraft von $F_V = 30,9$ kN. Dies gilt allerdings nur, wenn vergleichbare Zirconia Gleitelemente

verwendet werden. Sollten die Herstellerangaben von Ionite-OX Beschichtungen in der Realität umsetzbar sein, könnte eine Vorschubkraft von 10 kN ausreichend sein. Zunächst wird jedoch davon ausgegangen, dass $F_V = 30,9$ kN mindestens erreicht werden müssen.

Variante 1: Radantrieb für gleitgelagerte BSK

Der Antrieb kann mittels Antriebsräder mit Polyurethan (PU) Lauffläche erfolgen. PU hat gegenüber Stahl einen Haftreibwert von mindestens $\mu_{PU-ST} = 0,7$. In der Fördertechnik gibt es zwar durchaus Materialien mit einem höheren Haftreibbeiwert, die Machbarkeit des Radantriebs sollte aber möglichst konservativ untersucht werden. Sollte die Temperatur im Einlagerungsloch die zulässige Temperatur von PU übersteigen, kann auf ein Rad mit Viton Lauffläche zurückgegriffen werden.

Auf ein Laufrad mit einer Shore 90 Lauffläche kann eine mittlere Flächenpressung von $p_{PU} = 7$ N/mm² (Blickle, 2020) wirken. Es wird angenommen, dass eine maximale Verformung von Gummirädern bis 10 % zulässig ist. In erster Näherung ist die Abplattung des Rades unter Last gleichmäßig über den Querschnitt. Die Laufbelagsstärke wird mit 20 mm angenommen. Daraus wird Mithilfe von der Verformung:

$$h = 20 \text{ mm} \times 0,1 = \underline{2 \text{ mm}}$$

Anschließend wird die Sehnenlänge berechnet:

$$s = 2 \times \sqrt{(h \times (2r - h))} = 2 \times \sqrt{(2 \text{ mm} \times (2 \times 100 \text{ mm} - 2 \text{ mm}))} = \underline{39,8 \text{ mm}}$$

Es wird angenommen, dass die geforderte Schubkraft über 2 Antriebsräder übertragen wird. In Verbindung mit der Flächenpressung erhält man die Mindestrollenbreite:

$$b = \frac{\frac{F_V \div 2}{\mu_{PU-ST}}}{\frac{p_{PU} \times s}{7 \frac{N}{mm^2} \times 39,8 \text{ mm}}} = \frac{\frac{15.450 \text{ N}}{0,7}}{7 \frac{N}{mm^2} \times 39,8 \text{ mm}} = 79,2 \text{ mm}$$

Es wird eine Radbreite von 80 mm gewählt. Das Rad hat im Vergleich zu kommerziell erhältlichen Rädern eine sehr hohe Breite. Eine Verringerung der benötigten Einschubkraft ließe sich über den linearen Zusammenhang mit dem Reibwert herstellen. Indem das Gleitelementmaterial optimiert wird, um den Reibwert auf $\mu = 0,3$ zu senken, halbiert sich die Antriebsradbreite. Der Einfluss auf weitere Stützräder wäre marginal da diese aus Stahl oder Buntmetall ausgeführt werden können.

Das benötigte Antriebsdrehmoment lässt sich wie folgt berechnen:

$$M = F_V \times r = 15.450 \text{ N} \times 0,1 \text{ m} = \underline{1.545 \text{ Nm}}$$

Schneckenradgetriebe in dieser Drehmomentklasse sind erhältlich. Es ist jedoch zu prüfen, ob die Abmessungen einen Einbau zulassen. Da zwei dieser Getriebe und 2 Motoren benötigt

werden. Die Getriebe haben laut Hersteller einen Wirkungsgrad von 0,5. Zwei Motoren mit jeweils 1 kW Leistung werden laut Herstellerinformation als ausreichend erachtet. Das würde eine Einlagerungsgeschwindigkeit von 3 m/min möglich machen.

Variante 2: Radantrieb für rollengelagerte BSK

Es werden dieselben Ausgangsparameter wie bei der Auslegung des Radantriebs für Gleitlagerung angesetzt, jedoch wird die Schubkraft verringert. Es wird die Annahme getroffen, dass die Brennstabkokille auf Rädern gelagert ist. Diese Räder sind mit einem Reibwert von $\mu = 0,15$ gleitgelagert. Ein Rad muss 66 % der Last aufnehmen können. Bei einer Flächenpressung in der Gleitlagerung von 100 N/mm und einer Lagerbreite von 30 mm ergibt sich ein Achsendurchmesser von:

$$(50.000N \times 0,66) \div \left(100 \frac{N}{mm^2} \times 30 mm \right) = 11 mm$$

Es wird eine 20 mm Achse gewählt. Auf der Achse lasten 50 % der Behältermasse. Damit das Rad in Drehung versetzt wird, muss folgende Kraft pro Rad wirken:

$$50.000N \times 0,5 \times 0,15 = 3.750 N$$

Aufgrund des Hebelgesetzes muss man an einer 150 mm Stahlrolle außen folgende Kraft aufbringen, um sie zu drehen:

$$3.750N \times \frac{10mm}{75mm} = 500 N$$

Da die BSK immer mindestens auf 2 Rädern aufliegt, ergibt sich eine Gesamtschubkraft von 1.000 N. Aus Sicherheitsgründen wird eine Mindestschubkraft von $F_V = 2.500 N$ gewählt. Setzt man diese geringere Schubkraft in die vorherigen Rechnungen ein, erhält man:

$$b = 6,41 mm$$

Es wird die Radbreite von 20 mm gewählt. Dies sollte aufgrund der geringeren Verformung die Standzeit deutlich erhöhen. Das erforderliche Drehmoment beträgt pro Antriebsrad:

$$1.250 N \times 0,1 m = \underline{125 Nm}$$

Dieses Antriebsdrehmoment kann problemlos mit Servomotoren und Winkelgetrieben aufgebracht werden. Die Motoren sind gut regelbar und haben ein steuerbares Anlaufverhalten und eine gut regelbare Drehzahl. Solche Winkelgetriebe stellt zum Beispiel Neugart (2020) her.

Variante 3: pneumatischer Antrieb für Schubroboter

Es wird eine grobe Auslegung eines pneumatischen Antriebes vorgenommen. Der Antrieb orientiert sich weitestgehend an ANDRA (2014). Jedoch wird aus Brandschutzgründen ein Gas betriebenes System anstatt eines hydraulischen berechnet. Als Arbeitsgas kann zum Beispiel

Stickstoff eingesetzt werden. Es wird ein geschlossenes System mit 2 Arbeitskesseln betrachtet. Zwischen den Kesseln wird eine Druckdifferenz von 7 bar erzeugt. Dies geschieht mittels elektrisch betriebenem Kompressor.

Um ein Widerlager für die Vorschubkraft zu generieren, muss sich die Vorrichtung im Liner verspannen. Es wird angenommen das sich die Vorrichtung mittels gummiert oder profiliert Backen abstützt. Wenn konservativ ein Reibwert von 0,5 angenommen wird, ergibt sich eine erforderliche Anpresskraft von 63,8 kN. Diese Anpresskraft wird über einen Kniehebel erzeugt. Hier könnten zwei Zylinder mit jeweils 4,5 kN Schubkraft zum Einsatz kommen. Der Kolbendurchmesser beträgt 100 mm und der Hub 20 mm. Der Luftbedarf für einen Arbeitsvorgang des Zylinders beträgt ungefähr 1.256 ml pro Arbeitsvorgang, sodass mit 7 bar angepresst und mit 1 bar zusammengezogen wird. Bei Einsatz von 4 dieser Zylinder ergibt sich ein Luftbedarf von 5 l pro Arbeitsvorgang. Für den Vorschub ist ein Zylinder mit 250 mm Durchmesser und einem Hub von 500 mm denkbar. Der Luftbedarf für einen solchen Zylinder beträgt 196 l. Für eine Vorschubgeschwindigkeit von 1 m/min sind 2 Arbeitsvorgänge pro Minute nötig. Der gesamte Luftbedarf beträgt also 397 l/min. Für den Kompressor wird ein Wirkungsgrad von 10 % angenommen. Damit ergibt sich folgender Leistungsbedarf:

$$P = p \times \dot{V} \div \eta = 700.000 \frac{N}{mm^2} \times 0,00095 \frac{m^3}{s} \div 0,1 = 6.650 \text{ W}$$

Dieser Leistungsbedarf ist so hoch, dass der Kompressor wahrscheinlich nicht im Einlagerungsbohrloch positioniert werden kann. Das Ergebnis scheint ebenfalls realistisch, da Kompressoren in dieser Leistungsklasse, die erforderliche Luftmenge bereitstellen können. Eine Verringerung des Reibwertes hat bei der Dimensionierung der Zylinder auch Vorteile und kann den Leistungsbedarf deutlich senken.

Variante 4: Verwendung eines Molches

Ein Molch ist ein Körper, der in Rohrleitungen zum Einsatz kommt, um Rohrinhalt zu verdrängen, verschiedene Transportchargen voneinander zu trennen oder das Rohr von innen zu reinigen. Er wird mithilfe einer Flüssigkeit oder eines Gases durch die Rohrleitung gedrückt. Dafür schließt er durch Weichdichtungen mit der Rohrinnenwand ab. Durch Druckaufbau im Einlagerungsbohrloch ließe sich mithilfe eines abdichtenden Molchs hinter dem Molch ein Überdruck aufbauen, um eine oder mehrere BSK, die vor dem Molch liegen, ins Bohrloch zu schieben. Die Einschubkraft wird dann über den Differenzdruck zwischen Vorder- und Rückseite des Molches erzeugt. In dieser Variante beaufschlagt ein außerhalb des Bohrlochs liegender Kompressor einen Teil des Innenraums des Transferbehälters mit Überdruck. Im Innenraum des Transferbehälters sind eine BSK und der Molch hintereinander angeordnet. Der Überdruck entsteht auf der Seite des Molchs, die dem Bohrloch abgewandt ist, sodass er den angelieferten Molch und die davorliegende BSK ins Bohrloch einschiebt. Da die Bohrlöcher nach Bollingerfehr et al. (2018) mittels einer Micro-Tunnelbohrmaschine hergestellt werden und durchschlägig sind, kann auf der gegenüber liegenden Seite des Bohrlochs außerdem einen Unterdruck erzeugt werden. Dafür wäre zum Beispiel ein Seitenkanalverdichter denkbar. Damit könnte der erforderliche Überdruck auf der Seite des Transferbehälters verringt werden.

Für den Vorschub ist folgende Druckdifferenz erforderlich:

$$p = \frac{F}{A} = \frac{F}{\frac{\pi}{4} \times d^2} = \frac{30.900 \text{ N}}{\frac{\pi}{4} \times (480 \text{ mm})^2} = 0,17 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Es ist ein Überdruck von 1,7 bar Differenzdruck nötig um die BSK in das Bohrloch zu schieben. Durch Unterdruck wäre es ebenfalls möglich den Molch zurückzuziehen.

5.2.4 Bewertung der Prinziplösungen

Mit einem elektrisch angetriebenen Einschubfahrzeug wird es als möglich erachtet einen Einlagerungsvorgang bis 10 kN Vorschubkraft durchzuführen. Diese Einschränkung ist dadurch begründet, dass Getriebe für höhere Vorschubkräfte ein sehr großes Bauvolumen haben. Des Weiteren nimmt die Radbreite aufgrund der hohen Anpresskräfte stark zu. Bei dieser Lösung kommen deshalb nur Behälterlagerungskonzepte in Frage, welche auf Rollen oder Gleitelemente mit einem sehr geringen Reibwert setzen. Dieser geringe Reibwert muss in Versuchen nachgewiesen werden. Veröffentlichten Informationen zu den Materialien sind entweder unvollständig oder widersprechen sich teilweise. Da keine Schmiermittel zum Einsatz kommen, wird es als möglich erachtet, dass tribologische Effekte die Reibwerte sowohl positiv wie auch negativ beeinflussen könnten.

Ein pneumatisch angetriebener Vorschubroboter, ähnlich der aus ANDRA (2014), ist für hohe Vorschubkräfte problemlos geeignet. Der Roboter kann um einem Zentralen Vorschubzylinder entworfen werden. Für eine Bewegung im Rohr, ohne Last, kann eines der Stützräder mittels Pneumatikmotor angetrieben werden. Dadurch kann auf eine zweite Klemmvorrichtung verzichtet werden. Die Steuerventile müssen den hohen Temperaturen im Einlagerungsbohrloch standhalten. Dies bedingt eine Spezialanfertigung der Ventilsteuertechnik, da diese normalerweise für deutlich geringere Umgebungstemperaturen ausgelegt ist. Ebenfalls ist es möglich mehrere getrennte Druckluftleitungen in der Versorgungsleitung vorzusehen und den Roboter von außerhalb des Bohrloches zu steuern. Da in diesem Fall die Vorschubkräfte kein Problem darzustellen scheinen, können die bereits durch die ANDRA erprobten Gleitbeläge aus Keramik verwendet werden. Der Kompressor ist außerhalb des Bohrlochs zu positionieren, sodass entsprechende Schlauchverbinden den Kompressor außerhalb und den Vorschubroboter innerhalb des Bohrlochs verbinden.

Die Vorschubkraft mit einem Molch aufzubringen wird als sehr erfolgversprechend gewertet. Es wird keine komplexe Technik im Einlagerungsbohrloch benötigt und eine Schlauchverbindung zwischen Bohrlochinnern und Kompressor ist nicht notwendig. Das Molchen von Rohrleitungen ist eine erprobte Technik und es kann auf Erfahrungswerte aus der Industrie zurückgegriffen werden. Der Transferbehälter wird druckdicht mit der Bohrlochschleuse und diese mit dem Bohrlochliner verbunden. Da es sich um ein durchschlägiges Bohrloch handelt, kann auf der gegenüberliegenden Seite ein druckdichter Deckel mit Ventil oder ein Verdichter zur Erzeugung eines unterstützenden Unterdrucks installiert werden. Der Vorschub wird geregelt, indem die Luft auf der gegenüberliegenden Seite kontrolliert abgelassen wird. Um den Molch

nach Einschub einer BSK wieder aus dem Bohrloch zu entfernen, gibt es verschiedene Möglichkeiten. Der Molch kann an einem Seil befestigt werden. Die Winde dafür muss sich allerdings im Transferbehälter befinden, um ein einfaches Abkoppeln des Behälters zu gewährleisten. Eine weitere Möglichkeit ist es, den Molch über eine Druckumkehr zurück in den Transferbehälter zu bewegen. Dafür kann durch einen Verdichter ein Überdruck auf der gegenüberliegenden Seite des Bohrlochs erzeugt werden. Durch den einseitigen Überdruck in der beidseitig geschlossenen Rohrleitung wirkt eine Zugkraft auf der Rohrstrecke. Die Schleusenverbindung zwischen Transferbehälter und Bohrlochauskleidung muss die Ausblaskraft abfangen können.

Die Variante mit Molch wird hier bevorzugt und näher untersucht. Dies ist zum einen begründet durch die Einfachheit der Konstruktion und zum anderen durch den Wegfall aller Einbauten am Transferbehälter. Die Gefährdungszustände im Zusammenhang mit Schubkette und Gestängeeinschub fallen vollständig weg.

5.3 Auslegung und Konstruktion

Die Entwurfskonstruktion erfolgt mittels des CAD Programms Autodesk Inventor. Die Konstruktion fokussiert sich auf die für die Umsetzung kritischen Details und Funktionen. Verkabelungen, Hydraulikleitungen, Sensorik und Regelungstechnik werden nicht dargestellt. Berechnungen erfolgen als Handrechnung oder computergestützt mittels finiter Elemente Methode. Für eine Bewertung der Ergebnisse wird, sofern nicht anders angegeben, die Zug-Druck Wechselfestigkeit der Baustahlsorte S355 herangezogen. Diese beträgt 205 MPa. Sollte diese Festigkeit nicht ausreichen, werden Materialien vorgeschlagen, welche die Anforderungen erfüllen.

5.3.1 Schienengebundenes Transportfahrzeug

Das schienengebundene Transportfahrzeug muss der in der Lage sein, einen Transferbehälter mit Brennstabkokille aufnehmen zu können. Anschließend wird der Behälter zum Einlagerungsbohrloch transportiert. Dort angekommen muss der Behälter genau mit der Bohrlochschleuse ausgerichtet werden und wird anschließend mit dieser verbunden. Der Transferbehälterträger wird starr mit der Bohrlochschleuse verbunden, um die Kräfte, die während des Einlagerungsvorgangs entstehen, abfangen zu können. Ein Abführen der Einschubkräfte über die Gleise wird vermieden. Das Transportfahrzeug wird in mehrere Konstruktionspakete unterteilt. Der Behältertragrahmen nimmt den Transferbehälter auf und entkoppelt ihn von Stößen. Der Behälter kann angehoben und gesenkt werden um das Fluchten mit der Bohrlochschleuse zu gewährleisten. Der Rahmen ist ebenfalls in axialer Richtung beweglich gelagert. Durch diesen Freiheitsgrad kann der TLB mit der Bohrlochschleuse verbunden werden. Der Tragrahmen bewegt sich auf einem Hilfsrahmen. Dieser ist drehbar auf einem Schnecken-Schwenkgetriebe gelagert. Dieses Getriebe ist auf dem Fahrzeug verschraubt. Es verfügt über eine Vakuumpumpe, einen Kompressor sowie einen Druckspeicher. Alle Bewegungen werden

elektrisch oder mittels Druckluft angetrieben. Dies minimiert die Brandlast erheblich. Der Oberbau des schienengebundenen Transportfahrzeugs besteht aus folgenden wesentlichen Komponenten (Abbildung 77):

- I Behältertragrahmen
- II Hilfsrahmen
- III Wälzwagen
- IV Schneckenschwenkgetriebe
- V pneumatischer Balg
- VI Vorschubzylinder

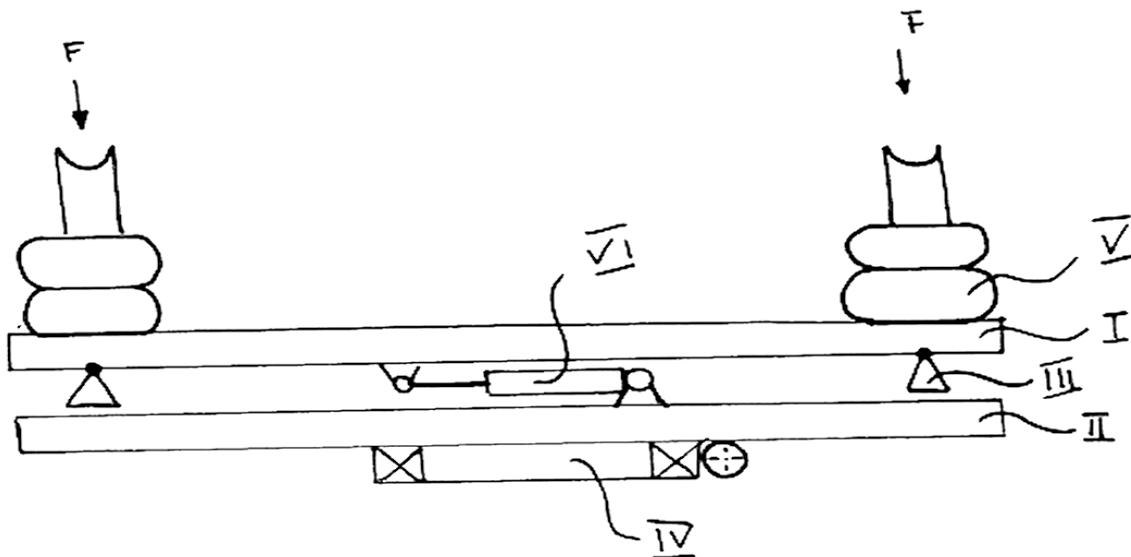


Abbildung 77: Handskizze des Oberbaus des schienengebundenen Transportfahrzeugs

Auslegung des Oberbaus

Der Behältertragrahmen besteht aus zwei miteinander verbundenen HEB-Profilträgern. Die Lasten auf die Träger sind vergleichsweise gering, da die Auflagerlast direkt in die Wälzwagen geleitet wird. Der Träger muss breit genug sein um den entsprechenden Wälzwagen zu befestigen. Es wird ein IPB 180 Normträger gewählt (Peiner Träger, 2020). Als Wälzwagen wird das Modell I Typ. A-H der Fa. Börkey (Hagen) gewählt. Dieses hat eine Traglast von 150 kN. Es werden jeweils 2 Wälzwagen an jeder Ecke des Tragrahmens verschraubt. Damit ergibt sich eine maximale Traglast von 1.200 kN. Der Aufbau inkl. Transferbehälter und BSK wird in erster Schätzung eine Gewichtskraft von 700 kN nicht überschreiten. Im Filbert et al. (2010) ist der Transferbehälter mittels Tellerfederpaketen von der Fahrbahn entkoppelt. Da eine zusätzliche Höhenverstellung zur Ausrichtung vor dem Einlagerungsbohrloch nötig ist, wird das Tellerfederpaket gegen einen pneumatischen Balg getauscht. Es wird an jeder Behälterstütze jeweils ein Balg verbaut. Der Balg muss eine Last von 150 kN bewegen können. Es wird ein Zweifaltenbalg von Continental mit einem Durchmesser von 590 mm gewählt. Dieser Faltenbalg kann die Last innerhalb der Betriebsparameter um 150 mm in der Höhe verstetzen. Die Höhenverstellung geschieht über eine Änderung des Luftdrucks. Des Weiteren ist es mit dem Balg möglich, das Niveau des Behälters zu regulieren und Fahrbahnunebenheiten oder Fluchtungsfehler des Bohrloches auszugleichen (Continental (a), 2020). Der Tragrahmen wird auf

den Wälzwagen mithilfe von Pneumatikzylindern verschoben. Es wird angenommen, dass die Wälzwagen einen Widerstand von 5 % haben. Bei einer Gewichtskraft von 700 kN ergibt sich eine Vorschubkraft $F_V = 35$ kN. Die Pneumatik hat einen Betriebsdruck von 8 bar. Für den Vorschub werden zwei Zylinder mit jeweils 250 mm Kolbendurchmesser vorgesehen. Ein Zylinder hat eine Vorschubkraft von 39 kN. Damit ist sichergestellt, dass selbst bei Ausfall eines Zylinders der Schlitten weiterhin bewegt werden kann. Der Hilfsrahmen ist auf einem Schneckenkenschwenkgetriebe befestigt. Beide Enden des Rahmens sind fest verschraubt. Es wird ein TGE G-CH Schwenkgetriebe in Erwägung gezogen. Der Tragrahmen kann $a = 100$ mm um die Neutrallage verschoben werden. Das bedeutet ein mögliches Kippmoment von:

$$M_K = F_G \times a = 700.000 \text{ N} \times 0,1 \text{ m} = 70.000 \text{ Nm}$$

Dieses Kippmoment kann durch das TG-E-744.G-CH abgefangen werden (Torriani, 2020). Es wird angenommen, dass die Träger mittig über der Kugeldrehverbindung eingespannt sind. Das Biegemoment, welches auf dem Träger lastet, ist im ausgefahrenen Zustand am höchsten. Der Tragzapfenabstand beträgt $a_t = 4.270$ mm. Es wird angenommen, dass die Walzkörper direkt unter den Tragzapfen befestigt sind. Das Biegemoment errechnet sich wie folgt:

$$M_B = \frac{F_g}{2} \times \frac{a_t \div 2 + a}{a_t \div 2 - a} \times a_t \div 2 + a$$

$$= \frac{700.000 \text{ N}}{2} \times \frac{4.270 \text{ mm} \div 2 + 100 \text{ mm}}{4.270 \text{ mm} \div 2 - 100 \text{ mm}} \times 4.270 \text{ mm} \div 2 + 100 \text{ mm} = 859 \text{ kNm}$$

Es wird eine Sicherheit von $S = 2$ für den Hilfsrahmen angenommen. Als Material wird Baustahl S355 angenommen. Dieser hat folgende Werte:

Zugfestigkeit	R_m	470	MPa
Streckgrenze	R_e	355	MPa
Elastizitätsmodul	E	210.000	MPa
Zug-Druck-Wechselfestigkeit	σ_{zdW}	205	MPa
Biegewechselfestigkeit	σ_{BW}	255	MPa

Damit lässt sich die maximal zulässige Spannung ermitteln:

$$\sigma_{zul} = \sigma_{BW} \div S = 255 \text{ MPa} \div 2 = 127,5 \text{ MPa}$$

Mit der zulässigen Spannung lässt sich das benötigte Widerstandsmoment des Trägers berechnen:

$$W_x = M_B \div \sigma_{zul} = 859.000 \text{ Nm} \div 127,5 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} = 6.737 \text{ cm}^3$$

Es werden zwei „IPB v 300“ Träger gewählt. Diese Träger besitzen jeweils ein Widerstandsmoment von $W_x = 3.482 \text{ cm}^3$ und erfüllen damit die Anforderung.

Auslegung des Fahrwerkes

Da das erwartete Gesamtgewicht deutlich unter 80 Mg liegt, wird im weiteren Vorgehen davon ausgegangen, dass 4 Achsen ausreichend sind. Für die Berechnung werden vorläufig 80 Mg angenommen. Die Last und die Anzahl der Achsen deckt sich mit der Entwurfsplanung aus Filbert et al. (2010). Sofern möglich wird die Konstruktion beibehalten und lediglich bei notwendigen Änderungen davon abgewichen.

5.3.2 Schleusensystem

Das Schleusensystem setzt sich aus Bohrlochschleuse und Behälterschleuse zusammen, wobei die Bohrlochschleuse aktiv angetrieben wird und die Behälterschleuse folgt. Die Bohrlochschleuse ist über eine Flanschverbindung mit der Bohrlochverrohrung verbunden. Die Bohrlochschleuse wird mit dem Grubenstrom verbunden. Die Schleuse für den Transferbehälter verfügt über Kontaktpunkte zur Bohrlochschleuse. Zum einen zentrieren sich beide Schleusen zueinander beim Verbinden. Zum anderen wird bei diesem Vorgang die Transferbehälterschleuse entriegelt. Anschließend kann über den an der Bohrlochschleuse befestigten Antrieb das Schleusensystem geöffnet und geschlossen werden. Des Weiteren darf die Schleuse im gekoppelten Zustand keine Absätze aufweisen, da die Brennstabkokille durch das Schleusensystem hindurch gleiten oder rollen muss.

5.3.3 Luftdichtheit

Das Schleusensystem muss in jedem Betriebszustand Luftdichtheit sicherstellen. Die Dichtungen, die hierbei zur Abdichtung zwischen Bohrlochschleuse und Behälterschleuse in Frage kommen, sind Weichdichtungen aus NBR (Nitrile Butadiene Rubber) oder FKM (Fluor-Kautschuk-Mischung). Diese sind gegen die unter Tage eingesetzten Chemikalien beständig. Die Beständigkeit gegen Salzlösung ist ebenfalls ausgezeichnet. Da sehr geringe Drücke von unter 0,5 MPa im System erwartet werden, kann zum einen auf spezielle und sehr teure RGD (Rapid Gas Decompression) Dichtungen verzichtet werden. Zum anderen kann von empfohlenen Dichtspalten abgewichen werden. Entsprechende Empfehlungen beziehen sich meistens auf Druck von 15 MPa und mehr. Die empfohlenen Dichtspalte sind möglichst gering ausgelegt. Dies führt meistens jedoch zu einer komplizierten Montage bzw. zu extrem feinen Toleranzketten. Die Erfahrung zeigt, dass ein Dichtspalt je nach Schnurstärke von 0,25 mm bis 0,5 mm noch eine ausreichende Sicherheit gegen Extrusion der O-Ringe bietet. Jedoch wird die Gefahr eines Kaltverschweißens der Dichtflächen drastisch reduziert. Die Dichtflächen sollten darüber hinaus behandelt werden. Eine chemische Oberflächenbeschichtung ist aufgrund der langen Betriebszeit eher ungeeignet. Stattdessen bietet sich ein Kugelstrahlen der beteiligten Dichtflächen an. Dies vergrößert und verdichtet die Oberfläche. Die Verdichtung bewirkt eine Steigerung der Randschichthärte und somit eine Reduktion der Fressneigung. Die Vergrößerung der Oberfläche erzeugt kleine „Taschen“ in denen sich das Fett sammeln kann. Die Oberfläche wird so gleichmäßig benetzt.

Die Schleusenscheiben werden als Scheibe mit exzentrischer Bohrung ausgeführt. Dadurch ist es möglich, den Schieber auch unter Rotation abzudichten. Hier kann eine O-Ring Dichtung

verwendet werden, da die zu erwartende Gleitgeschwindigkeit sehr gering ist. Die Kontaktfläche des O-Rings kann bei Bedarf mit Hartmetall beschichtet werden. Es kann in Erwägung gezogen werden eine PTFE (Polytetrafluorethylen) Dichtung zu verwenden, um die Standzeit zu erhöhen. Da die Schleuse erst betrieben wird, wenn die bergbaulichen Tätigkeiten und die damit einhergehende Staubentwicklung im Umfeld abgeschlossen sind, wird ein vergleichsweise geringes Staubaufkommen erwartet. Von daher wird auf für diesen Zweck speziell angefertigte Gleitringdichtungen verzichtet.

5.3.4 Konstruktion der Transport- und Einlagerungstechnik

Behältertragrahmen

Für die Erstauslegung des Behältertragrahmens wurden IPE-Stahlträger zugrunde gelegt. In der Konstruktion werden von der Steifigkeit vergleichbare Kastenprofile verwendet. Die Profile haben den Vorteil, dass weniger Flächen existieren auf denen sich Staub und Schmutz ablagern kann. Dadurch wird die Reinigung und Dekontamination erleichtert.

Der Behältertragrahmen (Abbildung 78) verfügt über diverse Montagepunkte. An der Oberseite befinden sich die Aufnahmen für die Tragzapfenadapter und die Schale in der sich der Transferbehälter im Fall eines Tragzapfenbruches ablegen kann. An der Unterseite befinden sich die Aufnahmen für den Vorschubzylinder und Stützrollen. Die Schale ist mit Vierkantprofilen ausgesteift. Im hinteren Bereich befindet sich ein Schutzbügel. Diese Bügel schützen die Aufnahme für den Druckluftanschluss vor Beschädigungen durch Kollisionen.

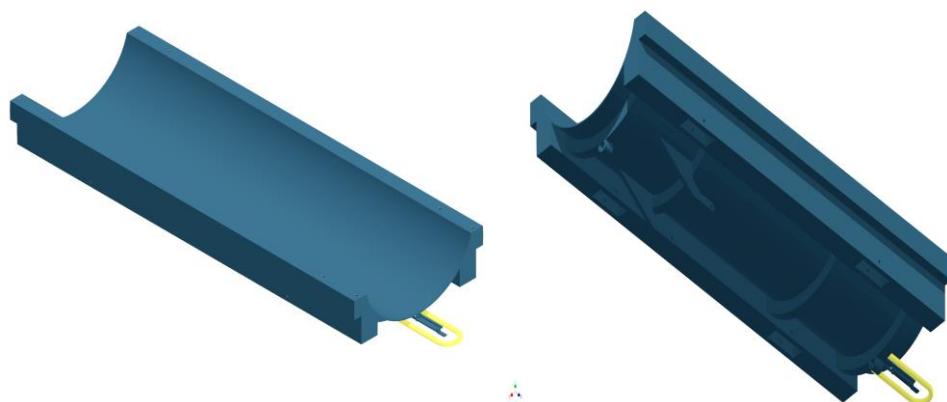


Abbildung 78: Modell des Behältertragrahmens (links: von oben; rechts: von unten)

Die FEA zeigt die höchsten Vergleichsspannungen an der Behälteraufnahme (Abbildung 79). Die Spannungswerte liegen auf einem sicheren Niveau. Der Spannungsverlauf über den gesamten Rahmen ist konstant niedrig, da die Aufnahmen für die Stützrollen möglichst nah am Krafteinleitpunkt positioniert wurden. Beim Betrachten der Verschiebungen (Abbildung 80) wird deutlich, dass sich die beiden Enden des Tragrahmens unter Belastung nach unten biegen. Diese Verschiebung führt zu einem Winkelfehler zwischen Behältertragrahmen und dem Träger, auf dem die Stützrollen laufen. Um diesen Fehler auszugleichen und sicher zu stellen, dass alle Stützrollen eine identische Last tragen, müssen diese einen Mechanismus zum Ausgleich von Winkelfehlern aufweisen.

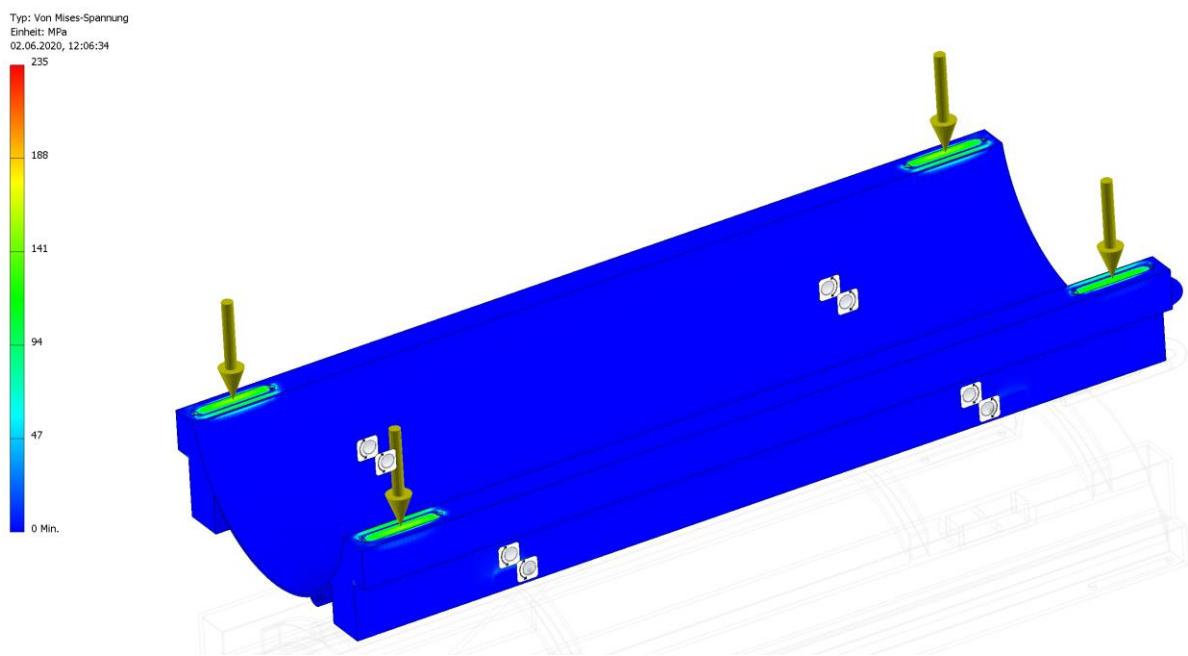


Abbildung 79: Vergleichsspannungen im Behältertragrahmen

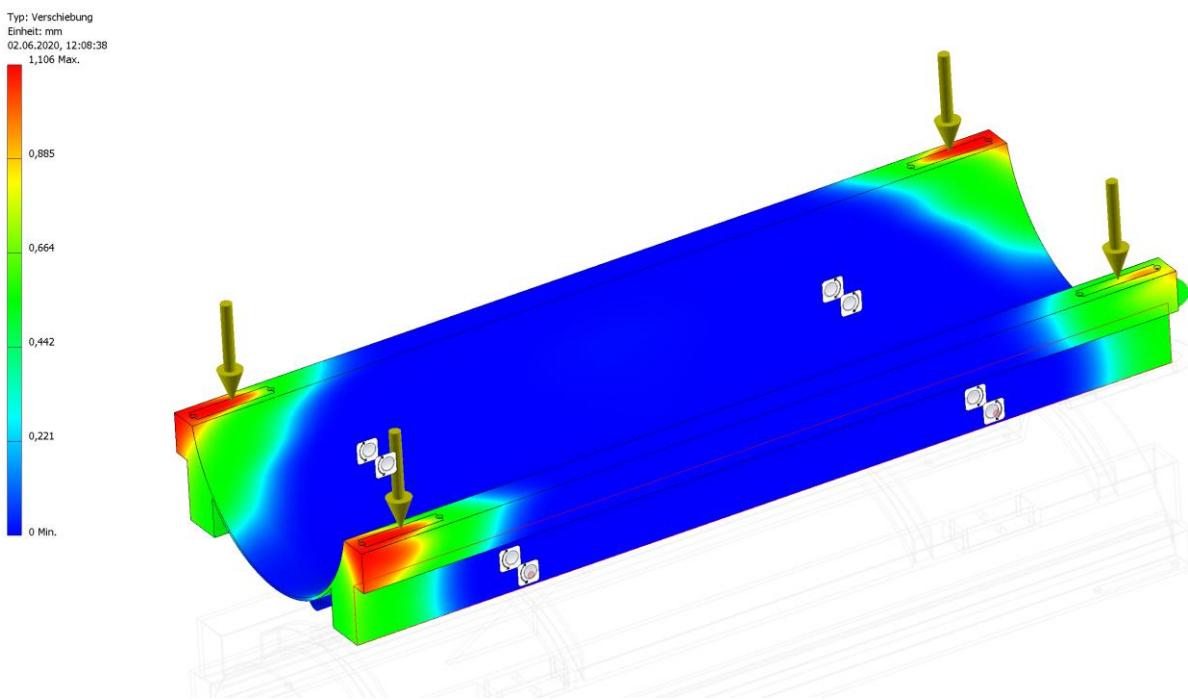


Abbildung 80: Verschiebungen im Behältertragrahmen

Axialvorschubeinrichtung

Um das Andocken an die Bohrlochsleuse zu gewährleisten, muss ein axiales Verschieben des Transferbehälters möglich sein. Der Tragrahmen ist daher verschiebbar auf einem Grundträger (Abbildung 81) gelagert. Zwischen den beiden Trägern sind elektrisch angetriebene Linearaktuatoren verbaut. Jeder dieser Aktuatoren verfügt über eine eigene Bremse, um die Ladung zu sichern. Außerdem verfügt ein Aktuator (50 kN Nennkraft) über genügend Vorschubkraft, um den Tragrahmen mit Behälter zu bewegen, selbst wenn ein Aktuator ausfällt. Es wurden exemplarisch Bosch Rexroth EMC 100-XC-2 Spindelhubantriebe verwendet.

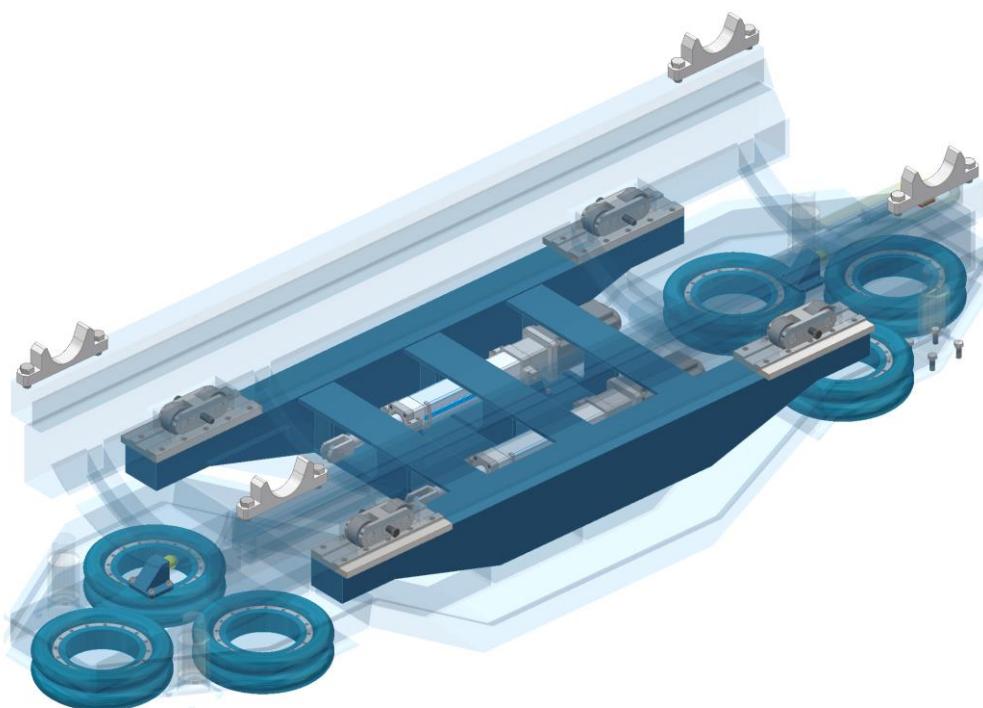


Abbildung 81: Ansicht der Einrichtung zum axialen Vorschub

Der Tragrahmen liegt an den vier Ecken auf jeweils zwei FAG Stützrollenlager auf. Die Lebensdauerberechnung wurde mit dem INA-FAG Rechner durchgeführt. Danach beträgt die Lebensdauer der Lager maximal 89 Jahre. Damit kann sichergestellt werden, dass der Transport- und Einlagerungswagen jederzeit einsatzbereit ist. Die Stützrollen sind mit Passstiften in einem Schwenkbalken befestigt. Dieser Schwenkbalken wird mittels Kopfbolzen im Tragrahmen (Abbildung 82) befestigt. Der Bolzen wird durch einen Sicherungssplint am Rausfallen gehindert.

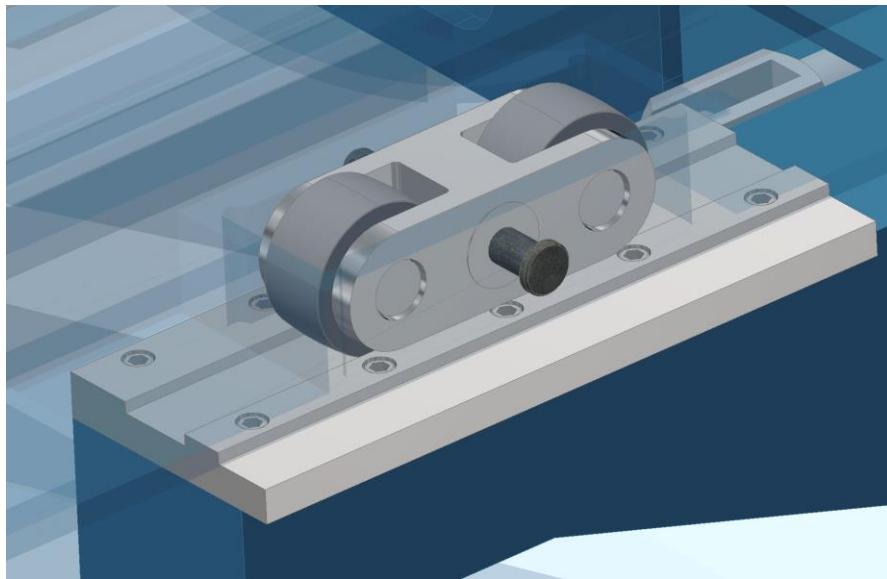


Abbildung 82: **Stützrollen mit Pendelaufhängung**

Als Fahrspur für die Rollen wird eine Schiene aus gehärtetem Stahl verwendet. Diese Schiene wird auf dem Grundträger verschraubt. Die Schiene verfügt über eine Fahrspur für die Stützrollen. Die Fahrspur kann geringe und selten auftretende Seitenkräfte aufnehmen. Sollten die Kräfte durch eine Ausnahmesituation, wie eine Kollision, zu hoch werden, gibt es am Behältertragrahmen krallenförmige Stahlprofile. Diese Stahlprofile umgreifen den Kragen der Schiene und verhindern ein Abheben des Tragrahmens vom Grundträger. Um Salzgrus oder andere Ablagerungen von der Schiene zu entfernen, kommen verschiedene Systeme in Frage. Zum einen könnte ein Abstreifer vor den Stützrollen angebracht werden und unerwünschtes Material abwischen. Zum anderen wäre es möglich, ein Druckluftsystem zu installieren welches die Schienen mit Luftdüsen reinigt.

Mittels FEA werden die Vergleichsspannungen im Grundrahmen und die Verschiebung unter Last ermittelt. Der Grundträger ist am Befestigungspunkt des Drehwerkes fest eingespannt. Die Last (60 Mg) wird gleichmäßig über die Schraubenlöcher eingeleitet. Die maximale Vergleichsspannung beträgt in der Mitte der Hauptträger ungefähr 190 MPa (Abbildung 83). Ein S355 Baustahl bietet mit 380 MPa eine ausreichende Festigkeit bei schwelender Biegebelastung, wodurch er zu etwa 50 % ausgelastet ist. Damit sind noch genügend Reserven für hier unbeachtete Belastungen vorhanden. Dabei handelt es sich zum Beispiel um Korrosions- oder Temperatureinflüsse. Eine genauere Ermittlung des Auslastungsgrades sollte bei einer Fertigungskonstruktion erfolgen. Hier sollten dann auch Details wie die Ausführung des Drehwerkanschlusses berücksichtigt werden. Da an dieser Stelle Steifigkeitssprünge und Kraftumlenkungen zu erwarten sind, sollte hier eine Detailsimulation durchgeführt werden. Der Grundrahmen biegt sich am Lagerpunkt ca. 1,5 mm durch (Abbildung 84). Diese Durchbiegung wird ebenfalls durch die Pendelaufhängung der Stützrollen ausgeglichen.

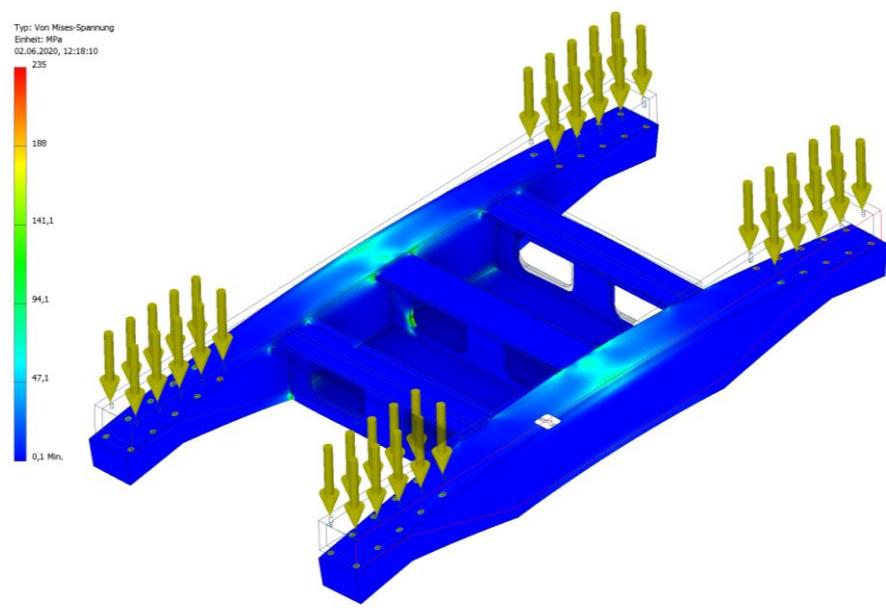


Abbildung 83: Vergleichsspannungen des Grundrahmens

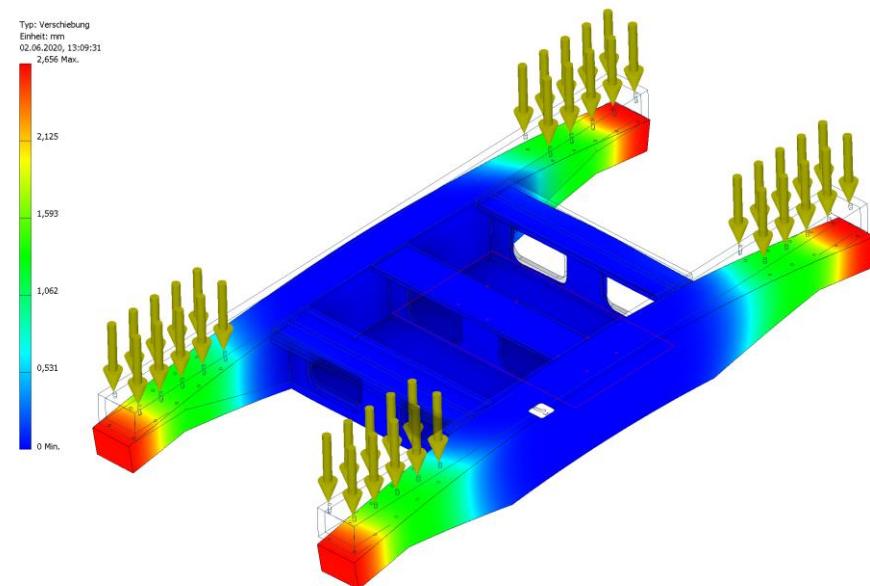


Abbildung 84: Darstellung der Verschiebung des Grundrahmens

Schneckenschwenkgetriebe

Es wird ein TG-E 744 Getriebe verbaut. Das Schwenkwerk wird mittels Flanschverbindung sowohl mit dem Grundrahmen als auch dem Fahrwerk verbunden. Das Schwenkwerk wird von einem Elektromotor mit Planetengetriebe angetrieben. Der Elektromotor kann direkt angeflanscht werden. Ein 3 kW Motor besitzt bei max. 68 U/min ein Drehmoment von 386 Nm. Das Getriebe ist für maximal 400 Nm Eingangsdrehmoment zugelassen. Das Massenmoment für den Aufbau beträgt laut Inventor ca.: $I_{zz} = 7 \times 10^8 \text{ kgxm}^2$. Die Übersetzung der Drehverbindung beträgt 1:104. Damit ist es möglich den Drehkranz in 91 Sekunden komplett zu drehen. Die maximale Winkelgeschwindigkeit sollte allerdings aus Sicherheitsgründen auf 0,5°/s begrenzt werden, da durch die großen bewegten Massen auch lange Bremswege entstehen.

$$\frac{M}{I} = \alpha = \frac{386 \text{ Nm} \times 104}{7 \times 10^8 \text{ kgm}^2} = 0,000057 \frac{\text{rad}}{\text{s}^2}$$

$$t = \frac{\omega}{\alpha} = \frac{\frac{2\pi}{t}}{\alpha} = \frac{\frac{2\pi}{720 \text{ s}}}{0,000057 \frac{\text{rad}}{\text{s}^2}} = 153 \text{ s}$$

Daraus ergibt sich ein Winkel nach Ende der Beschleunigung von:

$$\varphi = \frac{\alpha}{2} \times t^2 = \frac{0,000057 \frac{\text{rad}}{\text{s}^2}}{2} \times (153 \text{ s})^2 = 0,66 \text{ rad} = 38,5^\circ$$

Daraus ergibt sich eine Zeit für den Schwenkvorgang von:

$$t = (90^\circ - (2 \times 38,5)) \times 2 \text{ s} + 2 \times 153 \text{ s} = 332 \text{ s}$$

Beim Einlagerungsbetrieb spielt die Dauer in diesem Fall eine untergeordnete Rolle. Es muss nur darauf geachtet werden, dass die Elektromotoren ausreichend gekühlt werden. Der verbaute Ventilator dreht in der Anlaufphase mit sehr niedrigen Drehzahlen. In der Verzögerungsphase muss genügend Bremsleistung und Kühlung vorhanden sein, um den Behälter wieder stoppen zu können.

Transportsicherung

Die Transportsicherung (Abbildung 85) wird über die Vorschubzylinder gelöst. Der Behältertragrahmen wird gegen zwei Böcke geschoben. An diesen Böcken befindet sich ein Zapfen. Am Behältertragrahmen befindet sich die entsprechende Bohrung. Für den Transport wird der Tragrahmen gegen die Böcke verspannt. Durch die Zapfen wird die Nick- und Gierbewegung des Tragrahmen unterbunden. Die Rollbewegung wird durch das Schwenkwerk unterbunden. Zum Lösen der Transportsicherung muss der Tragrahmen 100 mm gegen Fahrtrichtung verschoben werden. Anschließend kann die Drehbewegung durchgeführt werden.



Abbildung 85: Transportsicherung des Behältertragrahmens

Fahrwerk und Höhenverstellung

Das Fahrwerk wird vom Plateauwagen aus der vertikalen Bohrlochlagerung übernommen. Das Fahrwerk ist für 80 Mg ausgelegt. Somit erfüllt es auch die Anforderungen für die horizontale Bohrlochlagerung.

Da der Oberwagen neu konstruiert wurde, sind die Federn für den Transferbehälter entfallen. Diese Federn werden durch Luftfederelemente (Abbildung 81) ersetzt. Die Luftfederelemente können über eine Variation des Druckes in der Höhe verstellt werden. Diese Höhenverstellung kann ebenfalls dafür genutzt werden, um den Behälter nach vorn oder hinten zu neigen. Des Weiteren ist es möglich den Behälter durch Druckveränderung zwischen den linken und dem rechten Balg zu rollen. Durch diese Maßnahmen kann eine leicht unebene Strecke ausgeglichen werden. In Transportstellung sollten die Zylinder auf 200 mm ausgefahren werden. Dies stellt genügend Federweg bereit. Eine Einstellung der Höhe von 100 mm ist dann in beide Richtungen möglich. In der untersten Position ist allerdings kein Federweg vorhanden. Da die Luftbälge keine Quer- und Längskräfte übertragen können, sind zusätzliche Führungen montiert, welche diese Kräfte aufnehmen können.

Druckluftbereitstellung

Die Bereitstellung der Druckluft erfolgt über einen elektrisch angetriebenen Kompressor. Der Kompressor ist auf der Lokomotive montiert und versorgt das Transport- und Einlagerungsfahrzeug über eine Druckluftkupplung. Da das minimale Volumen im Transferbehälter recht groß ist, wird für die Regelung des Drucks nicht unbedingt ein Druckbehälter benötigt. Jedoch verfügen handelsübliche Kompressoren meistens über eine getaktete Reglung. Von daher muss im realen Anwendungsszenario überprüft werden, ob ohne Reglung der Motorleistung ein gleichmäßiger Druckaufbau möglich ist. Es wird jedoch davon ausgegangen, dass genügend Bauraum für einen Druckbehälter vorhanden ist.

Ein KCT 1500 Einbauaggregat der Fa. KAESER KOMPRESSOREN SE (Coburg) ist in der Lage ca. 1 m³ Luft bei Normdruck pro Minute bereitzustellen. Dieses Aggregat ist trockenlaufend, von daher ist die Druckluft nahezu frei von Ölnebel und anderen organischen Substanzen. Ein Einlagerungsbohrloch von 100 m Länge und einem Durchmesser von 450 mm besitzt ein Volumen von ca. 16 m³. Bei einem Einlagerungsdruck von ungefähr 2 bar ergibt das eine Einlagerungszeit von ca. 32 Minuten für den am tiefsten lagernden Behälter. Dies kann beschleunigt werden, indem der notwendige Einlagerungsdruck reduziert wird. Das wäre zum Beispiel dann der Fall, wenn der Reibwert und somit die Einlagerungskraft reduziert werden. Eine andere Möglichkeit wäre es, in der gegenüberliegenden Strecke des durchschlägigen Bohrlochs einen Unterdruck zu erzeugen. Somit wäre die Druckdifferenz bei niedrigem Überdruck und hohem Unterdruck ausreichend, um den Molch zu bewegen. Das Aggregat kann entweder fest auf der Lokomotive montiert oder in der Strecke in Bohrlochnähe aufgebaut werden.

Für das Rückholen des Molches wird der Druck auf der Transferbehälterseite reduziert und an den Umgebungsdruck angepasst. Anschließend wird auf der gegenüberliegenden Seite ein geringer Überdruck erzeugt. Dafür ist ein weiterer Kompressor im Einsatz.

Druckluftübergabe zum Transferbehälter

Für die Druckluftverbindung ist ein automatischer Anschluss vorgesehen. Dieser Anschluss wird verbunden, sobald der Transferbehälter auf dem Transport- und Einlagerungswagen abgelegt wird. Der Anschluss am Wagen wird schwimmend befestigt. Wenn der Transferbehälter abgesenkt wird, zentrieren sich die beiden Kontaktstellen zueinander. Gleichzeitig dient die Zentrierung als Schutz vor Beschädigungen, da die frei stehenden Ventilenden leicht über die

Grundfläche hinausragen. Die restlichen Komponenten, wie zum Beispiel Leitungen, werden durch Schutzbügel (Abbildung 86) vor Beschädigungen bewahrt. Im angekoppelten Zustand übernehmen die axialen O-Ringe die Dichtfunktion. Diese sind durch die Federn vorgespannt und sorgen dafür, dass kein Luftaustausch stattfinden kann. Sobald der Transferbehälter gekoppelt wird, werden die Ventile betätigt und gegen die Federn bis an einen Anschlag gedrückt. Dabei geraten die radialen O-Ringe in Eingriff und dichten den Leckageweg nach außen ab (Abbildung 86). Die axialen Dichtungen sind nun nicht mehr im Eingriff und die Luft kann vom Transport- und Einlagerungswagen in den Behälter gedrückt werden.

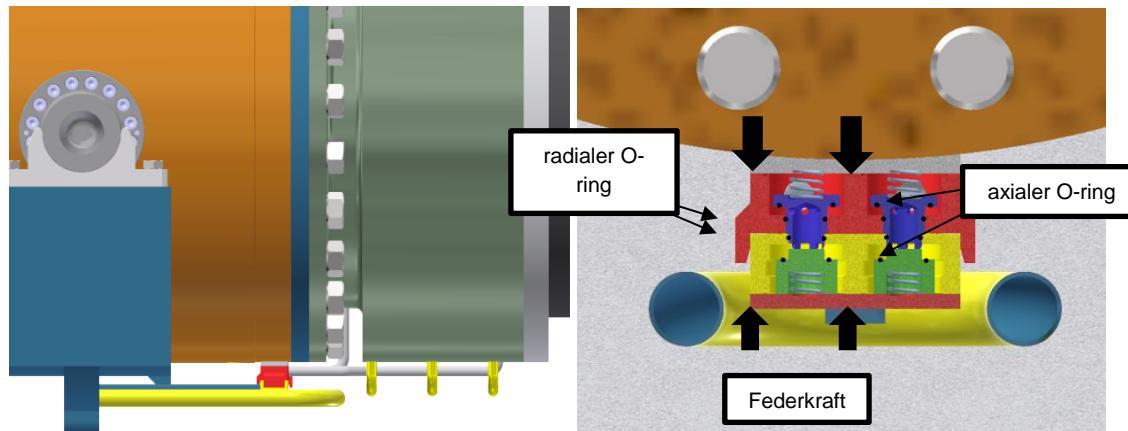


Abbildung 86: Außenansicht der Druckluftübergabe (links) und Schnittansicht durch die Druckluftübergabe (rechts)

Konstruktion des Schleusensystems und der Bohrlochverrohrung

Die Behälterschleuse wird direkt an den Grundkörper des Transferbehälters angeflanscht. Der Grundkörper ist identisch mit der Auslegung aus Filbert et al. (2010). Die Behälterschleuse verfügt über eine Scheibe mit einer exzentrischen Bohrung. Die Scheibe ist so im Gehäuse gelagert, dass sie frei rotieren kann. Die Scheibe verfügt über zwei federvorgespannte Sicherungsstifte. Während des Transportes sorgen die Sicherungsstifte dafür, dass die Schleuse in der verriegelten Position bleibt. Sie werden durch den Eingriff der beiden Entriegelungsstifte der Bohrlochschleuse betätigt und zurückgezogen. Die Bohrlochschleuse verfügt neben den zwei Entriegelungsstiften außerdem über Zentrierstifte. Diese Zentrierstifte gleichen Lageunterschiede aus und sorgen dafür, dass die beiden Schleusen immer innerhalb der zulässigen Toleranz miteinander verbunden sind. Die Bohrlochschleuse wird direkt an die Verrohrung des Bohrlochs angeflanscht. Die Bohrlochschleuse wird über den Grubenstrom mit Energie versorgt. Die Gesamtbaugruppe am Einlagerungsort wird in Abbildung 91 dargestellt.

Lagerung der Transferbehälterschleuse

Der Schleusendeckel ist in radialer, sowie axialer Richtung im Gehäuse gelagert. Die Lagerung in radialer Richtung erfolgt durch 16 Stützrollenlager, welche paarweise angeordnet sind (Abbildung 87). Diese Lagerpaare sind in acht Lagereinheiten untergebracht. Die Lagereinheiten sind gleichmäßig über den Umfang verteilt. Die Gegenlaufläche für die Lager stellt das Gehäuse dar. Die Lauffläche ist oberflächengehärtet, um genügend Verschleißwiderstand zu bieten. Die axiale Lagerung wird von Sinterbronze Gleitlagern übernommen. Diese Gleitlager aus poröser Bronze sind mit Feststoffschnurmitteln wie PTFE imprägniert. Dies reduziert

Reibkräfte und Verschleiß. Da die Stützrollenlager mit Dichtscheiben versehen und die Axiallager imprägniert sind, ist ein regelmäßiges Abschmieren der Lager nicht nötig.

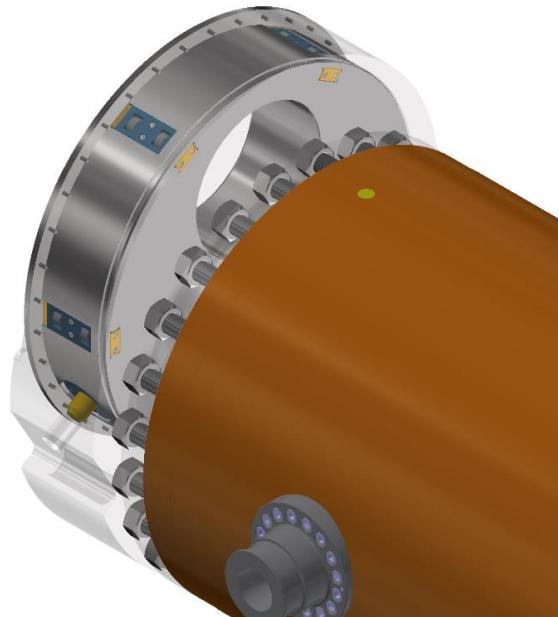


Abbildung 87: Darstellung der Lagerung der Transferbehälterschleuse

Antrieb

Der Antrieb der Schleusen erfolgt von der Bohrlochseite aus. Der Bohrlochschleusendeckel verfügt über eine Zahnscheibe. Die Zahnscheibe wird über einen Zahnriemen von einem Getriebekettenelektromotor angetrieben. Ein Öffnen bzw. Schließen der Bohrlochschleuse ist in circa 90 s abgeschlossen. Sollte der Antrieb ausfallen, muss zunächst die Motorbremse gelöst werden. Anschließend kann die Schleuse mittels einem langen Ratschenschlüssel oder einem hydraulischen Drehmomentschlüssel gedreht werden. Die Grobauslegung des Schleusenantriebes erfolgt gemäß CAD-Daten. Dabei wird Gewicht der Schleusen, der Lagerreibwert, sowie die Exzentrizität des Massenschwerpunktes berücksichtigt. Daraus ergibt sich ein für den Antrieb notwendiges Drehmoment von 5.450 Nm. Da die Übersetzung durch den Riemenantrieb 1:8 beträgt, benötigt der Elektromotor ein Ausgangsmoment von ungefähr 800 Nm.

Ausführung und Kontrolle der Dichtung

Für einen erfolgreichen Einschubvorgang ist es wichtig, dass das Einlagerungsbohrloch möglichst luftdicht abgeschlossen ist. Minimale Leckagewege können zwar durch ein erhöhtes Luftvolumen ausgeglichen werden, sollten jedoch nach Möglichkeit ausgeschlossen werden. Das Schleusensystem wird über O-Ring Weichdichtungen abgedichtet. Beim Andocken werden beide Schleusenscheiben aufeinander gepresst. Dabei verschließt ein axial angeordneter O-Ring den Spalt zwischen den Schleusen. Da dieser O-Ring ungeschützt ist, sollte dieser regelmäßig getauscht werden. Dies ist aber jederzeit und ohne Werkzeug möglich. Der O-Ring befindet sich in einer Schwalbenschwanznut an der Vorderseite der Bohrlochschleuse.

Die Schleusenscheiben werden zum Gehäuse hin ebenfalls mit O-Ringen abgedichtet. Wenn diese O-Ring-Dichtung doppelt ausgeführt wird, ist ebenfalls eine Redundanz der Dichtung möglich. Die Abdichtung zum Transferbehälter kann über eine metallische Dichtfläche oder

eine Weichdichtung erfolgen. An der Trennstelle zur Bohrlochverrohrung stellt sich derselbe Sachverhalt dar. Die Bohrlochverrohrung selbst muss zusätzlich noch flüssigkeitsdicht ausgeführt sein. Von außen einwirkende Lösungen sollten nach Möglichkeit nicht in das Innere der Verohrung gelangen. Für die Dichtwirkung der Rohrsegmente untereinander wird eine metallische Dichtung in Erwägung gezogen. Die Rohrelemente sind miteinander verschraubt, wobei der Gewindezapfen einen Dehnbereich hat und das Innengewinde dementsprechend tief geschnitten ist. Der Dehnbereich gleicht die Fertigungstoleranzen aus und ermöglicht ein doppelt schulterndes Gewinde. Durch die zwei Schultern, wobei jede in Ihrer Flächenpressung den Gebirgsdruck überschreiten sollte, wird die Dichtwirkung sichergestellt. Dafür ist jedoch ein kontrolliertes Verschrauben der Elemente notwendig. Vor dem Einlagerungsvorgang sollte ein Drucktest durchgeführt werden. Dafür wird die Einlagerungsstrecke von der gegenüberliegenden Bohrlochseite ein leichter Unterdruck erzeugt. Dieser Druck soll für eine gewisse Zeit gehalten werden. Sofern der Druckabfall innerhalb der Toleranz liegt, ist eine Einlagerung möglich.

Gleitkufen der BSK

Für die Auslegung der Gleitkufen ist zunächst der minimale Innendurchmesser des Einlagerungsbohrlochs zu untersuchen. Der Innendurchmesser beträgt im Fertigungszustand über die gesamte Einlagerungsstrecke 450 mm. Dieser Durchmesser wird durch den wirkenden Gebirgsdruck verringert. Es wird angenommen, dass sich der Einlagerungsort in ca. 750 m Tiefe befindet. Von daher wird die Annahme getroffen, dass der vertikale Gebirgsdruck ungefähr 15 MPa beträgt. Durch die Erwärmung des Gebirges, und der damit einhergehenden Wärmeausdehnung, entstehen zusätzlich horizontale Spannungen am Einlagerungsbohrloch. Es wird angenommen, dass diese Spannungen ca. 25 MPa in horizontaler Richtung betragen. Mit diesen Werten wurde eine FEA durchgeführt. Bei einem Rohr mit 50 mm Wandstärke (Abbildung 88) ergibt sich eine Querschnittsverringerung von ungefähr 2,9 mm.

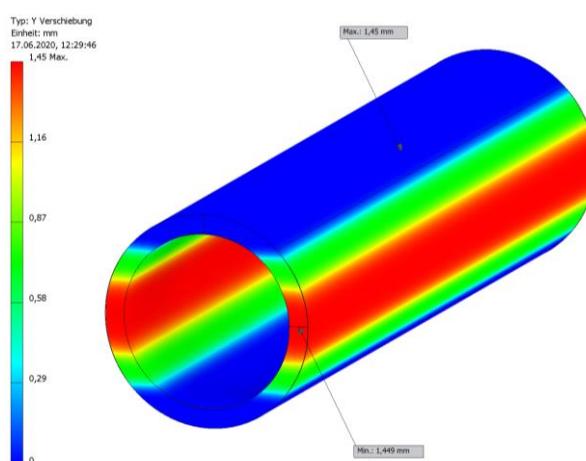


Abbildung 88: Schleusensystem im angedockten Zustand

Aus diesem Grund wird ein Durchmesser, auf dem die Kufen angeordnet sind, von 445 mm angenommen. Somit ist der Durchmesser der Kufen auch geringfügig kleiner als der Rohrdurchmesser und ein Kantenträgen wird ausgeschlossen. Bei der Konstruktion der Kufe wurde darauf geachtet, dass diese möglichst direkt aus einem Grünling hergestellt werden können. Abbildung 89 zeigt eine solche Gleitkufe.

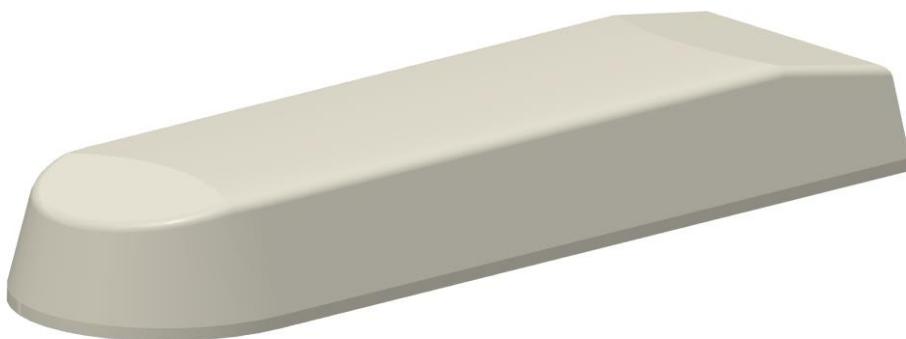


Abbildung 89: Gleitkufe

Es gibt unterschiedliche Möglichkeiten, die Kufen an der BSK zu befestigen. Die Brennstabkokille verfügt über 4 cm Wandstärke. Es ist möglich die Kufen direkt in eine Tasche einzulöten. Dafür wird in der Industrie ein Lot aus Silber und Kupfer verwendet (Mayer, 2014). Dieses hat eine hohe Festigkeit und eine gute Korrosionsbeständigkeit. Eine andere Möglichkeit ist es, die Kufen in einem Hinterschnitt zu platzieren und gegen herausrutschen zu sichern. Da diese Konstruktion komplexer ist, wird diese im 3D Modell (Abbildung 90) dargestellt. In die Wand der Brennstabkokille ist für jede Kufe eine Tasche eingestochen. Diese Tasche dient als Ausgangspunkt für die Schwalbenschwanznut. Die Seiten der Kufe sind im 15° Winkel ausgeführt. Bei der Montage werden die Kufen in die gefrästen Taschen gelegt und in die Schwalbenschwanznut eingeschoben. Anschließend wird ein Frästeil in die Tasche eingelegt: Dieses Teil füllt die verbleibende Fehlstelle auf und fixiert die Kufe. Dieses Frästeil kann auf verschiedene Arten befestigt werden. Es kann eingepresst, eingelötet, verschraubt oder verschweißt werden. Da die Kufen nicht austauschbar sein müssen, wird die Schweißlösung bevorzugt. Der Schweißvorgang ist automatisierbar und somit einfacher prozesssicher zu gestalten ist. Als Schweißprozess wird Elektronenstrahlschweißen bevorzugt. Dieser Prozess benötigt kein Schweißzusatzmittel, sofern die Komponenten aufeinandergepresst sind. Jedoch muss hierbei geprüft werden, ob Anlagen für die geforderten Bauteilgrößen verfügbar sind.

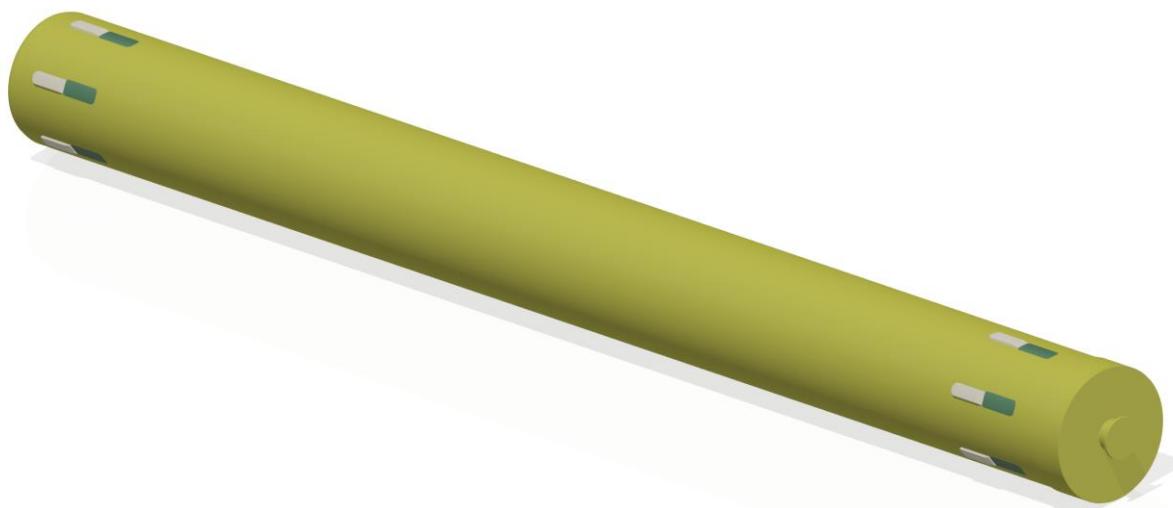


Abbildung 90: BSK mit Gleitkufen

Abbildung 91 zeigt die Transport- und Einlagerungstechnik am Einlagerungsort in Verbindung mit der Bohrlochschieleuse.

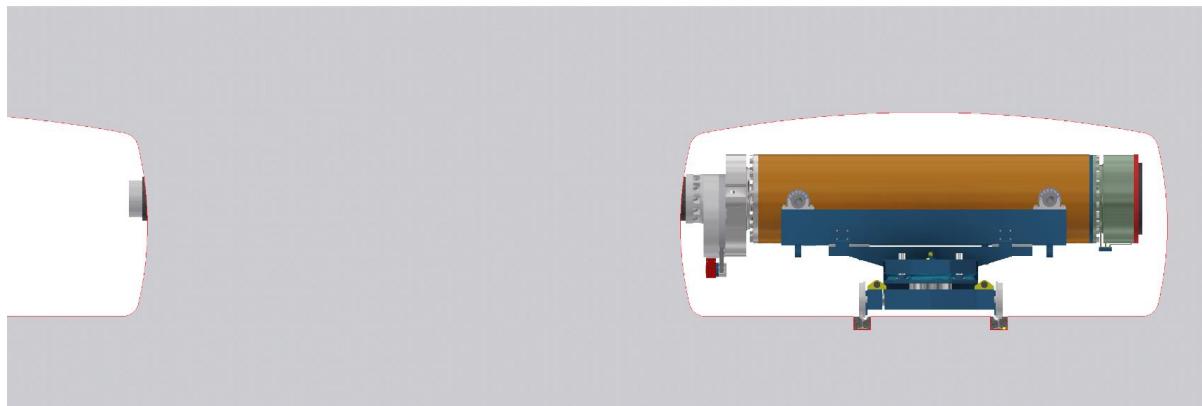


Abbildung 91: Gesamtbaugruppe inklusive des Schleusensystems und des durchschlägigen Bohrloches

6 Technik der direkten Endlagerung von Transport- und Lagerbehältern (TLB)

6.1 Anforderungen

Die Beschreibung der Anforderungen an die Transport- und Einlagerungstechnik der Einlagerungsvariante Direkte Endlagerung von Transport- und Lagerbehältern beginnt mit der Erläuterung der erforderlichen Funktionen für die Umsetzung der Transport- und Einlagerungsvorgänge. Darauf folgend werden Anforderungen ausgeführt, die sich aus den Randbedingungen des Endlagerbetriebs, den ermittelten Funktionen und weiteren technischen Sachverhalten ergeben.

Da in diesem Vorhaben überwiegend Weiter- und keine Neuentwicklungen angestrebt werden, wird in den Anforderungen an die Transport- und Einlagerungstechnik zur Streckenlagerung der konzeptionelle Aufbau der bestehenden Streckentransport- und Einlagerungsvorrichtung (STEV) aus Filbert et al. (2014) in den folgenden Beschreibungen berücksichtigt.

Vorgehensweisen, die sich aus Vorschriften und Normen ergeben, werden im Text an den passenden Stellen aufgeführt. Die im Maschinenbau einschlägigen Normen, insbesondere mit Bezug zur Maschinensicherheit, werden berücksichtigt, z. B. das ProdSG oder DIN EN ISO 12100. Von besonderer Wichtigkeit sind die KTA.

6.1.1 Allgemeine Funktionsbeschreibung

Die STEV dient dazu, einen TLB unter Tage schienengebunden bis zum Einlagerungsort zu transportieren, ihn mit seiner Längsachse vor dem horizontalen Einlagerungs-bohrloch in die Achsrichtung des Bohrloches zu drehen und in das Bohrloch einzuschieben. Der umgekehrte Vorgang, Zug der TLB aus dem nicht versetzten Bohrloch, soll ebenfalls möglich sein.

Alle eingesetzten Werkstoffe müssen den Bedingungen unter Tage gerecht werden. Für im Bohrloch verbleibende Elemente ist die erhöhte thermische Belastung bei einer möglichen Rückholung zu berücksichtigen. Folgende Arbeitsvorgänge werden der Konstruktion zugrunde gelegt:

- 1 Umladen des Abfallgebinde am Füllort unter Tage durch eine Umladevorrichtung vom Schachttransportwagen auf die STEV
- 2 Fahren der beladenen STEV im Zugverband zum Einlagerungsbohrloch
- 3 Drehen des STEV- Oberwagens mit Abfallgebinde zur Ausrichtung des Oberwagens mit dem Bohrloch
- 4 Fein- Positionierung des STEV- Oberwagens vor dem Bohrloch (Horizontal / Vertikal)
- 5 Stabilisierung der STEV in der Strecke
- 6 Einschieben des Gebinde mit verlorenem Schlitten in das Bohrloch
- 7 Drehen des STEV- Oberwagens ohne Abfallgebinde
- 8 Rückfahrt der unbeladenen STEV zum Füllort

6.1.2 Maße und Massen der TLB

Da die Transport- und Lagerbehälter gefertigt wurden und in Betrieb sind, sind ihre Maße und Massen vollständig bekannt. Bei der Einlagerung von TLB sind ungefähr 1.400 Transport- und Einlagerungsvorgänge zu erwarten.

Tabelle 11: Übersicht der Daten für TLB

Länge/Höhe [mm]	Durchmesser [mm]	Abstand Tragzapfen längs [mm]	Abstand Tragzapfen quer [mm]	Maximales Ge- wicht [kN]
4.080 – 6.200	2.430 – 2.660	2.700 – 5.200	2.395 – 2.720	1.600

6.1.3 Fahrbahn

Die Ausführungen zum Fahrbahnbau aus DIREGT können als Grundlage für die Weiterentwicklung der STEV verwendet werden (Schienen-Schwellensystem mit geschottertem Unterbau):

- Spurbreite 1.435 mm (Spurbreite des deutschen Bahnnetzes)
- Betonschwellenabstand 600 mm
- Schienenprofil RT 19, Gütegrad P4 (340 – 430 HB)

6.1.4 Weitere allgemeine Anforderungen

Neben den baugruppenspezifischen Funktionen und Anforderungen bestehen Anforderungen an die Transport- und Einlagerungstechnik, die sich aus den Umweltbedingungen und weiteren Randbedingungen ergeben. Diese sind in der folgenden Liste aufgeführt:

- Trockentemperatur der Wetter ca. 40°C, max. 52°C
- Der Einlagerungsvorgang muss reversibel sein
- Für die Rückholung notwendige Elemente, die im Bohrloch verbleiben, ist die Auslegungstemperatur von 200°C zu berücksichtigen
- Geringe Luftfeuchtigkeit, Auslegung bis max. 70 %
- Anwesenheit von Salzstaub
- Gesteinsfestigkeit: 15-25 MN/m²
- Max. Streckengefälle: 1°
- Fahrbahn Untergrund: Steinsalz
- Fahrbahn Deckschicht: oben (Fahrbahn)
- Eingesetzter Stahl: S355 (Aktualität prüfen)
- Dekontaminierbare Oberflächen, Vermeidung von Hinterschnitten, Abflussöffnungen vorsehen
- Verkapselte Lager (Staubbelastung), Zentralschmieranlage
- Wartungsfreundlichkeit / weitestgehend wartungsfreie Teile verwenden

- Alle wartungspflichtigen Bauteile leicht zugänglich
- Geringe Brandlast, unter Tage zugelassene Schmierstoffe/ Fluide verwenden
- Hydraulikfluid HFC (schwer entflammbar, zugelassen unter Tage)
- Automatisches Feuerlöschsystem, Pulverlöschanlage
- Möglichst kompakte Bauweise
- Schachttransport muss in Einzelteilen möglich sein. Zerstörungsfrei trennbare Verbindungen sind zu bevorzugen. Schweißen nur in Ausnahmefällen zulässig.
- Weitestgehender Einsatz von Serienbauteilen (erprobte Zuverlässigkeit, gute Ersatzteilbeschaffung)
- Redundanz oder erhöhte Sicherheitsbeiwerte vorsehen, vgl. Auslegung
- Bohrlochabmessungen:
 - Durchmesser: max. 2.700 mm
 - Tiefe: ca. 13 m

6.1.5 Anforderungsliste - STEV

Für die STEV ergeben sich folgende konkrete Funktionen und Anforderungen:

Erforderliche Funktionen

- Aufnahme der TLB / Aufnahme des Lastaufnahmemittels für die TLB
- Verspannen / Fixieren des Lastaufnahmemittels oder der TLB
- Transport von Lastaufnahmemittel und Abfallgebinde mit Lok als Zugfahrzeug
- Ausrichtung des Behälters / Lastaufnahmemittels vor dem Bohrloch
- Einschieben des TLB in das Einlagerungsbohrloch
- Kopplung mit Lokomotive

Anforderungen

- max. 5 km/h (2,5 km/h bei Weichenüberfahrt)
- Feststellbremse
- Kein eigener Antrieb, keine Betriebsbremse vorgesehen
- Zul. Achslast: 40 t
- Gleisgebunden
 - Achsanzahl erhöhen für geringere Punktlast verglichen mit dem bisherigen Konzept
 - Verschleiß der Schienen minimieren
- Niedrige Bauhöhe
- Verspann-Vorrichtung für das Lastaufnahmemittel oder den TLB zur Sicherstellung der Lagesstabilität
- Drehbarer Oberwagen (Kugeldrehverbindung)
- Selbsthemmender Schneckenantrieb am Oberwagen
- Mechanischer Anschlag zur Positionierung des STEV-Oberwagens vor dem Bohrloch (vertikal und horizontal)
- Vorrichtung zur vertikalen Ausrichtung des Behälters vor dem Bohrloch
- Maßnahme zum Vorbeugen eines Verkantens des TLB im Bohrloch

- Hubvorrichtung zum „Einschieben“ des TLB über 14 m Gesamtweg
- Zylinder kompakt dimensionieren zur Kosten- und Raumersparnis
- Kippsicherung bei „Einschiebe-Vorgang“
- Fernsteuerung/Teleoperation
- Energieversorgung über Kopplung mit Lokomotive
- Absicherung / Federung gegen Stöße, Ausgleich von Unebenheiten
- Puffer als Anprallschutz vorsehen, nur als Notfallmaßnahme, ein regulärer Anprall ist auszuschließen, zulässige Maximalbeschleunigung 0,5 g
- Radbruchsicherung
- Laufwerke möglichst niedrig bauen (Neuerungen im Stand der Technik!)
- Anschlagspunkt für ein Aufgleissystem
- Erkennen der Schwerpunktllage des jeweiligen TLB und Ausgleich dieser durch Verfahren der TLB in Längsrichtung aus

Am jeweiligen Bohrloch angekommen, wird die STEV über optische Sensoren an der STEV und Signalgeber im Führerstand der Lok grob (im Zentimeterbereich) so positioniert, dass die vertikale Mitte der Kugeldrehverbindung der STEV und die vertikale Mitte des Bohrlochs in horizontaler Richtung übereinanderliegen. Über die Stützylinder erfolgt das Abstützen auf den Sockeln vor dem Bohrloch und die Feinausrichtung der Höhe des Oberwagens. Dabei wird der Oberwagen so ausgerichtet, dass die Fahrbahn des Oberwagens im Millimeterbereich höher positioniert ist als die Fahrbahn im Bohrloch. Dadurch soll das Verschieben des Schlittens vereinfacht werden. Für einen möglichen Zugvorgang würde die Fahrbahn auf dem Oberwagen entsprechend tiefer positioniert.

6.1.6 Anforderungen – Lokomotive

In Engelmann et al. (1995) und Filbert et al. (2010) wurde als Antriebsmaschine eine batteriebetriebene Lokomotive verwendet. Eine solche kommt auch weiterhin zum Einsatz. Jedoch wird die bekannte Lokomotive durch eine moderne batteriebetriebene Lokomotive ersetzt, die den aktuellen Anforderungen genügt. Es gelten die Anforderungen wie in Kapitel 3.1.7. Aufgrund des hohen Zuggewichts sind zwei Lokomotiven vorgesehen, eine schiebend, die andere ziehend.

Da die Antriebsmaschine in allen Einlagerungsvarianten verwendet wird, wird sie gesondert in Kapitel 8 vorgestellt.

6.2 Bedarf zur Weiterentwicklung

Für die Änderungskonstruktion an der Streckentransport- und Einlagerungsvorrichtung wurden auf der Basis der Erkenntnisse der Erstkonstruktion in DIREKT folgende Ziele festgelegt:

1. Der Stahleinsatz für Schlitten und Bohrlocheinbauten soll reduziert werden. Dies dient der Verringerung der möglichen Gasproduktion durch Korrosionsprozesse.

2. Durch Verzicht auf eine Gleitbahn sollen organische Komponenten im Endlager reduziert werden, da auch diese durch Zersetzungsprozesse zur Gasbildung beitragen.
3. Das System soll durch Ersatz der Gleitführung und ihrer geforderten Genauigkeit robuster werden.

In den Anforderungen wurden für die STEV folgende erforderliche Funktionen abgeleitet:

- Aufnehmen von TLB oder Lastaufnahmemitteln und TLB
- Verspannen / Fixieren des Lastaufnahmemittels oder der TLB
- Transport von Lastaufnahmemittel und Abfallgebinde mit Lok als Zugfahrzeug
- Ausrichtung des Behälters / Lastaufnahmemittels vor dem Bohrloch
- Einschieben des TLB in das Einlagerungsbohrloch
- Kopplung mit Lokomotive

Für jede der genannten Funktionen lassen sich weitere Unterfunktionen definieren und Funktionsträger zuweisen. Nachfolgend sind die jeweiligen Unterfunktionen, die Funktionsträger mit ihren jeweils zu Grunde liegenden Wirkprinzipien und der identifizierte Änderungsbedarf in Tabelle 12 dargestellt.

Basierend auf dieser Analyse werden vor allem die Änderungen an den Funktionen „Einschieben der TLB in horizontale Kurzbohrlöcher“ und „Aufnehmen von TLB oder Lastaufnahmemitteln und TLB“ betrachtet. Dazu werden Lösungsvorschläge erstellt.

Tabelle 12: Tabellarische Übersicht des Änderungsbedarfs an der STEV, gegliedert nach erforderlichen Funktionen und Unterfunktionen

Unterfunktion	Komponente	Prinzip	Änderungsbedarf
Funktion: Aufnehmen von TLB oder Lastaufnahmemitteln und TLB			
Aufnehmen der TLB	Schlitten	Ladungsträger	Vorhanden
Aufnehmen des Lastaufnahmemittels	Oberwagen	Fahrspur / Gleitbahn	Vorhanden
Funktion: Fixierung / Verspannen von Lastaufnahmemittel oder TLB			
Fixieren der TLB	Schlitten	Formschluss	Bedingt Vorhanden
Fixieren des Schlittens in Längsrichtung	Schubzylinder + Anschlag + Druckspeicher	Reibschluss/ Kraftschluss	Bedingt Vorhanden
Fixierung des Schlittens in Querrichtung	Oberwagen	Formschluss	Bedingt Vorhanden
Funktion: Transport von Lastaufnahmemittel und Abfallgebinde			
Fahrwerk	Schienenlaufwerke	Gleisgebunden	Bedingt Vorhanden
Antrieb	Lok	Zugverband	Keiner
Aufbau	Fahrgestell	Tieflader	Keiner
Funktion: Ausrichtung des Behälters vor dem Bohrloch			
Drehen des Oberwagens	Schneckentrieb + Kugeldrehverbindung	Selbsthemmender Antrieb + Wälzlager	Keiner
Positionierung Höhe	Stützen + Podeste	Hydraulik	Keiner
Positionierung	Dorne + Zentrierung	Hydraulik	Keiner
Funktion: Einschieben der TLB in horizontale Kurzbohrlöcher			
Bereitstellen der Schubkraft	Hydraulikzylinder	Hydraulik	Keiner

Unterfunktion	Komponente	Prinzip	Änderungsbedarf
Verringerung der benötigten Schubkraft	Schlitten + beschichtete Gleitbahn	Gleitreibung	Vorhanden
lineare Führung	Schlitten + Angestellte Führungsbahn	Gleitführung, Profilführung, Selbstzentrierung	Vorhanden
Funktion: Kopplung mit Lokomotive			
Verbindung mit der Lok	Kupplung	Eisenbahnkupplung	Keiner
Abfangen von Stößen	Puffer	Hydraulischer Dämpfer / Ringfeder	Keiner
Weiterführung von Medien	Kabel, Schläuche etc.	Leitungen und Leitungsverbinder	Keiner

6.2.1 Einstufung der Einlagerungstechnik nach KTA

Für die Auslegung von Technik zum Transport und zur Einlagerung von hochradioaktiven Abfällen bestehen keine gültigen kerntechnischen Regeln. Sinngemäß können die KTA herangezogen werden. Für die Transport- und Einlagerungstechnik kann vor allem die KTA 3902 „Auslegung von Hebezeugen in Kernkraftwerken“ von Nutzen sein. Diese KTA sieht verschiedene Einstufungen der Hebezeuge vor, nach denen sich Strenge und Umfang der Anforderungen richten.

Die STEV wird nach der geringsten Einstufung nach KTA 3902 ist als „Hebezeug nach allgemeinen Bestimmungen“ weiterentwickelt. Hier ist KTA 3902 Abschnitt 3 maßgebend. Es wird gefordert, dass die Hebezeuge den allgemein anerkannten Regeln der Technik und den allgemeinen Sicherheitsvorschriften, Arbeitsschutzzvorschriften des Bundes und der Länder sowie den Vorschriften der Träger der gesetzlichen Unfallversicherung genügen sollen. Neben den allgemeinen Bestimmungen sind nach KTA 3902 Abschnitt 4 weitere Aspekte bei der Konstruktion zu berücksichtigen:

1. Es muss ein Nachweis gegen „Einwirkungen von außen“ geführt werden, wenn dieser auch für das Gebäude in dem das Hebezeug betrieben wird geführt wird.
2. Umgebungsbedingungen wie z. B. Druck, Temperatur, Umgebungsmedien und Strahlenbelastung sind bei der Konstruktion zu berücksichtigen.
3. Die Dekontaminierbarkeit muss bei der Konstruktion berücksichtigt werden.

Die Einstufung der Technik erfolgt nach dem entsprechenden Flowchart der KTA 3902 (Abbildung 92). Maßgeblich ist, dass auch bei einem Versagen der Einlagerungstechnik, z. B. durch Fallenlassen des Abfallgebindes, aufgrund der Behälterauslegung und der geringen möglichen Fallhöhe kein Radionuklidaustrag zu erwarten ist. Die Übertragbarkeit der Anforderungen aus KTA 3902 auf die Einlagerungstechnik für TLB ist jedoch nur eingeschränkt sinngemäß möglich. Die Fokussierung der KTA 3902 auf die Verwendung von Seiltrieben und Krananlagen erschwert ihre Anwendung auf Maschinenkonzepte, die diese Komponenten nicht benutzen.

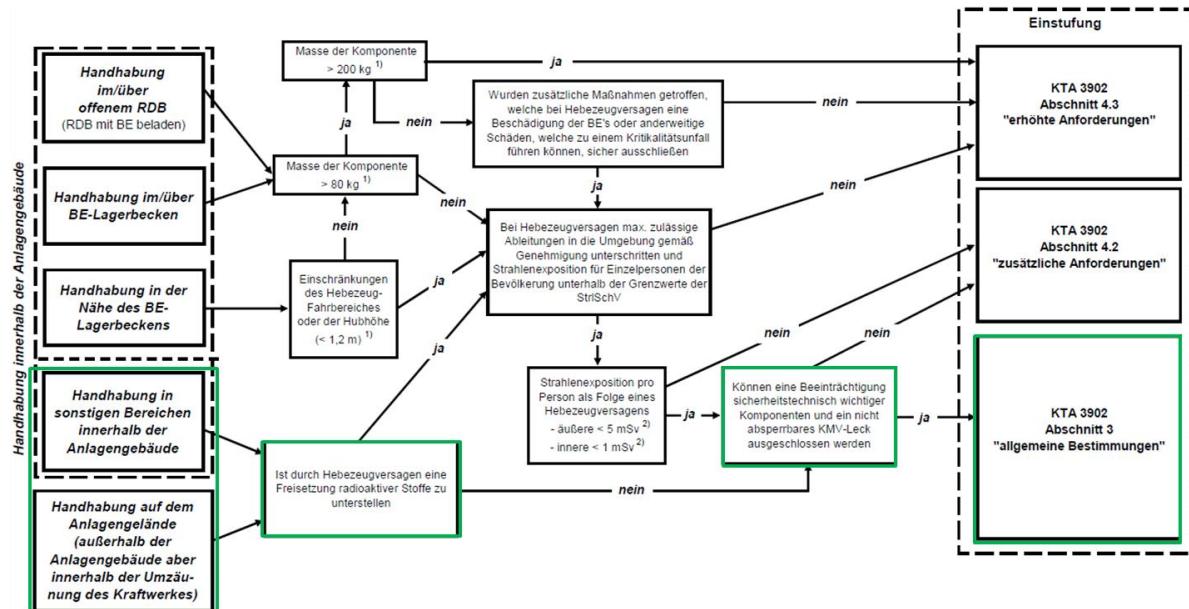


Abbildung 92: Flowchart zur Einstufung von Hebezeugen nach KTA 3902; in grün: Einstufung der Transport- und Einlagerungstechnik für TLB

6.2.2 Prinziplösungen

Für die Änderungen an der Funktion „Einschieben der TLB in horizontale Kurzbohrlöcher“ sind die Unterfunktionen „Verringerung der benötigten Schubkraft“ und „lineare Führung“ zu bearbeiten. Aktuell erfolgt die Verringerung der benötigten Schubkraft durch eine Gleitbahn nach dem Prinzip der Gleitreibung, die lineare Führung erfolgt durch die Selbstzentrierung des Schlittens auf der angestellten Gleitbahn.

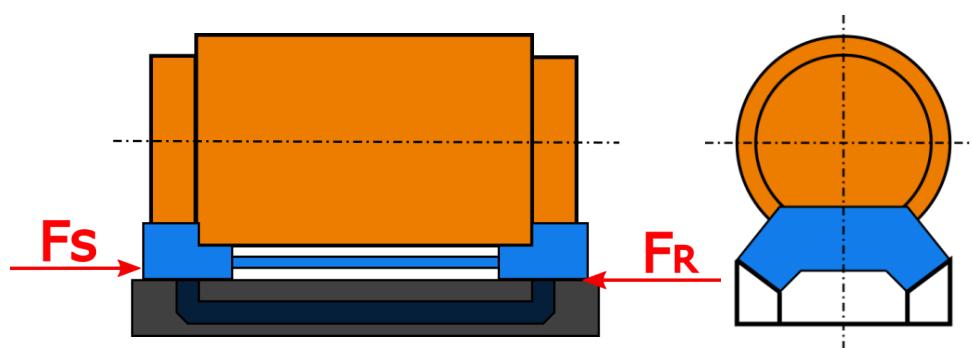


Abbildung 93: Prinzipskizze der Gleitreibung und angestellten Führung

Für beide Unterfunktionen wurden verschiedene potentielle Lösungsmöglichkeiten entwickelt. Diese sind nachfolgend tabelliert dargestellt. Zusätzlich ist auch die bereits ausgeführte Lösung enthalten.

Tabelle 13: Prinziplösungen zur Erfüllung der Funktionen

Funktion	1	2	3	4	5	6
Verringerung Schubkraft						
	Gleiten auf Gleitbahn	Gleiten direkt auf der Sohle	Panzerrollen am Schlitten	Panzerrollen STEV und Bohrloch	Verlorener Einlagerungswagen	Schmierstoff
Lineare Führung						
Angestellte Führung	Angestellte Führung	Angestellte Führung und Seitenbleche	Kanäle, bzw. U-Profile	Zwangsführung durch Spurkranz	Ohne weitere Führung	

Aus den in Tabelle 13 dargestellten Prinziplösungen werden nun sinnvolle Lösungskombinationen für beide Funktionen gebildet. Diese sollen anschließend im Bewertungsverfahren bewertet und ausgewählt werden. Folgende Lösungskombinationen wurden gebildet:

- Gleitbahn mit angestellter Führung
- Gleitbahn mit angestellter Führung und zusätzlichen Seitenblechen
- Gleitbahn geführt im U-Profil
- Verschieben direkt auf der Sohle ohne weitere Führung
- Panzerrollen am Schlitten mit angestellter Führung
- Panzerrollen am Schlitten mit angestellter Führung + Seitenblech
- Panzerrollen am Schlitten geführt im U-Profil
- Panzerrollen im Bohrloch und angestellte Führung
- Panzerrollen im Bohrloch und Führung als U-Profil
- Verlorener Einlagerungswagen auf Schienen
- anorganischer Schmierstoff und keine weitere Führung

6.2.3 Bewertung der Prinziplösungen

Es liegen keine Sachgründe vor, die es ermöglichen, einer Lösung den direkten Vorzug zu geben. Um eine Auswahl treffen zu können, wird ein systematisches Bewertungs- und Auswahlverfahren verwendet, das den subjektiven Einfluss einzelner minimiert. Das Bewertungsverfahren soll auf Grundlage einer Nutzwertanalyse erfolgen. Die Nutzwertanalyse ist eine gewichtete Bewertung von Lösungsvorschlägen nach Bewertungskriterien. Für jeden Lösungsvorschlag wird dabei ein Gesamtnutzwert durch eine Wertsynthese gebildet. Der Gesamtnutzwert eines Lösungsvorschlags ergibt sich dabei nach folgender Formel:

$$\text{Gesamtnutzwert} = \sum \text{Gewichtung} \times \text{Bewertung}$$

Um eine Nutzwertanalyse durchführen zu können sind zunächst Bewertungskriterien aufzustellen. Zudem müssen Gewichtungsfaktoren für die einzelnen Kriterien gewählt oder ermittelt werden und eine Skala zur Bewertung ausgewählt werden. Damit das Bewertungsverfahren möglichst unvoreingenommen durchgeführt wird, ist die parallele Bewertung durch mehrere unabhängig voneinander agierenden Fachpersonen notwendig. Die Gewichtungsfaktoren wurden im Vorhaben TREND durch einen Paarvergleich ermittelt. Bei der Ermittlung von Gewichtungsfaktoren wird dabei die Wichtigkeit, bzw. die Relevanz der einzelnen Bewertungskriterien zueinander verglichen. Aus dem Paarvergleich ergibt sich für jedes Bewertungskriterium ein Faktor, welcher die Relevanz des Kriteriums für den Auswahl- und Entscheidungsprozess wiedergibt.

Als Bewertungsskala wurde die Werteskala aus der VDI Richtlinie 2225 übernommen.

Tabelle 14: Wertskala nach VDI 2225

Punkte	Bedeutung
0	Unbefriedigend
1	Gerade noch tragbar
2	Ausreichend
3	Gut
4	Sehr gut (ideal)

Folgende Bewertungskriterien wurden im Konsens der beteiligten Fachpersonen festgelegt:

Komponentenverbleib in der Bohrung: Dieser Punkt beschreibt, ob zusätzliche Komponenten wie z. B. eine Führungsschiene in der Bohrung fest installiert werden, um ein Einbringen und / oder einen Zug der TLB zu ermöglichen. Ein Verbleib ist ein Nachteil aufgrund von möglicher Korrosion und Gasentwicklung an den Komponenten.

Einfachheit / Robustheit: Dieser Punkt wird vornehmlich bestimmt durch die Anzahl von beweglichen Teilen, welche durch Ermüdung oder Verschmutzung Schaden nehmen können. Ein zusätzlicher Aspekt ist die Resistenz gegen Montage/Anwendungsfehler.

Aufwand: Der Punkt Aufwand beschreibt die Zeit, die nötig ist, ein System bereitzustellen und einzusetzen. Auch der Aspekt der möglicherweise umfangreichen Vorbereitung des Einlagerungsbereiches bzw. des Bohrlochs soll hier bewertet werden.

Bohrlochquerschnittsgröße: Die Bohrlochquerschnittsgröße ist möglichst klein zu halten.

Zuverlässigkeit: Die Zuverlässigkeit gibt an, wie verlässlich ein System die ihm zugewiesene Funktion in einem Zeitintervall erfüllen kann.

Reversibilität: Ermöglichung der direkten Umkehrung des Einlagerungsvorgangs. Die eigentliche Rückholung soll durch ein anderes Konzept erfolgen und ist daher nicht Bestandteil der Bewertung.

Interventionsmöglichkeit: Bei Ausfall oder Störfall ist eine weitgehend gefahrlose Intervention durch Personal möglich. Auch eine Bewertung nach Gesichtspunkten des Strahlenschutzes kann hier stattfinden.

Verfügbarkeit der Technik: Es werden erprobte und auf dem Markt verfügbare Komponenten verwendet.

Durch den Paarvergleich wurden folgende Wichtungsfaktoren bestimmt:

Tabelle 15: Wichtungsfaktoren

Bewertungskriterium	Wichtung
Komponentenverbleib	0,14
Einfachheit / Robustheit	0,17
Aufwand	0,04
Bohrlochquerschnittsgröße	0,08
Zuverlässigkeit	0,22
Reversibilität	0,14
Interventionsmöglichkeit	0,20
Verfügbarkeit der Technik	0,02

Aus dem Paarvergleich ergibt sich die Zuverlässigkeit als wichtigstes Bewertungskriterium; als zweitwichtigstes Kriterium die Einfachheit und Robustheit der Konstruktion. Die geringsten Wichtigkeiten wurden den Bewertungskriterien Aufwand und Verfügbarkeit der Technik zugesprochen. Für jede Prinzipiellösung wurden alle Kriterien nach VDI 2225 bewertet und entsprechend den Wichtungsfaktoren gewichtet, sodann zu einem Gesamtnutzwert aggregiert. Die Ergebnisse des Bewertungsverfahrens sind in Abbildung 94 und Tabelle 16 dargestellt.

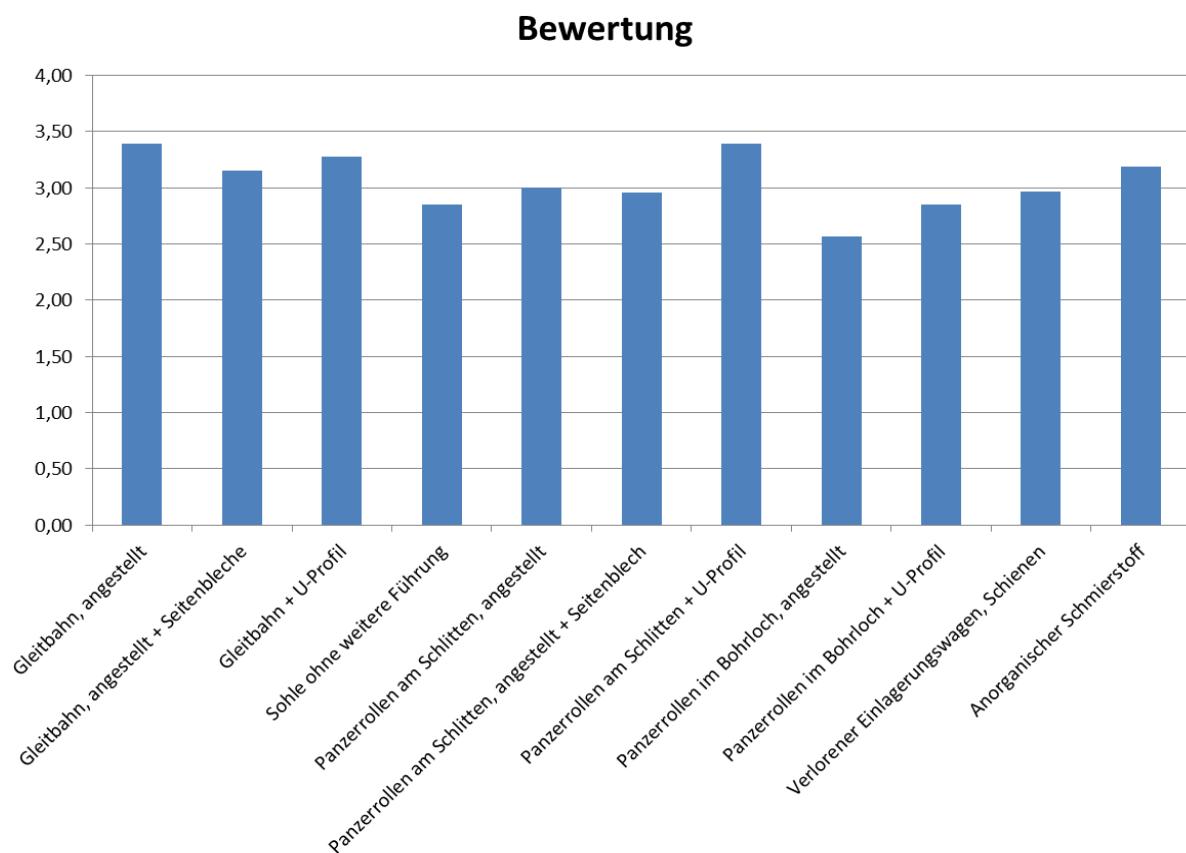
**Abbildung 94: Grafische Darstellung der Gesamtnutzwerte der Prinzipiellösungen**

Tabelle 16: Gesamtnutzwerte der Prinziplösungen

Prinziplösung	Bewertung
Panzerrollen am Schlitten + U-Profil	3,40
Gleitbahn + angestellte Führung	3,39
Gleitbahn + U-Profil	3,28
Anorganischer Schmierstoff	3,19
Gleitbahn + angestellte Führung und Seitenblech	3,16
Panzerrollen am Schlitten + angestellte Führung	3,00
Verlorener Einlagerungswagen auf Schienen	2,97
Panzerrollen am Schlitten + angestellte Führung und Seitenblech	2,96
Sohle ohne weitere Führung	2,86
Panzerrollen im Bohrloch + U-Profil	2,85
Panzerrollen im Bohrloch + angestellte Führung	2,57

Das höchste Bewertungsergebnis mit 3,4 hat der Lösungsvorschlag Panzerrollen am Schlitten geführt in einem U-Profil erhalten. Mit einer Bewertung von 3,39 liegt der Lösungsvorschlag Gleitbahn mit angestellter Führung gleichauf. Dieser entspricht der bestehenden Lösung. Die schlechtesten Bewertungen erhielten die Lösungsvorschläge Panzerrollen im Bohrloch mit U-Profil und Panzerrollen im Bohrloch mit angestellter Führung.

Auffallend an den Bewertungsergebnissen ist das gute Abschneiden der bestehenden Ausführung der STEV. Diese hat das zweitbeste Ergebnis mit nur marginalem Unterschied zum Ersten. Entgegen der nicht systematisch erarbeiteten Änderungsvorschläge, die zu Beginn dieses Vorhabens mit Bezug auf die STEV im Raum standen (Kapitel 6.1.6) besteht nach Ansicht der Bewerter kein genereller Änderungsbedarf an der STEV. Die folgende Änderungskonstruktion der STEV ist daher als Alternativkonzept zur bestehenden Lösung zu verstehen. Es basiert auf dem Lösungsvorschlag „Panzerrollen am Schlitten mit Führung durch U-Profil“.

6.3 Änderungskonstruktion

Die Änderungskonstruktion erfolgt mittels des CAD Programms Autodesk Inventor auf Grundlage der ursprünglichen Konstruktion der STEV. Der grundsätzliche Aufbau der STEV als antriebsloses Schienenfahrzeug mit drehbarem Oberwagen wird beibehalten. Der verlorene Schlitten mit dem Abfallgebinde wird weiterhin in drei Schritten in das Kurzbohrloch eingeschoben. Unter der Annahme der ausreichenden Dimensionierung sind einige Komponenten direkt aus der vorhandenen Konstruktion übernommen worden. Dies betrifft:

- Das Fahrgestell der STEV
- Sämtliche Komponenten des Hydrauliksystems zum Einschub, zur Abstützung und zur Ausrichtung vor dem Bohrloch
- Die Kugeldrehverbindung Fa. Rothe Erde, Typenreihe RD 900, Größe 6 oder 7
- der Drehantrieb aus Motor und Schneckengetriebe
- Puffer und Kupplungen für den Zugbetrieb

Zur Anpassung an die veränderten Fahrwerke mussten die Hälse des Fahrgestells verlängert werden. Der Hauptzylinder wird zudem auf seine Eignung zum Zug der Behälter überprüft. Im Rahmen der Änderungskonstruktion wurden folgende Komponenten signifikant verändert oder neu erstellt:

- Verlorener Schlitten zur Anpassung an die Panzerrollen
- Oberwagen zur Anpassung an die Panzerrollen
- Auswahl geeigneter Panzerrollen
- Fahrwerke zur Reduzierung der Achslasten und zum Anbau von Radbruchstützen nach KTA 3902
- mechanisches System zur Fixierung des Schlittens

6.3.1 Verlorener Schlitten

Änderungen des Schlittens beschränken sich auf die Geometrie. Die ehemals an die Holme angepasste Kontaktfläche zur Selbstzentrierung auf der Gleitbahn wird bei diesem Entwurf nicht mehr benötigt und kann entfallen. Der Schlitten wird stattdessen an seiner Unterseite abgeflacht, um den Anbau der Panzerrollen am Schlitten zu ermöglichen (Abbildung 95).

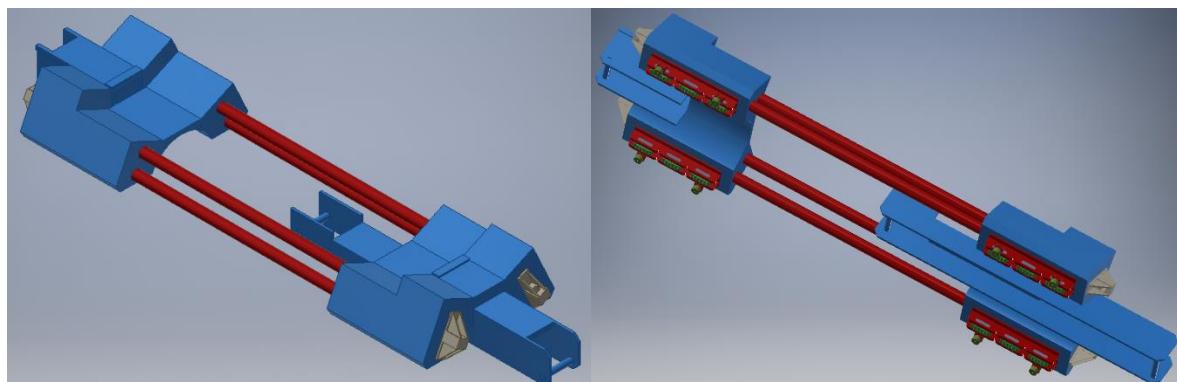


Abbildung 95: Oberseite (links) und Unterseite (rechts) des Schlittens mit den angebauten Panzerrollen

Der Schlitten besteht aus zwei Auflagen für den TLB. Diese sind über Stäbe miteinander verbunden. Die Auflagen sind als massive Schweißkonstruktionen ausgeführt. Unterhalb der Auflagen sind die Aufnahmen für den Eingriff des einschiebenden Hydraulikzylinders angebracht

Der TLB wird auf dem Schlitten aufgelegt. Am oberen und unteren Absatz des Behälters wird dieser durch den Schlitten geometrisch gefangen. Das Gebindemitteiteil mit den Kühlrippen kann Eintauchen, sodass der TLB an den Kühlrippen nicht aufliegt.

6.3.2 Oberwagen

Der Oberwagen der STEV wurde umfangreich neugestaltet, um die Fahrbahn für die Panzerrollen aufzunehmen. Zudem konnte die ursprüngliche selbstzentrierende Ausführung entfallen. Zur Bemessung des Oberwagens wurde von einem statischen System entsprechend Abbildung 96 ausgegangen.

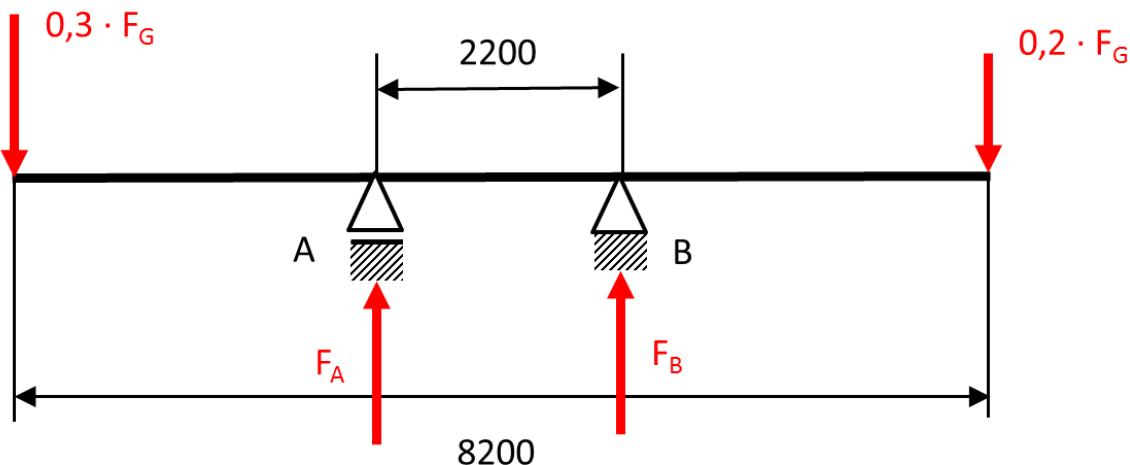


Abbildung 96: **Statisches System des Oberwagens**

Für die Nutzlast wird von der abdeckenden Behältermasse von 160 Mg ausgegangen. Zusätzlich wurden aus Vorsorgegründen abdeckende 40 Mg für den Schlitten angesetzt, sodass zunächst von einer maximalen Nutzlast von 200 Mg ausgegangen wird. Zusätzlich ist davon auszugehen, dass Behälter und Schlitten nicht immer symmetrisch verladen werden können. Daher ist von einer Lastverteilung 60 % zu 40 % auszugehen. Es wird daher für die Bemessung der Träger des Oberwagens von einer maximalen Punktlast am Ende des Trägers von 60 % der Nutzlast ausgegangen. Da der Oberwagen aus zwei Trägern besteht, kann die Last noch einmal halbiert werden, wodurch auf linker Seite insgesamt 30 % der Nutzlast und auf rechter Seite 20 % der Nutzlast einwirken. Zur Vorbemessung wird das statische System entsprechend Abbildung 97 vereinfacht:

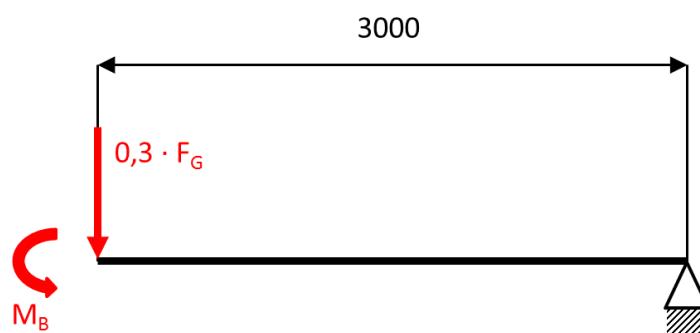


Abbildung 97: **Lastfall Biegung Oberwagen**

Dabei wird die Kugeldrehverbindung als festes Auflager angenommen. Der Träger gilt als einseitig eingespannt mit einer Länge von 3.000 mm. Das wirkende Biegemoment kann nach folgender Gleichung bestimmt werden:

$$M_B = 0,3 \times F_G \times l$$

Dazu ist zunächst der einwirkende Anteil der Gewichtskraft zu bestimmen:

$$0,3 \times F_G = 0,3 \times m \times g = 0,3 \times 200.000 \text{ kg} \times 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 588.600 \text{ N}$$

Damit lässt sich das wirkende Biegemoment errechnen:

$$M_B = 588.600 \text{ N} \times 4,1 \text{ m} = 1.765.800 \text{ Nm}$$

Die Träger des Oberwagens werden aus zwei nebeneinandergelegten Breitflanschträgern IPBv 600 gebildet. Für ein einzelnes Profil IPBv 600 gelten folgende Daten:

Tabelle 17: Technische Daten des IPBv 600 Breitflanschträgers

Breitflanschträger IPBv 600 (Peiner Träger, 2019)		
Höhe	620	mm
Breite	305	mm
Widerstandsmoment W_x	7.660	cm^3
Masse pro Meter	285	kg/m

Da die Schwerachsen der beiden Profile zusammenfallen, kann das Widerstandsmoment der verbundenen Profile durch Verdopplung des Widerstandsmoments bestimmt werden. Für den Träger gilt damit ein Widerstandsmoment W_x von 15.320 cm^3 .

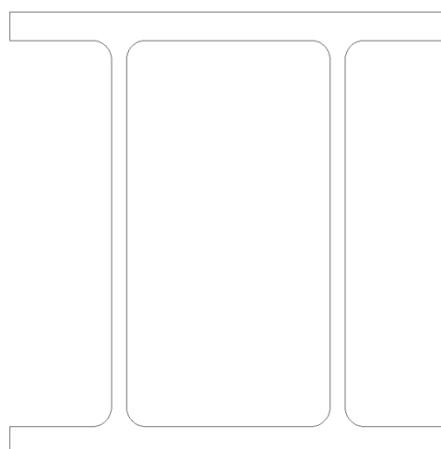


Abbildung 98: Querschnitt der Oberwagenträger

Als Werkstoff wird zunächst der Baustahl S355 gewählt. Für diesen gelten die folgenden Daten (Wittel et al., 2013):

Tabelle 18: Technische Daten des Baustahls S355

Zugfestigkeit	R_m	470	MPa
Streckgrenze	R_e	355	MPa
Elastizitätsmodul	E	210.000	MPa
Zug-Druck-Wechselfestigkeit	σ_{zdW}	205	MPa
Biegewechselfestigkeit	σ_{BW}	255	MPa

Die vorhandene Biegespannung kann nach folgender Gleichung bestimmt werden:

$$\sigma_{vorh} = \frac{M_B}{W_x} = \frac{1.765.800 \text{ Nm}}{15.320 \text{ cm}^3} = 115,3 \text{ MPa}$$

Aus vorhandener Spannung und zulässiger Spannung kann die vorhandene Sicherheit bestimmt werden. Als zulässige Spannung gilt hier die Biegewechselfestigkeit.

$$S = \frac{\sigma_{zul}}{\sigma_{vorh}} = \frac{255 \text{ MPa}}{115,3 \text{ MPa}} = 2,21$$

Mit einer vorhandenen Sicherheit von 2,21 und unter Berücksichtigung der weiteren in der Lastannahme vorhandenen Konservativität sind die Hauptträger des Oberwagens ausreichend bemessen.

Die beiden Hauptträger sind über insgesamt vier Vierkantrohre 180x180x16 verbunden. Zusätzlich liegen die Träger an dem Flansch zur Kugeldrehverbindung auf. Der Bereich des Flansches zur Kugeldrehverbindung ist in Zukunft noch genauer auszugestalten und zu dimensionieren.

Von der ursprünglich geplanten Führung in einem U-Profil wurde bei der Konstruktion abgewichen. Durch die übliche Walzkontur der U-Profile ist die Ausführung der Umlenkrollen aufwendig. Deshalb wurde auf eine einfache Fahrbahn mit seitlichen Umlenkrollen an den Panzerrollen zurückgegriffen (Abbildung 99). Jeweils mittig auf den Hauptträgern ist die Fahrbahn der Panzerrollen befestigt. Diese sollte aus einem entsprechend verschleißfesten Werkstoff ausgeführt werden. Zudem sollte diese mit den Trägern verschraubt werden, um ein einfaches Austauschen bei auftretendem Verschleiß zu ermöglichen.

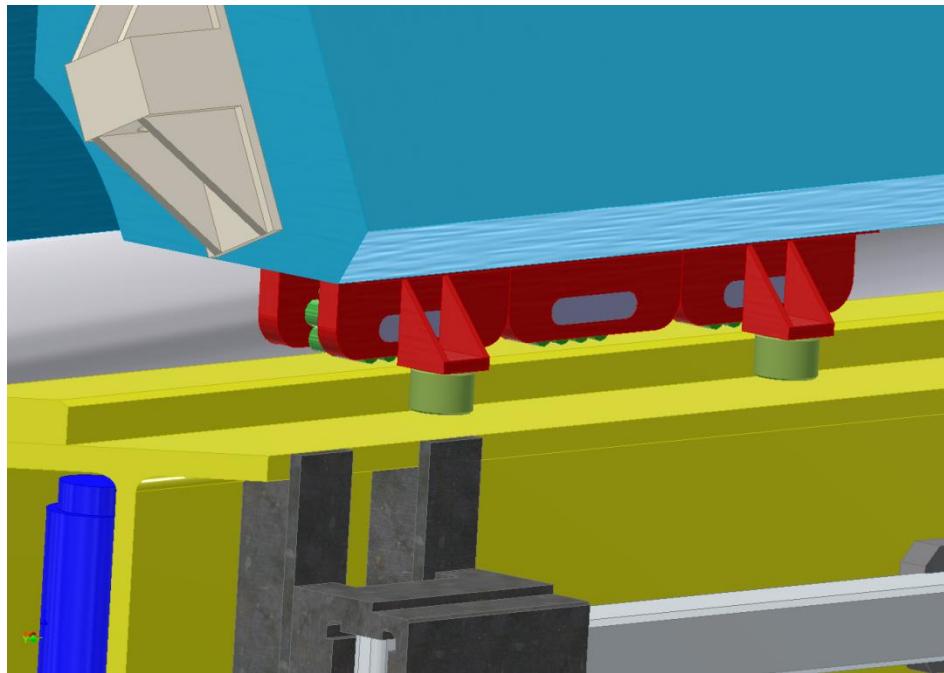


Abbildung 99: Panzerrollen mit Umlenkrollen auf Fahrbahn

Seitlich an den Trägern des Oberwagens (Abbildung 100) sind Konsolen und Führungen zum Anbau der Hydraulikzylinder für die vier Zentrierdorne angebracht. Ungefähr mittig ist die Aufnahme für den Hauptzylinder positioniert. Am hinteren Ende des Oberwagens ist zudem die Aufnahme für den Verstellzylinder des Hauptzylinders vorhanden. An den Trägern selbst ist an jedem Ende das Lochbild zur Aufnahme der Stützzylinder vorhanden. Die Einrichtungen zum Zentrieren und Abstützen der STEV wurden im Rahmen der Arbeiten nicht verändert.

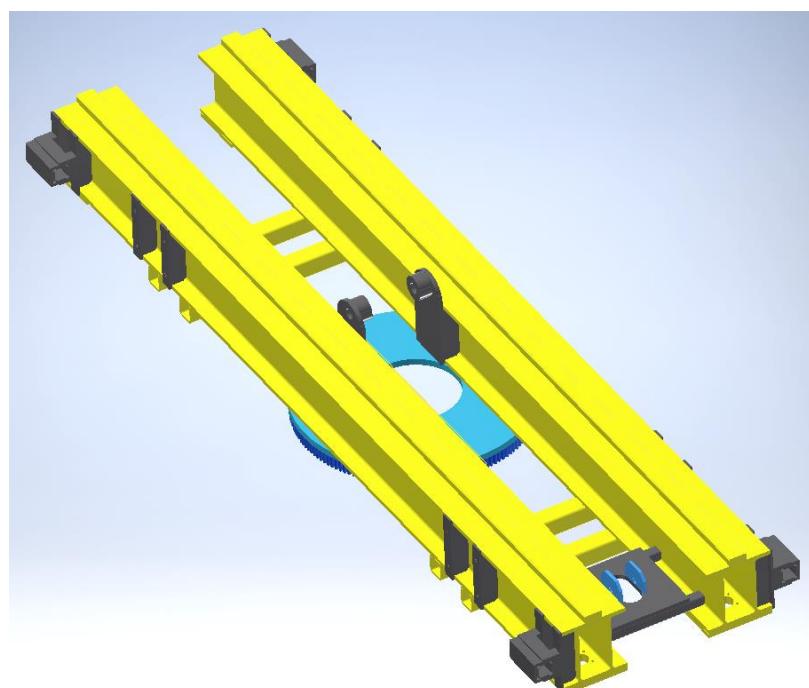


Abbildung 100: Oberwagen der STEV

Der Zusammenbau des Oberwagens erfolgt als Schweißkonstruktion. Dabei haben nach KTA 3902 die Schweißnähte den Anforderungen nach DIN EN ISO 5817 zu genügen. Für dynamisch beanspruchte Schweißnähte sind die Anforderungen der Bewertungsgruppe B maßgeblich, für vorwiegend statisch beanspruchte Schweißnähte gilt Bewertungsgruppe C.

Abweichend zur KTA 3902 erfolgte die Dimensionierung hier zunächst rein statisch und konservativ. Eine Vielzahl der nach KTA 3902 bei der Auslegung zu berücksichtigenden Lasten sind momentan noch unbekannt. Es können noch keine Aussagen zu Montagelasten, Lasten aus Einwirkungen von außen und Lasten aus den Umgebungsbedingungen gemacht werden.

Nach KTA 3902 ist ab einer Spannungsspielzahl von 2×10^4 ein Betriebsfestigkeitsnachweis zu führen. Bei der Einlagerung von max. 1.900 TLB mit der STEV wird der Oberwagen diese Spannungsspielzahl nicht erreichen. Daher kann auf einen Betriebsfestigkeitsnachweis für den Oberwagen verzichtet werden.

6.3.3 Panzerrollen

Statt der Gleitbahn werden in diesem Entwurf sogenannte Panzerrollen zum Verschieben des TLB verwendet. Diese haben einen sehr geringen Rollwiderstand und ermöglichen daher das Verschieben des Abfallgebindes mit geringer Schubkraft. Die Panzerrollen werden am Schlitten befestigt und auf einer geeigneten Fahrbahn sowohl auf den Längsträgern der STEV als auch im Bohrloch verfahren. Für die Kombination aus Schlitten und TLB wird weiterhin von einer abdeckenden Nutzlast von 200 t ausgegangen.

Die Panzerrollen werden aus dem Lieferprogramm der Firma Börkey ausgewählt. Verwendet wurde das Modell C in der Größe IV, dieses verfügt pro Panzerrolle über eine Tragfähigkeit von max. 600 kN. An jeder Ecke des Schlittens werden drei Panzerrollen positioniert, zwei davon werden jeweils mit seitlichen Umlenkrollen ausgestattet. Durch die Verwendung von insgesamt zwölf Panzerrollen ergibt sich eine theoretische Traglast von 7.200 kN, sodass auch bei ungleicher Lastverteilung auf die vier Ecken des Schlittens keine Überlastung einzelner Panzerrollen zu erwarten ist. Durch die hohe Anzahl an Panzerrollen wird eine saubere Führung des Schlittens beim Einschub gewährleistet.

6.3.4 Fahrwerke

Zur Verringerung der Radlasten sind die Fahrwerke der STEV zu überarbeiten. Daher wird die Anzahl der Achsen von zwei auf vier Achsen pro Fahrwerk erhöht (Abbildung 101). Dabei wird der Grundaufbau vom Plateauwagen aus Filbert et al. (2010) übernommen. Damit ist auch die Anforderung der KTA 3902 nach Radbruchstützen erfüllt.

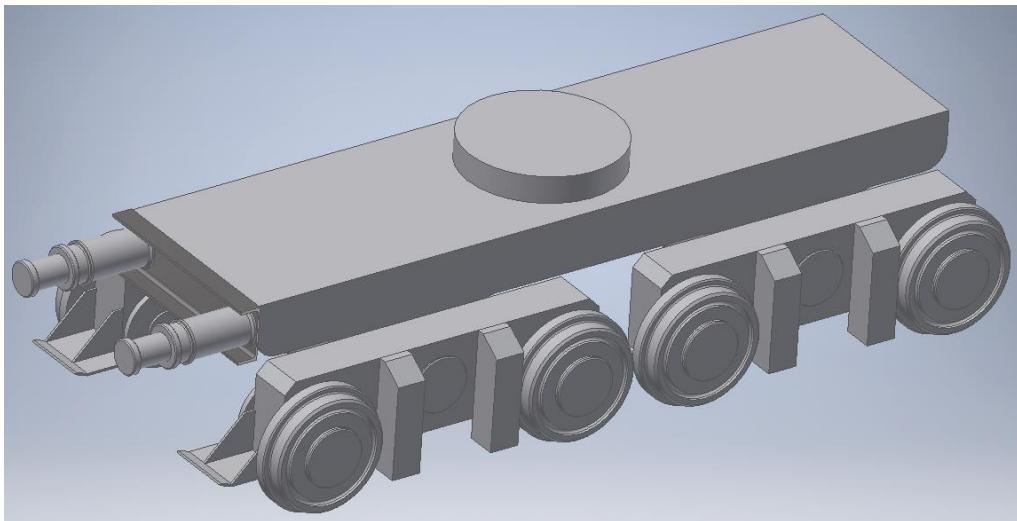


Abbildung 101: 8-rädriges Fahrwerk der STEV

Die Fahrwerke für den Plateauwagen sind mit sogenannten Ausgleichswippen ausgestattet. Die Ausgleichswippen sorgen für eine gleichmäßige Auslastung der Laufräder durch Ausgleich von Unebenheiten in Schienenlängsrichtung. Die Ausgleichswippen sind aus Blechen zusammengesetzte, geschweißte Kastenträger mit Aussteifungen und Rippen. Stirnseitig sind die Kastenträger mit Kopfplatten verschlossen. Im Wippenkasten sind die Achsen für die Laufräder pendelrollengelagert befestigt. Die Ausgleichswippe wird über eine Gleitlagerung mit dem Drehschemelkasten verbunden. Dafür ist mittig im Kastenträger ein Rohrstück eingeschrumpft, das mit Gleitlagerbuchsen bestückt wird. Unmittelbar neben jedem Laufrad sind an den Wippen Radbruchsicherungen angeschweißt (Abbildung 102), um eine Kippgefahr der STEV bei einem unterstellten Radbruch auszuschließen. An einer der Kopfplatten der Ausgleichswippe wird eine Konsole für die Lagerung der Bremszangen angesetzt. An der Stirnseite des Drehschemelkastens ist die Pufferbohle mit den Hydraulikpuffern befestigt.

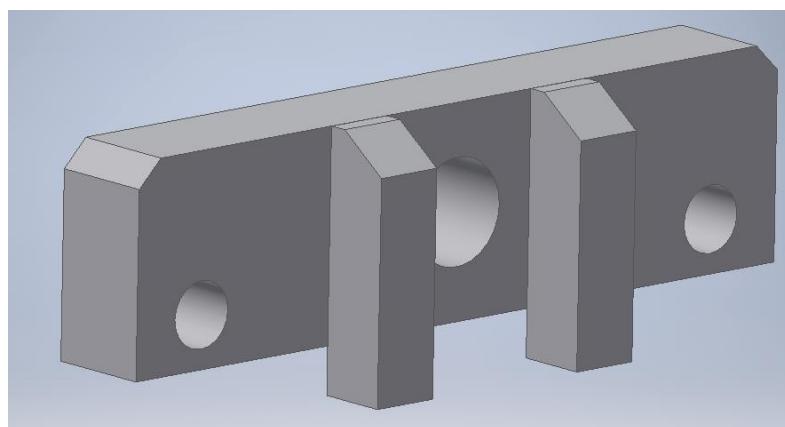


Abbildung 102: Ausgleichswippe mit Radbruchstüzen

Die Ausgleichswippen sind in den Drehschemelkästen gelagert. Die Drehschemelkästen sind eine aus Blechen, Aussteifungen und Rippen zusammengesetzte Schweißkonstruktion. An jeder Seite angesetzt und in die Schweißkonstruktion integriert sind die Achsstümpfe als Lagerpunkte der Ausgleichswippen. Die Verbindung der Drehschemelkästen zum Oberwagen

erfolgt über Gleitdrehverbindungen. Die vordere Gleitdrehverbindung ist als Festlager ausgeführt, hier kann der Drehschemelkasten nur Drehbewegungen ausführen, Pendelbewegungen werden nicht zugelassen. Daher sind am vorderen Drehschemel alle Ausgleichswippen beweglich gelagert. Am hinteren Drehschemel wird die Gleitdrehverbindung als Kugelpfanne ausgeführt. Diese bildet das Loslager des Oberwagens und lässt neben Drehbewegungen auch Pendelbewegungen zu. Deshalb wird am hinteren Drehschemelkasten eine der Ausgleichswippen fest verschweißt, um eine statische Überbestimmtheit des Drehschemelkastens zu vermeiden. Die restlichen drei Ausgleichswippen sind pendelnd gelagert. Durch den gewählten Gesamtaufbau mit einem axialen Festdrehlager, einem axialen Losdrehlager und den Ausgleichswippen sind sowohl Kurvenfahrten und Weichenüberfahrten mit geringen Radien sowie der Ausgleich von Unebenheiten im Gleissystem möglich. Es tragen somit immer alle 16 Laufräder der STEV. Der minimale mit der STEV durchfahrbare Radius ist noch zu ermitteln. Zu beachten ist das Ausschwenken der STEV bei durchfahren kleiner Radien. Daher ist in Kurven- und Weichenbereichen das Lichtraumprofil bzw. der Streckenausbruch eventuell zu vergrößern. Auf Grund der geringen Fahrgeschwindigkeit von 5 km/h wird auf eine Federung der Laufwerke zunächst verzichtet. Zwischen Oberwagen und Laufwerken wird eine Luftfederung verbaut. Diese fängt auftretende Stöße ab.

Auf Grund der erhöhten Radlasten sind die Komponenten der Fahrwerke neu auszulegen. Die Berechnung der Laufräder erfolgt nach DIN 15070. Dazu ist zunächst die Radlast bei gleichmäßiger Auslastung der Laufräder zu bestimmen. Die Gesamtmasse der STEV von ca. 250 Mg wird dabei auf insgesamt 16 Räder verteilt. Die Radlast R kann wie folgt bestimmt werden:

$$R = \frac{m_{ges} \times g}{16} = \frac{250.000 \text{ kg} \times 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}}{16} = 153,3 \text{ kN}$$

Die für die Bestimmung des Raddurchmessers notwendigen Faktoren wurden aus Filbert et al. (2014) übernommen.

Tabelle 19: Technische Daten zur Fahrwerksauslegung

Zugfestigkeit Schiene	590 N/mm ²
Zulässige Pressung zwischen Schiene und Rad p_{zul}	5,6 N/mm ²
Nutzbare Schienenkopfbreite b	48,3 mm
Drehzahl-Beiwert c_2	0,96
Betriebsdauer-Beiwert c_3	1,25

Damit kann mit folgender Formel der erforderliche Raddurchmesser bestimmt werden:

$$d_{erf} = \frac{R}{c_2 \times c_3 \times p_{zul} \times b}$$

$$d_{erf} = \frac{153.300 \text{ N}}{0,96 \times 1,25 \times 5,6 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \times 48,3 \text{ mm}} = 471,38 \text{ mm}$$

Gewählt wird der Raddurchmesser d mit 500 mm. Der Raddurchmesser kann daher unverändert vom Plateauwagen für den Transferbehälter aus Filbert et al. (2010) übernommen werden. Als nächstes ist der erforderliche Durchmesser der Radsatzwelle zu bestimmen. Diese wird mit einem Hebelarm von 100 mm mit der Radlast R belastet. Dadurch ergibt sich ein Biegemoment M_b von:

$$M_b = 153.300 \text{ N} \times 0,1 \text{ m} = 15.300 \text{ Nm}$$

Mit der Biegewechselfestigkeit für S355 ergibt sich ein notwendiger Wellendurchmesser von:

$$d_{erf} = \sqrt[3]{\frac{32 \times 1.530.000 \text{ Nmm}}{\pi \times 255 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}}} = 39,4 \text{ mm}$$

Um den Sicherheitsfaktor zu erhöhen und da die Radsatzwelle zur Durchführung der Bremswelle als Hohlwelle ausgeführt wird, wird zunächst der Wellendurchmesser D mit 125 mm gewählt. Darin wird eine Bohrung mit 50 mm Durchmesser d zur Durchführung der Bremswelle vorgesehen. Damit hat die Radsatzwelle ein Widerstandsmoment von:

$$W = \frac{\pi}{32} \times \frac{D^4 - d^4}{D} = \frac{\pi}{32} \times \frac{(125 \text{ mm})^4 - (50 \text{ mm})^4}{125 \text{ mm}} = 186.838,9 \text{ mm}^3$$

Eine vorhandene Biegespannung von:

$$\sigma_{Bvorh} = \frac{M_b}{W} = \frac{15.300 \text{ Nm}}{186.838,9 \text{ mm}^3} = 81,88 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Damit hat die Radsatzwelle eine Sicherheit von:

$$S = \frac{255 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}}{81,88 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}} = 3,11$$

Als nächstes ist der Wellendurchmesser für die Welle zur Verbindung von Ausgleichswippe und Drehschemelkasten zu bestimmen. Diese ist mit der doppelten Radlast belastet. Der Hebelarm des Biegemoments beträgt 300 mm.

$$M_b = 306.600 \text{ N} \times 0,3 \text{ m} = 91.980 \text{ Nm}$$

Der erforderliche Wellendurchmesser beträgt:

$$d_{erf} = \sqrt[3]{\frac{32 \times 91.980.000 \text{ Nmm}}{\pi \times 380 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}}} = 135 \text{ mm}$$

Um die Sicherheit zu erhöhen, wird auch hier zunächst für den Entwurf ein höherer Wellendurchmesser gewählt. Dieser beträgt 250 mm. Damit hat die Wippenkastenwelle eine Sicherheit von:

$$S = \frac{380 \frac{N}{mm^2}}{60 \frac{N}{mm^2}} = 6,33$$

Abschließend ist noch der Wippenkasten selbst zu berechnen. Dieser wird vereinfacht als Hohlkasten mit rechteckigem Querschnitt angenommen. Dieser hat eine Höhe H von 400 mm, eine Breite B von 200 mm und eine Wandstärke t von 15 mm. Der Wippenkasten wird gleichzeitig auf Biegung und Torsion belastet. Als Widerstandsmoment gegen Biegung ergibt sich aus den Abmessungen:

$$W = \frac{B \times H^3 - b \times h^3}{6 \times H} = \frac{200 \text{ mm} \times (400 \text{ mm})^3 - 170 \text{ mm} \times (370 \text{ mm})^3}{6 \times 400 \text{ mm}} = 1.745.412,5 \text{ mm}^3$$

Das Biegemoment ergibt sich aus der Radlast R und dem halben Achsabstand als Hebelarm.

$$M_b = 153.300 \text{ N} \times 0,6 \text{ m} = 91.980 \text{ Nm}$$

Damit ergibt sich eine Biegespannung von:

$$\sigma_b = \frac{M_b}{W} = \frac{91.980.000 \text{ Nmm}}{1.745.412,5 \text{ mm}^3} = 52,7 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Der Wippenkasten wird zusätzlich noch auf Torsion beansprucht. Dazu ist zunächst das Widerstandsmoment gegen Torsion zu bestimmen. Dieses wird für dünnwandige Querschnitte über die von der Profilmittellinie eingeschlossene Fläche bestimmt.

$$W_T = 2 \times b \times h \times t = 2 \times 385 \text{ mm} \times 185 \text{ mm} \times 15 \text{ mm} = 2.136.750 \text{ mm}^3$$

Das Torsionsmoment ergibt sich aus der Radkraft und einem Hebelarm von 200 mm.

$$M_T = 153.300 \text{ N} \times 0,2 \text{ m} = 30.660 \text{ Nm}$$

Damit ergibt sich eine Torsionsspannung τ_t :

$$\tau_t = \frac{M_t}{W_t} = \frac{30.660 \text{ Nm}}{2.136.750 \text{ mm}^3} = 14,35 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Nach der Gestaltänderungsenergiehypothese kann die Vergleichsspannung bestimmt werden.

$$\sigma_v = \sqrt{\sigma_B^2 + 3 \times \tau_t^2} = \sqrt{\left(52,7 \frac{N}{mm^2}\right)^2 + 3 \times \left(14,35 \frac{N}{mm^2}\right)^2} = 58,3 \frac{N}{mm^2}$$

Die Vergleichsspannung beträgt $58,3 \text{ N/mm}^2$. Der Wippenkasten hat damit eine Sicherheit von:

$$S = \frac{380 \frac{N}{mm^2}}{58,3 \frac{N}{mm^2}} = 6,5$$

Die hohen Sicherheiten für alle Komponenten des Fahrwerks zeigen eine ausreichende Dimensionierung. Im Rahmen einer späteren Ausführungsplanung sollten die Abmessungen optimiert werden, um eine Gewichtsreduktion für die STEV zu erreichen. Der Drehschemelkasten und die Gleitdrehverbindung wurden noch nicht ausgelegt. Dies ist im Rahmen einer Ausführungsplanung zu erledigen.

6.3.5 Mechanische Fixierung des Schlittens

Die zum Verschub des Schlittens verwendeten Panzerrollen zeichnen sich durch einen sehr geringen Rollwiderstand und geringe Losbrechmomente aus. Daher sind auch bei hohen Massen nur sehr geringe Kräfte notwendig um den Schlitten in Bewegung zu versetzen. Selbst bei der sehr geringen Fahrgeschwindigkeit von nur 5 km/h ist deshalb bei abrupten Bremsmanövern mit einem Verrutschen der Ladung zu rechnen. Deshalb ist der Schlitten mechanisch zu fixieren. Zur Fixierung des Schlittens werden die gleichen Anschlagpunkte wie für den Einschub verwendet. Zur Fixierung greift jeweils an Vorder- und Rückseite eine Klaue ein (Abbildung 103). Die Klaue wird dazu über zwei Hydraulikzylinder bewegt und hakt an den Anschlagpunkten des Schlittens ein. Durch die Fixierung an Vorder- und Rückseite ist der Schlitten ausreichend gegen Verrutschen gesichert.

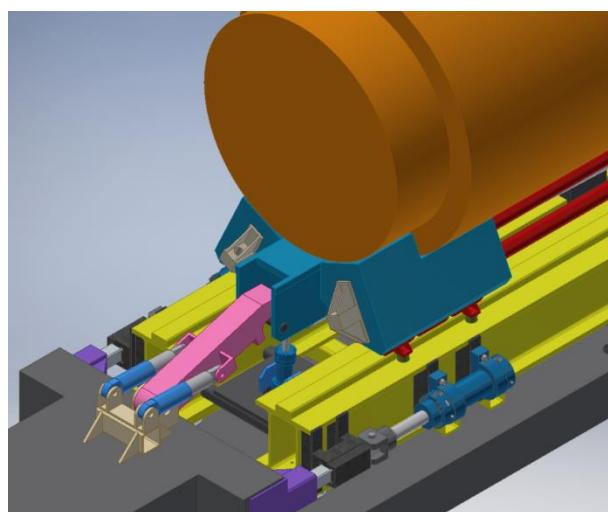


Abbildung 103: Ansicht der Fixierung des Schlittens

6.3.6 Überprüfung des Hauptzylinders auf Eignung auf Zug

Neben dem Einschub der Transport- und Lagerbehälter in das Kurzbohrloch soll die STEV auch für das Herausziehen der Behälter beim Abbruch eines Einlagerungsvorgangs geeignet sein. Daher ist der Hauptzylinder auch auf eine bestimmte Zuglast auszulegen. Hier wird wieder von der konservativen Annahme der maximalen Last von 200 Mg ausgegangen. Beim Hersteller der Panzerrollen wird ein Rollwiderstand von 5 % für größere Lasten angegeben. Die benötigte Schub- bzw. Zugkraft beträgt demnach:

$$F = m \times g \times 0,05 = 200.000 \text{ kg} \times 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \times 0,05 = 98.100 \text{ N}$$

Als Hauptzylinder wurde ein Hydraulikzylinder Typ LW 320 der Fa. Hunger Hydraulik (Lohr am Main) ausgewählt (Hunger Hydraulik, 2019). Dieser hat einen Kolbendurchmesser von 320 mm und einen Kolbenstangendurchmesser von 220 mm. Für die STEV wäre ein Hub von 6.000 mm notwendig. Die STEV selbst wird mit einem Druck von 200 bar und HFC Hydraulikflüssigkeit betrieben. Bei einem angenommenen Wirkungsgrad von 85 % ist mit dem Hydraulikzylinder eine Schubkraft von 1.367 kN und eine Zugkraft von 721 kN erreichbar. Die für das Bewegen des Schlittens notwendigen Kräfte sind daher in Schub- wie Zugrichtung ausreichend vorhanden. Sollte es beim Einschubvorgang zu notwendigen Krafterhöhungen kommen, zum Beispiel beim Übergang von STEV zu Bohrloch, können auch diese überwunden werden. Auf Grund des großen Hubes von 6.000 mm ist der Hydraulikzylinder auch gegen Knicken der Kolbenstange zu bemessen. Für den Hydraulikzylinder ergibt sich für den ersten Knickfall eine Knicklast von 1.655 kN. Damit wäre auch bei Ausnutzung der maximalen Schubkraft eine ausreichende Sicherheit gegen Knicken des Zylinders gegeben.

6.3.7 Optimierung zur Verringerung der Spaltbreite am Übergang von Vorrichtung zu Bohrloch

Am Übergang der Fahrbahn von STEV zu Bohrloch ergibt sich zwangsläufig ein zu überwindender Spalt (Abbildung 104). Um ein problemloses Drehen der Vorrichtung zu gewährleisten, sind Spaltbreiten in der Größenordnung von 20 cm und mehr möglich. Ein Verfahren des beladenen Schlittens über diese Spaltbreiten ist nach Aussage des Herstellers der Panzerrollen nicht mehr möglich. Daher ist eine weitere Optimierung des Entwurfs notwendig, um die Spaltbreite zu verringern.

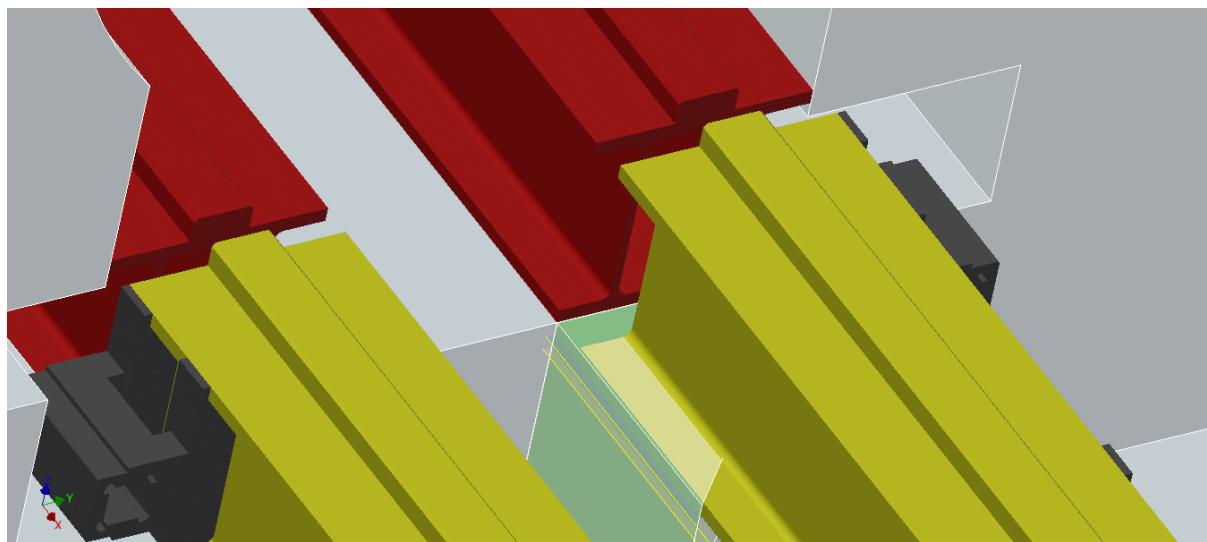


Abbildung 104: Entstehender Spalt bei rechtwinkligem Abschluss der Fahrbahnen

Um dieses Ziel zu erreichen, wird der Stoß von Vorrichtung und Fahrbahn im Bohrloch angepasst. Dieser wird mit einem Winkel von 45° schräg ausgeführt (Abbildung 105). Dadurch lässt sich die Spaltbreite signifikant verringern und die Fahrbahnen der STEV können an den Fahrbahnen des Bohrlochs anliegen. Um ein problemloses Drehen der Vorrichtung zu ermöglichen, muss bei linksseitigem Drehen des STEV Oberwagens der führende linke Hauptträger der STEV gekürzt werden. Hier ist die Fahrbahn des Bohrlochs entsprechend aus dem Bohrloch herauszuziehen (Abbildung 106).

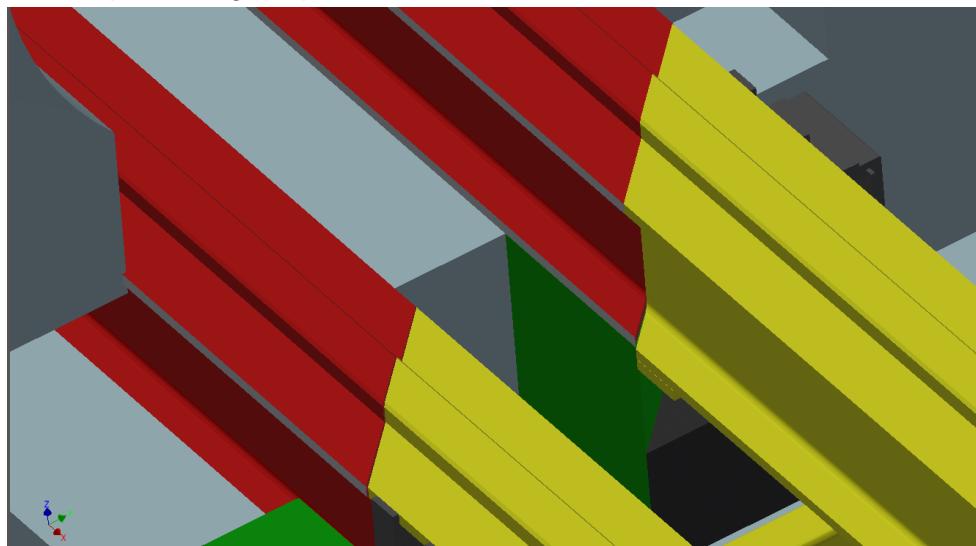


Abbildung 105: Verlängerung der Bohrlochfahrbahn und Anschluss an die STEV Fahrbahn im Winkel von 45°

Durch das Verkürzen ergeben sich weitere notwendige Änderungen an der STEV und am Einlagerungsort. Der neben der linken Fahrbahn des verlorenen Schlittens liegende Anschlagpunkt für die Zentrierung vor dem Bohrloch muss vor das Bohrloch versetzt werden. Auf der STEV selbst erfolgt die Zentrierung während der Fahrt nur durch drei statt vier Zentrierungen. Zusätzlich wirkt die vorhandene Selbsthemmung des Schneckengetriebes des Drehantriebs. Rechtsseitig am Oberwagen reicht der vorhandene Bauraum durch die Abschrägung des Trägers für den Zentrierzylinder und den zugehörigen Dorn in der benötigten Länge nicht mehr

aus. Daher wird die rechtsseitige Zentrierung nur noch zur Zentrierung vor dem Bohrloch genutzt (Abbildung 107). Eine Verlängerung der Aufnahmen an der STEV ist nicht möglich, da dadurch die Drehung des Oberwagens behindert würde.

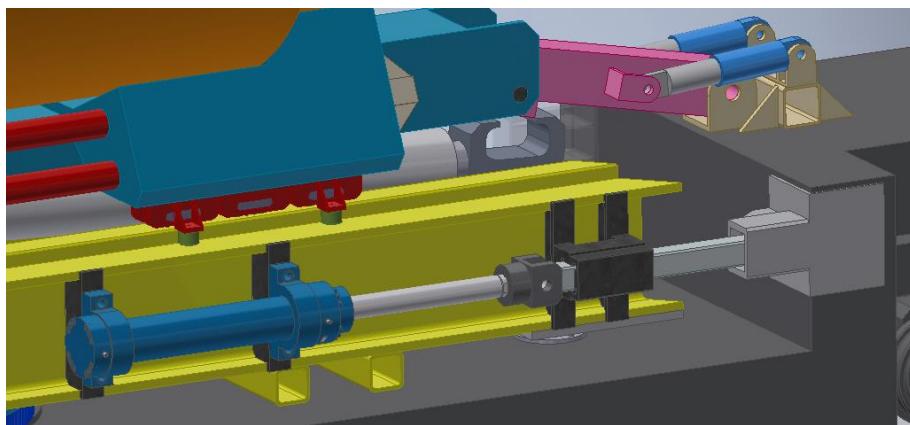


Abbildung 106: Zentrierung am Oberwagen im Eingriff beim Transport

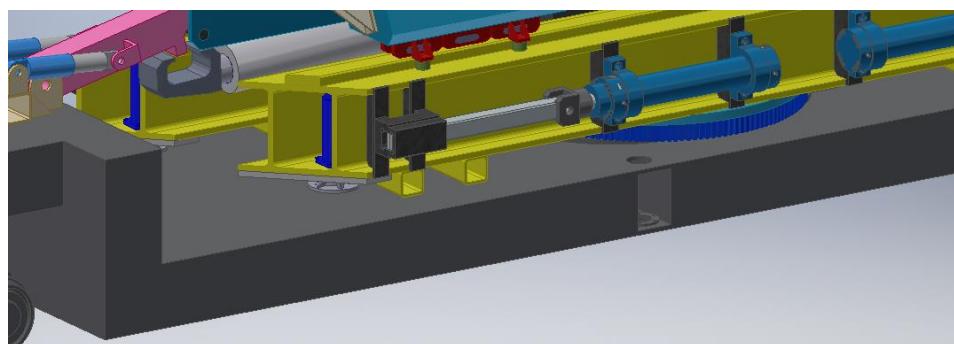


Abbildung 107: Zentrierung an der verkürzten Fahrbahn greift im Transport nicht ein

Durch die Veränderungen an der STEV ergeben sich auch Veränderungen am Einlagerungsablauf. Ursprünglich vorgesehen war es, zur Beschickung der gegenüberliegenden Bohrungen den Oberwagen der STEV um jeweils 90° in die jeweilige Richtung zu drehen. Dies ist auf Grund des nun winkligen Abschlusses nicht mehr möglich, da das andere Ende des Oberwagens sonst mit den Bohrlocheinbauten kollidieren würde. Der Einlagerungsablauf muss daher wie folgt ablaufen: Die STEV erreicht beladen den Einlagerungsort, der Oberwagen wird um 90° gedreht und durch die Zentrierung fluchtend mit dem Bohrloch ausgerichtet. Anschließend wird der Einschubvorgang durchgeführt. Nach Abschluss des Einschubvorgangs wird die STEV zurück in die Fahrtstellung gedreht und durch die Lokomotiven zurück zum Schacht transportiert. Das Bohrloch kann nun versetzt werden, um das Bohrloch zu verschließen und die Strahlenbelastung auf das Personal zu verringern. Anschließend kann damit begonnen werden, die Verlängerungen der Bohrlochfahrbahn und die Ansatzpunkte für die Verriegelung zu demontieren und gespiegelt am gegenüberliegenden Bohrloch zu montieren. Die erneut beladene STEV erreicht nun den Einlagerungsort. Der Oberwagen wird nun um 270° gedreht und die STEV durch die Anschläge fluchtend mit dem Bohrloch ausgerichtet. Alternativ kann die STEV auch rückwärts zum zweiten Bohrloch gefahren werden, sodass wiederum nur eine Drehung von 90° nötig ist. Der Einlagerungsvorgang für das zweite Bohrloch kann dann durchgeführt werden. Abbildung 108 zeigt die vollständige Änderungskonstruktion der STEV mit verlorenem Schlitten und aufgeladenem TLB.

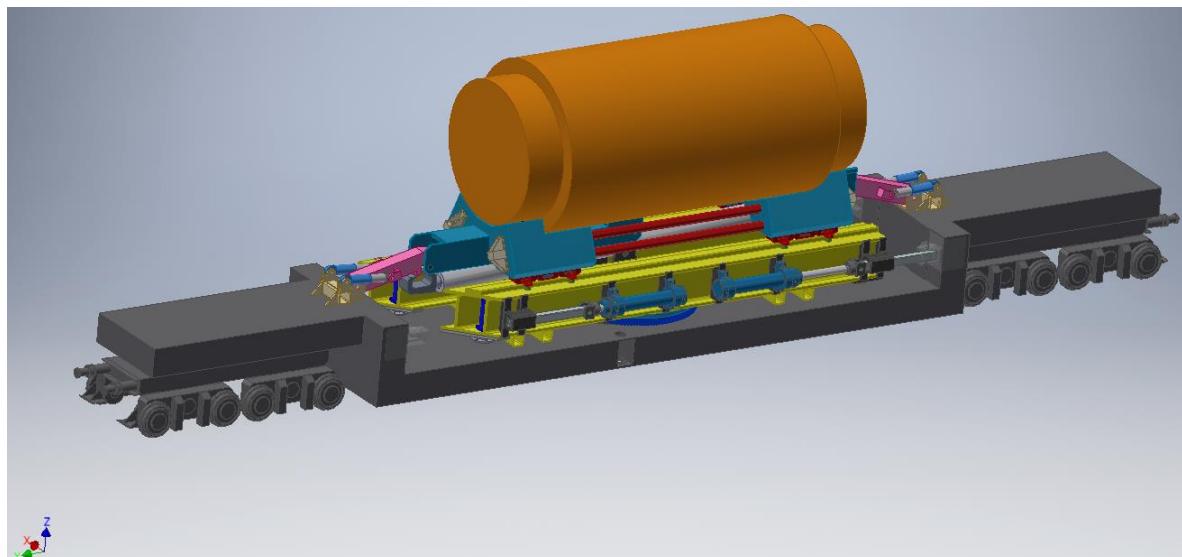


Abbildung 108: Abschließender Entwurf der veränderten Einlagerungsvorrichtung Streckentransport- und

7 Risikobeurteilung

Hersteller von Maschinen werden durch die Richtlinie 2006/42/EG des europäischen Parlaments und des Rates vom 17. Mai 2006 über Maschinen (Maschinenrichtlinie) EU-weit dazu verpflichtet, vor dem Inverkehrbringen ihrer Maschinen eine Risikobeurteilung durchzuführen. In Deutschland wird diese Richtlinie durch die 9. Verordnung zum Geräte- und Produktsicherheitsgesetz umgesetzt. Ziel der Risikobeurteilung ist der Arbeits- und Gesundheitsschutz im Zusammenhang mit dem gesamten Lebenszyklus der jeweiligen Maschine, von der Fertigung und Montage bis zur Entsorgung. Zu diesem Zweck hat die Risikobeurteilung konstruktionsbegleitend zu erfolgen, um Risiken frühzeitig aufzudecken und noch in der Konstruktionsphase eingreifen zu können. Mit der CE-Kennzeichnung erklärt der Hersteller, dass das Produkt den geltenden Anforderungen genügt, die in den Harmonisierungsrechtsvorschriften der EU über ihre Anbringung festgelegt sind. Strikte Vorgaben zur Durchführung der Risikobeurteilung gibt es jedoch nicht, sodass Hersteller grundsätzlich frei sind in der Wahl ihrer Methoden.

Technische Entwicklungen im Rahmen angewandter Grundlagenforschung, wie sie in diesem Bericht vorgestellt werden, können als ein frühes Stadium der Maschinenentwicklung im Herstellungsprozess angesehen werden. Eine vollumfängliche Risikobeurteilung ist zu diesem Zeitpunkt weder möglich noch sinnvoll. Insbesondere von Interesse sind jedoch erste Betrachtungen zur Betriebssicherheit der entwickelten Transport- und Einlagerungstechnik, da diese im Kontext der Endlagerung auch radiologische Relevanz haben kann. Die bislang entwickelte Technik für die verschiedenen Einlagerungsvarianten wurde dementsprechend ebenfalls durch Betriebssicherheitsanalysen begleitet. Deren Ergebnisse wurden in diesem Vorhaben ausgewertet, so dass Weiterentwicklungsbedarfe abgeleitet werden konnten. Bei den Arbeiten in diesem Vorhaben wurde die Maschinenentwicklung ebenfalls durch Betriebssicherheitsanalysen begleitet. Bei der Methode fiel die Wahl auf die sogenannte HARMONY (**Hazard Rating for Machinery and Process Industry**) Methode der Fa. Leuze electronic GmbH + Co. KG (Owen). Dieses Verfahren bietet die Möglichkeit, verschiedene Aspekte eines Risikos einzeln zu bewerten und zu einer Gesamtbewertung zusammenzuführen. Dadurch besteht ein hohes Maß an Nachvollziehbarkeit der vergebenen einzelnen Beurteilungen, was die Auswertung der Analyse sowie das Ableiten von Maßnahmen erleichtert.

Der HARMONY Methode liegen 5 Kriterien zugrunde:

1. S(everty): Schadensausmaß
2. E(xposition): Häufigkeit und Dauer Gefährdungsexposition
3. O(ccurrence): Die Wahrscheinlichkeit des Auftretens der Gefährdung
4. A(voidance): Die Möglichkeit, der Gefährdung auszuweichen oder deren Wirkung zu begrenzen
5. N(umber): Die Anzahl der betroffenen Personen

Für alle Kriterien findet eine Bewertung statt, für die die HARMONY Methode einen Zahlenwert vergibt. Das Produkt der Werte aller 5 Kriterien ergibt schließlich den Risikograd (Abbildung 109).

S: Schadensschwere

Beschreibung	Bewertung
Tod	20
Verlust von 2 Gliedmaßen, Augen (irreversibel)	15
Verlust von 1 Gliedmaß, Auge (irreversibel)	11
Schwerer Bruch oder schwere Krankheit (reversibel)	8
Leichter Bruch oder leichte Krankheit (reversibel)	2
(Schnitt-)wunde, leichte Verletzung (Durchgangs-Arzt)	0,5
Schramme / Druckstelle / Prellung / Bluterguss (Erste Hilfe)	0,1
Normalerweise keine Schädigung nach geeigneten Maßnahmen	0,01

O: Wahrscheinlichkeit

Beschreibung	Bewertung
Sicher – kein Zweifel (> 99 %)	15
Sehr wahrscheinlich – ist zu erwarten (90 % ... 99 %)	10
Wahrscheinlich – nicht überraschend (70 % ... 90 %)	8
Vielleicht – kann passieren (30 % ... 70 %)	5
Möglich – jedoch ungewöhnlich (10 % ... 30 %)	2
Unwahrscheinlich – kann jedoch eintreten (2 % ... 10 %)	1,5
Sehr unwahrscheinlich – obwohl vorstellbar (0,1 % ... 2 %)	1
Normalerweise unmöglich nach geeigneten Maßnahmen	0,01

E: Exposition

Beschreibung	Bewertung	Grenzen bei
Permanent	20	–
Stündlich	0,5 / 5 / 8 / 12	2 Sek. / 3 / 15 Min.
Täglich	0,1 / 1,5 / 5 / 8	2 Sek. / 10 / 40 Min.
Wöchentlich	0,05 / 0,8 / 2,0 / 4,0	2 Sek. / 1 / 4 Std.
Monatlich	0,03 / 0,3 / 1,0 / 1,5	2 Sek. / 2 / 8 Std.
Jährlich	0,02 / 0,1 / 0,3 / 0,5	2 Sek. / 1 / 3 Tage
Normalerweise kein Aussetzen einer Gefährdung nach geeigneten Maßnahmen	0,01	

A: Ausweichmöglichkeit

Beschreibung	Bewertung
Vermeiden unmöglich	5
Vermeiden möglich	3
Vermeiden wahrscheinlich, leicht möglich	1
Normalerweise keine Schädigung bei Kenntnis der Gefährdung und Handeln nach Anweisung oder Belehrung (organisatorisch)	0,1

N: Anzahl

Beschreibung	Bewertung
50+ Personen	12
16–50 Personen	8
8–15 Personen	4
3–7 Personen	2
1–2 Personen	1
keine Person	0

Ergebnis R = E x A x S x O x N

Risikograd	Bewertung
0–11	vernachlässigbar (remote)
11–60	gering (small)
60–400	erhöht (increased)
400–1.000	hoch (high)
>1.000	extrem (extreme)
>30.000	katastrophal (catastrophic)

Abbildung 109: Übersicht der HARMONY Methode (Leuze electronic GmbH + Co. KG)

Der Risikobeurteilung liegen zwei wesentliche Schwächen zugrunde, mit denen unterschiedlich umgegangen wird. Zunächst kann eine Risikobeurteilung nie nachweisen, dass alle Risiken vollständig betrachtet wurden. Aus diesem Grund ist die konstruktionsbegleitende Beurteilung von Sicherheit wesentlich. Durch die Verzahnung von Risikobeurteilung und Konstruktion kann ein hohes Maß an Vertrauen in die Vollständigkeit der Beurteilung erreicht werden. Dies stellt vor allem auch eine Verpflichtung von Entwicklungsarbeit jenseits dieses Vorhabens dar, die eine Ausführung, Fertigung und Montage von Transport- und Einlagerungstechnik anstrebt. Eine Risikobeurteilung auf dem vorliegenden Konstruktionstiefgang kann nicht abschließend sein. Die zweite Schwäche liegt in der Subjektivität der Einschätzung von einzelnen Risiken. Selbst in der Diskussion in interdisziplinären Kleingruppen hat sich ergeben, dass einzelne Bewertungen immer wieder im Detail hinterfragt und angepasst werden können. Für die Sicherheitsaussage insgesamt hatten diese Veränderungen jedoch keine Bedeutung. Im Vorhaben TREND wurde die jeweilige Risikobeurteilung deshalb jeweils von einer einzelnen kompetenten Person durchgeführt. Das Ergebnis wurde dann in zweierlei Hinsicht geprüft:

1. Übereinstimmung mit dem Beurteilungsergebnis eines Risikos als „vernachlässigbar“ oder „gering“, ohne einzelne Parameterbewertungen im Detail nachzuvollziehen
2. Prüfung der Bewertung von erhöhten bis katastrophalen Risiken, der vorgeschlagenen Maßnahmen und der darauffolgenden Neubewertung des Risikograds

In Anhang 1 wird der Stand der Betriebssicherheitsanalysen zu Vorhabensende tabellarisch aufgeführt. Angeführte Maßnahmen zur weiteren Minimierung von Risiken stellen Vorschläge für den Fall dar, dass das jeweilige Maschinenkonzept über dieses Vorhaben hinaus weiterentwickelt werden soll. Betriebssicherheitsrisiken, die eines der Maschinenkonzepte grundsätzlich in Frage stellen, waren zum Abschluss des Vorhabens nicht mehr erkennbar. Es wurde grundsätzlich angenommen, dass Personal geeignete persönliche Schutzausrüstung bei jeglichen Arbeiten trägt (mindestens Schutzbrille, Schutzhandschuhe, Sicherheitsschuhe, bei Lärm Gehörschutz).

Gerade bei der Direktenendlagerung für Transport- und Lagerbehälter, aber auch beim neu entwickelten Portal für Streckenlagerung, erhält der Brandfall die höchste Risikoeinschätzung aufgrund der vorhandenen Brandlasten in Form von (schwer entflammbaren) 1.500 l Hydrauliköl (im Fall der STEV) oder von 1.688 kg Reifengummi und einer Batterie (im Fall des Portal). Eine verkehrsrechtliche Auslegung, die den Anforderungen der International Atomic Energy Agency (IAEA) in IAEA (2018) entspricht, verlangt, dass Abfallbehälter der vollflächigen Einwirkung einer Flammtemperatur von mindestens 800 °C über 30 min widerstehen können. Aufgrund der Anordnung der Behälter auf der Transport- und Einlagerungstechnik sind eine vollflächige Einwirkung und dauerhafter, direkter Kontakt zu einer Flamme nicht zu erwarten. In Heyn & Foit (1986) wurde eine Temperaturverlaufskurve für einen Fahrzeugbrand unter Tage experimentell ermittelt. Hier wurden nach einer kurzen Brandentstehungsphase 850 °C über 20 min erreicht, bis der Brand anfing abzuklingen. Die Brandlast bestand insgesamt aus 600 l Diesel, 500 l mineralischem Hydrauliköl und 1.000 kg brennbarem Reifenmaterial. Der Brandversuch wurde in einer sonderbewetterten Strecke durchgeführt.

Der Brand des Portals zur Einlagerung in Strecken oder der STEV innerhalb einer sonderbewetterten Strecke (z. B. der Einlagerungsstrecke der Streckenlagerung) könnte einen Brandfall vergleichbarer Größenordnung darstellen. Damit wäre die zulässige Temperatur nach IAEA (2018) leicht übertroffen. Die maximale Temperaturentwicklung des Brands lässt sich jedoch durch technische Maßnahmen beeinflussen, z. B. durch den Wetterstrom der Sonderbewetterung und Brandbekämpfungsmaßnahmen (z. B. ein automatisches Feuerlöschsystem). Zusammen mit Maßnahmen zur Vermeidung der Brandentstehung, wie die Wahl einer AGM Batterie, kann das Brandrisiko so angemessen beherrscht werden.

Durchgängig bewetterte Strecken, wie in den Transportstrecken oder am Einlagerungsort der STEV der Fall, führen die Wärme des Brands aufgrund der hohen Frischwetterzufuhr schneller ab und reduzieren somit die thermische Einwirkung auf das Abfallgebinde. Es ist deshalb davon auszugehen, dass die verwendeten Brandlasten ein vernachlässigbares Risiko für die Intaktheit der Abfallgebinde in diesem Szenario und ein akzeptierbares Risiko für die Grubensicherheit darstellen, vergleichbar mit einem Befahrungsfahrzeug.

8 Zugfahrzeug

Die Transport- und Einlagerungstechnik für die Endlagerung von hochradioaktiven Abfällen zeichnet sich bislang dadurch aus, dass sie auf Gleisen bewegt wird. Mit Ausnahme der neu entwickelten Einlagerungsvorrichtung für die Streckenlagerung verfügen weder Transportwagen noch die Einlagerungsvorrichtungen selbst über einen eigenen Antrieb. Stattdessen werden sie von einer elektrisch betriebenen Lokomotive gezogen. Auch mit dem neuen Maschinenkonzept bei Streckenlagerung ist der Aktionsradius der Einlagerungsvorrichtung auf die Einlagerungsstrecken und wenige Meter im Querschlag beschränkt.

Die bislang den Konzepten zu Grunde gelegte Lokomotive wurde im Zuge von Engelmann et. al (1995) gebaut, in den übertägigen Demonstrationsversuchen verwendet und ebenfalls in Filbert et al. (2010) eingesetzt. Rund 25 Jahre nach Abschluss der letzten Demonstrationsversuche besteht auch bei der Lokomotive Bedarf zur Anpassung an den heute geltenden Stand der Technik. Dies ist schon allein deswegen notwendig, um Verfügbarkeit von elektronischer Steuerungs- und Batterietechnik zu gewährleisten. Da es im Gegensatz zur Entwicklung und Herstellung von Transport- und Einlagerungstechnik Anbieter von Lokomotiven für den Einsatz unter Tage oder im Tunnelbau gibt, erfolgt die Anpassung an den heute geltenden Stand der Technik über eine Marktrecherche.

Als Beispiel des Nachweises der Verfügbarkeit von geeigneten Lokomotiven bietet sich die Produktions- und Servicelokomotive SMT-M-100-BDE der Fa. Schalke (Gelsenkirchen) an (Schalke, 2016). Die Lokomotive ist in der Lage, eine vollständige Schicht im Batteriebetrieb zu fahren. Sie ist ausgelegt für den vollautomatischen und fahrerlosen Betrieb.



Abbildung 110: Darstellung der Produktionslokomotive SMT-M-100-BDE der Firma Schalke (Schalke, 2016)

In Tabelle 20 werden die technischen Daten der Schalke-Lokomotive und der Lokomotive aus Engelmann et al. (1995) verglichen. Aufgrund des modularen Aufbaus der Schalke-Lokomotive wird die gesamte mögliche Bandbreite der technischen Daten angegeben.

Tabelle 20: Gegenüberstellung der technischen Daten aus Schalke (2016) und der Lokomotive aus Engelmann et al. (1995)

	MMT-M-270-BDE	Engelmann et al. (1995)
Länge	5.830 - 6.850 mm	9.710 mm
Breite	1.150 - 1.600 mm	1.800
Höhe	1.600 - 2.060 mm	1.790
Gewicht	10 - 25 t	22 t
Spurweite	600 - 1.435 mm	1.435 mm (Normalspur)
Leistung	35 - 100 kW	34 kW
Min. Kurvenradius	17 m	16 m
Anfahrzugkraft	20 - 49 kN	22 kN
Max. Geschwindigkeit	15 km/h	10 km/h
Max. Anhängelast	150 t	n.a.
Antrieb	Batterie, Diesel oder Oberleitung	Batterie

Der Vergleich zeigt, dass die Produktionslokomotive in ihrer Leistungsfähigkeit der Lokomotive aus Engelmann et al. (1995) überlegen ist, ohne relevante Nachteile aufzuweisen. Sie ist selbst an der Obergrenze der angegebenen Bandbreiten technischer Daten kürzer und schmäler, dabei nur geringfügig höher und schwerer. Entsprechend dieser technischen Daten, die als Nachweis der Verfügbarkeit einer passenden Batterielokomotive angesehen werden können, werden in Tabelle 21 technische Daten einer zeitgemäßen Referenzlokomotive als Zugfahrzeug für alle Einlagerungsvarianten definiert. Zu beachten ist weiterhin, dass für den Transport der STEV zur Einlagerung von TLB weiterhin zwei Lokomotiven zum Einsatz kommen müssen. Im Fall der vertikalen Bohrlochlagerung ist die Spurweite zum Überfahren des Bohrlochkellers auf 1.990 mm anzupassen. Laut Hersteller ist diese Maßnahme möglich, ohne signifikante Änderungen an den anderen technischen Daten der Lokomotive vorzunehmen.

Tabelle 21: Technische Daten der Referenzlokomotive

Länge	6.850 mm
Breite	1.600 mm
Höhe	2.060 mm
Gewicht	25 t
Spurweite	1.435 mm / 1.990 mm (mit Bohrlochkeller)
Leistung	100 kW
Min. Kurvenradius	17 m
Anfahrzugkraft	49 kN
Max. Anhängelast	150 t
Max. Geschwindigkeit	15 km/h
Antrieb	Batterie

9 Zusammenfassung und Ausblick

Im FuE Vorhaben TREND wurde das Ziel verfolgt, die vier bislang in Deutschland entwickelten Varianten der Transport- und Einlagerungstechnik für Abfallgebinde mit hochradioaktiven Abfällen auf einen aktuellen und vergleichbaren Stand zu bringen. Dieses Ziel wurde mit Hilfe der Bearbeitung von mehreren Teilzielen erreicht.

Das erste Teilziel bestand darin, die wesentlichen Anforderungen an die Transport- und Einlagerungstechnik systematisch zu erfassen und zu dokumentieren. Dafür wurde zunächst eine Funktionsanalyse der jeweiligen Transport- und Einlagerungstechnik erarbeitet. Weitere Anforderungen ergaben sich aus den technischen Daten der angenommenen Abfallgebinde, der bergbaulichen Umgebung und vor allem der Betriebs-, aber auch der Langzeitsicherheit. Grundlegend neue Erkenntnisse wurden bei der Bearbeitung dieses Teilziels nicht gewonnen, aber es wurden erstmalig Anforderungskataloge erstellt, die die Anforderungen für alle bisher betrachteten Varianten der Transport- und Einlagerungstechnik übersichtlich dokumentieren. Diese konnten dann als Referenz für die Weiterentwicklung genutzt werden.

Das zweite Teilziel war die Überprüfung der vorliegenden Dokumentationen der Transport- und Einlagerungstechnik zur Ableitung von Bedarf zur Weiterentwicklung. Diese Überprüfung basierte im Wesentlichen auf drei Säulen:

1. Weiterentwicklungsbedarf aus der Forschung, z. B. aus Sicht der Langzeitsicherheit oder der Betriebssicherheit
2. Weiterentwicklungsbedarf zur Einhaltung von Anforderungen, z. B. KTA, EndlSiAnfV o. ä.
3. Verbesserungspotential aufgrund des aktuellen Standes der Technik

Im Folgenden wird für jede der drei Säulen ein Beispiel aus der Bearbeitung des Vorhabens TREND erläutert.

Weiterentwicklungsbedarf aus der Forschung

Im Vorhaben KOSINA (FKZ 02 E 11405A; Abschlussbericht: Bollingerfehr et al., 2018) wurde ein Konzept zur Einlagerung von Abfallgebinden in horizontale Bohrlöcher erarbeitet. Parallel wurde eine Betriebssicherheitsanalyse durchgeführt. Diese stellte wesentliche sicherheits-technische Schwachstellen beim Einlagerungsvorgang fest. Schadensfälle an der technischen Lösung für den mechanischen Einschub von Brennstabkokillen mussten technisch ausgeschlossen werden, da ansonsten eine Intervention durch Personal im Sperrbereich im Inneren der Bohrlochverrohrung notwendig gewesen wäre. Diese Schwachstelle wurde im Vorhaben TREND aufgegriffen. Es gelang, durch Umstellung des Einschubsystems auf eine pneumatische Kraftübertragung die genannten potentiellen Schadensfälle vollständig auszuschließen und damit die Betriebssicherheit des Konzepts deutlich zu erhöhen.

Weiterentwicklungsbedarf zur Einhaltung von Anforderungen

Zum Greifen der Brennstabkokille zur Einlagerung in vertikale Bohrlöcher kommt ein Greifer mit Greifarmen zum Einsatz. In der bisherigen Ausführung waren drei Greifarme vorgesehen.

Bei Bruch eines Greifarms besteht in dieser Variante die Gefahr eines Absturzes der Brennstabkokille im Bohrloch. Gerade mit Blick auf die Anforderung der Rückholbarkeit ist dieser Fall unbedingt zu vermeiden. Aus diesem Grund wurde die Greiferkonstruktion grundsätzlich überarbeitet und ein Greifer mit zusätzlichen seitlichen Führungen konstruiert.

Verbesserungspotential aufgrund des Stands der Technik

Die Technik zur Streckenlagerung von abgeschirmten Abfallgebinden vom Typ POLLUX® wurde in den 1990er Jahren entwickelt. Zu diesem Zeitpunkt war industrielle Erfahrung mit mobilen Portalkränen kaum verbreitet und stand als Grundlage der Entwicklung deshalb nicht zur Verfügung. Heute sind mobile Portalkräne verschiedener Größen Stand der Technik und es gibt vielfältige Erfahrungen mit Konstruktion, Bau und Betrieb dieser Kräne. Diese Erfahrungen wurden in TREND genutzt, um z. B. den Greifmechanismus für die Abfallgebinde zu vereinfachen und damit auch robuster zu gestalten. Darüber hinaus lassen sich zukünftige Anpassungen an Maße von Behältern und Tragzapfenabständen leicht umsetzen.

Das dritte Teilziel bestand in der konstruktiven Umsetzung des Weiterentwicklungsbedarfs. Zunächst wurden dafür verschiedene orientierende Auslegungsrechnungen durchgeführt und anhand dieser konstruktive Detailfragen geklärt. Schließlich wurden die Konstruktion mit der Software Autodesk Inventor erstellt. Ausreichende Sicherheitsfaktoren und gezielte Finite Elemente Analysen zeigen die grundsätzliche Stabilität der tragenden Bauteile. Parallel zur Konstruktion wurde eine Risikobeurteilung durchgeführt, in der die Betriebssicherheit der Technik bewertet wurde. Dadurch entstanden Verbesserungsvorschläge, die zur Optimierung der Sicherheit in die Konstruktion einflossen. Als Beispiel für eine solche sicherheitsgerichtete Anpassung lässt sich für die Einlagerungstechnik für Transport- und Lagerbehälter die Optimierung zur Verringerung der Spaltbreite in der Fahrbahn des verlorenen Schlittens zwischen Einlagerungsvorrichtung und Bohrloch nennen. Diese reduziert das Risiko des Verkantens während des Einschubvorgangs. Zum Abschluss des Vorhabens TREND wurde der Einlagerungsvorgang der verschiedenen Varianten zur Einlagerung mit den neuen konstruierten Vorrichtungen animiert. Damit werden die Prozessschritte bei der Einlagerung von Abfallgebinden sichtbar und auch für interessierte Laien gut verständlich.

Ein wesentlicher Aspekt angewandter Grundlagenforschung ist die Erarbeitung und der Vergleich verschiedener denkbarer Lösungsansätze. Zu Beginn des Vorhabens TREND existierten verschiedene Ideen, Konzepte und einzelne Prototypen zur Einlagerung von Abfallgebinden mit hochradioaktiven Abfällen in Deutschland, deren Entwicklung sich auf einen Zeitraum von 1985 bis 2018 erstreckte. Sämtliche dabei betrachteten Varianten wurden im Vorhaben TREND aufgegriffen, geprüft und weiterentwickelt bzw. verworfen und neu entwickelt. Damit stehen nun technische Entwürfe für Transport und Einlagerung von Abfallgebinden mit hochradioaktiven Abfällen in Steinsalz, Tongestein und Kristallingestein auf einem zueinander vergleichbaren und aktuellen Entwicklungsstand zur Verfügung. Die technische Machbarkeit und der sichere Betrieb sind für alle Varianten zu erwarten.

Dem Vorhabenträger zur Endlagerung von radioaktiven Abfällen in Deutschland, der Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH, werden damit Wahlmöglichkeiten für Einlagerungsvarianten und -techniken an die Hand gegeben. Auf dieser Grundlage können die nächsten Schritte wie Ausführungsplanung, der Bau von Prototypen sowie die Erarbeitung und Durchführung

von Versuchsprogrammen zum Nachweis der technischen Machbarkeit, der Sicherheit und der Genehmigungsfähigkeit begonnen werden.

Die Einlagerungsvorgänge wurden mit Hilfe der in diesem Vorhaben entwickelten CAD Modelle animiert. Die entsprechenden Videos stehen auf der Website der BGE TECHNOLOGY GmbH zur Ansicht in der Mediathek zur Verfügung:

[Animation der Streckenlagerung](#)



[Animation der vertikalen Bohrlochlagerung mit Bohrlochkeller](#)



[Animation der vertikalen Bohrlochlagerung ohne Bohrlochkeller](#)



[Animation der horizontalen Bohrlochlagerung](#)



[Animation der direkten Endlagerung von TLB](#)



10 Weiterer FuE-Bedarf

Bei der Bearbeitung des Vorhabens TREND sind an mehreren Stellen offene Fragen entstanden, die innerhalb des Vorhabens nicht geklärt werden konnten. Aus maschinenbaulicher Sicht bestehen weiterhin Detailfragen zur Handhabung von Behältertypen, die gewisse Besonderheiten mit sich bringen. Da bislang keine genehmigungsfähigen Abfallbehälter existieren, sondern vorhandene Konzepte als ausreichende Approximation zu diesen angenommen wurden, wurde die Handhabung solcher Behälter nicht untersucht. Darunter fallen:

- Brennstabkokillen bzw. Triple Packs, die mit weniger als 3 CSD beladen sind und dadurch kürzer sind
- Brennstabkokillen ohne Tragpilz, z. B. nach dem Vorbild der SKB (Schweden) mit innen liegender Ringnut
- CASTOR® MTR2 mit zwei Tragzapfen statt vier

Weiter zu untersuchen ist außerdem in der Variante Streckenlagerung die Umsetzbarkeit des Einbaus von Bentonitsockeln in den Einlagerungsstrecken durch die Einlagerungstechnik selbst. Zu prüfen wäre außerdem, ob es möglich ist, die Tragzapfen der Abfallbehälter mittels Röhrebschweißen oder einer alternativen Methode so zu befestigen, dass sie so auch für die Rückholung zuverlässig nutzbar sind. Der Einsatz von Sensorik an der Einlagerungstechnik, z.B. zum automatisierten Verfahren oder zur Zustandsüberprüfung, ist im Zusammenhang mit dem Auftreten radioaktiver Strahlung im Umfeld der Abfallgebinde zu untersuchen.

Die weiteren F&E-Themen, die sich ergeben haben, beziehen sich auf die vertikale Bohrlochlagerung und den Umgang mit der Vermeidung des Bohrlochkellers bzw. dessen Integration in die Sohlauffüllung einer Strecke mit rundem Querschnitt. Die einzelnen Themen sind in der folgenden Liste nach Wirtsgestein gegliedert:

Kristallingestein:

- Eine geeignete Abgrenzung zwischen Sohlverfüllung und Bohrloch ist zu entwickeln.
- Entwicklung eines Verfahrens zur Herstellung des kegelstumpfförmigen Hohlraums für das Hartgesteinswiderlager.
- Entwicklung eines Gemisches zur Sohlauffüllung mit dem Ziel, dieses auch in der Nachverschlussphase als Versatz verwenden zu können. Dabei ist zu berücksichtigen, dass in der Betriebsphase quellende Tonminerale die Lagestabilität von Gleisen gefährden können. Eine Alternative könnten Fahrbahnplatten sein, die verhältnismäßig leicht gelegt und nach Einlagerung wieder geraubt werden können.

Tongestein:

- Entwicklung eines Verfahrens zur qualitätsgesicherten Vergütung des Ausbaus im Bereich des Bohrlochs nach Einlagerung, sodass der Ausbauiring der Strecke als Widerlager gegen das quellende Dichtelement dienen kann.
- Entwicklung eines Gemisches zur Sohlauffüllung mit dem Ziel, dieses auch in der Nachverschlussphase als Versatz verwenden zu können. Dabei ist zu berücksichtigen, dass in der Betriebsphase quellende Tonminerale die Lagestabilität von Gleisen gefährden können.

- Das Verfahren vom Bohren des Einlagerungsbohrlochs bis zum endgültigen Verschluss ist im Detail zu beschreiben und auf Machbarkeit hin zu prüfen. Dabei ist insbesondere die erwartete Druckhaftigkeit des Wirtsgesteins zu berücksichtigen.
- Die Möglichkeit des Aufschweißens eines Deckels zum Verschluss des Bohrlochliners ist zu prüfen. Es wird angenommen, dass der verschlossene Liner während der Betriebs- und frühen Nachverschlussphase dazu dient, die Einwirkungen auf die Abfallgebinde zu reduzieren und damit zum Nachweis seiner Handhabbarkeit und Aerosol- Dichtheit beizutragen (Bergbarkeit nach EndlSiAnfV)

11 Literaturverzeichnis

- ANDRA (2014): Implementing Geological Disposal – Technology Platform. Geodisposal, 2014.
- Bertrams, N.; Bollingerfehr, W.; Dörr, S.; Filbert, W.; Simo, E.; Fahland, S.; Hammer, J.; Heussermann, S.; Kühnlenz, T.; Mrugalla, G.; Reinhold, K.; Buhmann, D.; Kindlein, J.; Mönig, J.; Wolf, J.; Minkley, W.; Popp, T. (2015): Konzeptentwicklung für ein generisches Endlager für wärmeentwickelnde Abfälle in flachlagernden Salzschichten in Deutschland sowie Entwicklung und Überprüfung eines Sicherheits- und Nachweiskonzeptes – Zwischenbericht; DBE TECHNOLOGY GmbH, TEC-37-2015-Z, Peine, 2015
- Bertrams, N.; Herold, P.; Herold, M.; Krone, J.; Lommerzheim, A.; Prignitz, S.; & Simo Kuate, E. (2017): Entwicklung eines technischen Konzeptes für ein generisches Endlager für wärmeentwickelnde Abfälle und ausgediente Brennelemente im Kristallingestein in Deutschland. DBE Technology GmbH, TEC-20-2017, Peine, 2017
- Bollingerfehr, W.; Filbert, W.; Lerch, C.; Tholen, M. (2011): Endlagerkonzepte, Bericht zum Arbeitspaket 5, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, GRS-272, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, Köln, 2011
- Bollingerfehr, W.; Filbert, W.; Dörr, S.; Herold, P.; Lerch, C.; Burgwinkel, P.; Charlier, F.; Thomauske, B.; Bracke, G.; Kilger, R. (2012): Endlagerauslegung und - optimierung. Bericht zum Arbeitspaket 6, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, GRS-281, Köln, 2012
- Bollingerfehr, W.; Bertrams, N.; Minkley, W.; Buhmann, D.; Mönig, J.; Eickemeier, R.; Popp, T.; Fahland, S.; Prignitz, S.; Filbert, W.; Reinhold, K.; Hammer, J.; Simo, E.; Kindlein, J.; Thiemeyer, T.; Knauth, M.; Völkner, E.; Liu, W.; Wolf, J. (2018): Concept developments for a generic repository for heat-generating waste in bedded salt formations in Germany, Abschlussbericht, BGE TEC 2018-13, Peine, 2018
- Engelmann, H. J.; Filbert, W.; Heda, M.; Hedemann, W.; Hubert, R.; Neydak, J. (1995): Direkte Endlagerung ausgedienter Brennelemente, Handhabungsversuche zur Streckenlagerung, Abschlussbericht, Hauptband, DEAB T 60, Peine, 1995
- Filbert, W.; Bollingerfehr, W.; Heda, M.; Lerch, C.; Niehues, J.; Pöhler, M.; Schulz, J.; Schwarz, T.; Toussaint, M.; Wehrmann, J. (2010): Optimization of the Direct Disposal concept by Emplacing SF Canisters in Bore-holes, Final Report, DBE TECHNOLOGY GmbH, Peine, 2010
- Filbert, W.; Breustedt, M.; Dörr, S.; Herold, P.; Lerch, C.; Wolf, J.; Ullmann, D.; Kristek, F.; Sindern, W. (2014): Direkte Endlagerung von Transport- und Lagerbehältern bis 160 Mg - DIREKT III, Abschlussbericht, Peine, 2014 – nicht veröffentlicht
- Gieck, K. & Gieck, R. (2019): Technische Formelsammlung, 34. Auflage, Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, 34. Auflage, 2019
- Herold, P.; Prignitz, S.; Simo, E.; Filbert, W.; Bertrams, N. (2018): Entwicklung technischer Konzepte zur Rückholung von Abfallbehältern mit wärmeentwickelnden radioaktiven Abfällen und ausgedienten Brennelementen aus Endlagern in Salz- und Tongesteinsformationen – ERNESTA, Abschlussbericht, BGE TEC 2018-11, BGE TECHNOLOGY GmbH, Peine, 2018

- Herold, P.; Keller, A.; Leonhard, J.; Leon Vargas, P.; Bertrams, N. (2020): Entwicklung technischer Konzepte zur Rückholung von Abfallbehältern mit wärmeentwickelnden radioaktiven Abfällen und ausgedienten Brennelementen aus einem HAW-Endlager in Kristallingestein – KOREKT, Abschlussbericht, BGE TEC 2020-28, BGE TECHNOLOGY GmbH, Peine, 2020
- Heyn, W.; Foit, W. (1986): Die Auswirkungen brennender Gleislosfahrzeuge auf sonderbewehrte Strecken, Glückauf Forschungshefte 47, Nr.3, 1986
- IAEA (2018): Safety Standards, Specific Safety Requirements No. SSR-6 (Rev. 1), Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material, 2018 Edition
- Jobmann, M.; Lommerzheim, A. (2014): Endlagerkonzept sowie Verfüll- und Verschlusskonzept für das Endlagerstandortmodell SÜD. Technischer Bericht, TEC-11-2014-Z, DBE TECHNOLOGY GmbH, Peine, 2014
- Köhler, S.; Garitte, B.; Weber, H.; Müller, H. (2015): EU Project LUCOEX. Emplacement report LUCOEX - WP2. Technical Report. September 2015
- Lommerzheim, A.; Jobmann, M. (2015): Endlagerkonzept sowie Verfüll- und Verschlusskonzept für das Endlagerstandortmodell NORD. Projekt ANSICHT, Technischer Bericht, TEC-14-2015-TB, DBE TECHNOLOGY GmbH, Peine, 2015
- Mayer, H. (2014): Fachpublikation Fügen von Oxidkeramik, Friatecm, Mannheim, 2014
- Mönig, J.; Bertrams, N.; Bollingerfehr, W.; Fahland, S.; Frenzel, B.; Maßmann, J.; Müller-Hoeppen, N.; Reinhold, R.; Rübel, A.; Schubarth-Engelschall, N.; Simo, S.; Thiedau, J.; Weber, J.R.; Wolf, J. (2020): Empfehlungen zur sicherheitsgerichteten Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien des StandAG, Synthesebericht, GRS-567, Braunschweig, 2020.
- NEA (2011): Reversibility and Retrievability (R&R) for the Deep Disposal of High-Level Radioactive Waste and Spent Fuel - Final Report, Nuclear Energy Agency, Paris, 2011
- Pettersson, S.; Lönnerberg, B. (2008): Final Repository for Spend Nuclear Fuel in Granite - the KBS-3V concept in Sweden and Finland, International Conference Underground Disposal Unit Design & Emplacement Processes for a Deep Geological Repository. Prague, 2008.
- Posiva (2020): Pressemitteilung Posiva Oy, Stand 22.04.2020.
- Saari, H.; Nikula, M.; Suikki, M. (2010): Emplacement of small and large buffer blocks. Working Report 2010-29. POSIVA OY: Olkiluoto. Mai 2010.
- Wittel, H.; Muhs, D.; Jannasch, D.; Voßiek, J. (2013): Roloff/Matek Maschinenelemente, Tabellenbuch, 21. Auflage, Springer Vieweg, 2013.
- WTI (2020): Abschirmberechnungen und Massenabschätzungen für verschiedene Varianten des POLLUX®-Behälters, WTI/20/20, Wissenschaftlich-Technische Ingenieurberatung GmbH, Jülich, 2020.

12 Weitere Quellen

12.1 Gesetze und Verordnungen

StandAG: "tandortauswahlgesetz vom 5. Mai 2017 (BGBl. I S. 1074), das zuletzt durch Artikel 1 des Gesetzes vom 7. Dezember 2020 (BGBl. I S. 2760) geändert worden ist

EndlSiAnfV: Endlagersicherheitsanforderungsverordnung vom 6. Oktober 2020 (BGBl. I S. 2094)

Richtlinie 2006/42/EG des europäischen Parlaments und des Rates vom 17. Mai 2006 über Maschinen (Maschinenrichtlinie)

ProdSV: Neunte Verordnung zum Produktsicherheitsgesetz (Maschinenverordnung) vom 12. Mai 1993 (BGBl. I S. 704), die zuletzt durch Artikel 23 des Gesetzes vom 27. Juli 2021 (BGBl. I S. 3146) geändert worden ist

12.2 Normenverzeichnis

DIN 15020-1:1974-02: Hebezeuge; Grundsätze für Seiltriebe, Berechnung und Ausführung

DIN 15070:1977-12: Krane; Berechnungsgrundlagen für Laufräder; zurückgezogen

Din EN 13001-3-3:2015-02: Krane - Konstruktion allgemein - Teil 3-3: Grenzzustände und Sicherheitsnachweis von Laufrad/Schiene-Kontakten

DIN EN ISO 5817:2014-02: Schweißen - Schmelzschweißverbindungen an Stahl, Nickel, Titan und deren Legierungen (ohne Strahlschweißen) - Bewertungsgruppen von Unregelmäßigkeiten

DIN EN ISO 12100:2011-03: Sicherheit von Maschinen - Allgemeine Gestaltungsleitsätze - Risikobeurteilung und Risikominderung

ISO 4308-1:2007-10-17: Cranes and lifting appliances - Selection of wire ropes - Part 1: General

KTA 3902:2020-12: Auslegung von Hebezeugen in Kernkraftwerken

VDI 2225 Blatt 1:1997-11: Konstruktionsmethodik - Technisch-wirtschaftliches Konstruieren - Vereinfachte Kostenermittlung

12.3 Produktkataloge

Blickfeld: Produktbeschreibung LiDAR, Stand 26.01.2021

Blickle: Produktkatalog Kunststoffräder, Stand 01.07.2020

CASAR (a): Produktkatalog Turboplast Förderseile, Stand 29.01.2020

- CASAR (b): Produktkatalog Paraplast Förderseile, Stand 29.01.2020
- Continental (a): Datenblatt Continental FD 1730-40 RI, Stand 18.02.2020
- Continental (b): MH20 STB. 840/500 – 559. Tire size metric 840/500 – 559. Datenblatt 130 024 700 00. Hannover, Stand 20.10.2020
- GNS (Gesellschaft für Nuklear-Service mbH): Produktdarstellungen auf der Unternehmens-website, Stand: 02.2021
- Hunger Hydraulik, Katalog Hydrozylinder-Reihe HHN 812, Stand: November 2019
- Liebherr: Technische Beschreibung Straddle Carrier, Stand 16.10.2020
- Neugart: Produktkatalog Winkelplanetengetriebe, Stand 01.07.2020
- Peiner Träger, Lieferprogramm Europäische Breitflanschträger, Peiner Träger GmbH Stand: August 2019
- Peiner Träger: Formstahl und Breitflanschträgerkatalog, Peiner Träger GmbH, Stand 01.07.2020
- Pfaff Verkehrstechnik GmbH: Faltenbalg Produktbeschreibung, Stand 19.01.2021
- SEVA TEC: Produktkatalog Kegelradgetriebemotoren, Stand 22.04.2020
- Schalke: Katalog „Keep Your Business on Track“, Schalke Lokomotiven, Stand 12.09.2016
- Texas Instruments: URL: Produktbeschreibung RADAR, Stand: 26.01.2021
- Torriani: Produktkatalog Kugeldrehverbindung, Stand 01.07.2020
- Verreet, Roland (2003): Seilendverbindungen, PR GmbH Webagentur & Verlag GmbH, Aachen, 2003
- Winspect: <http://www.winspect.info>, Stand 22.04.2020

13 Anhang 1: Tabellarische Übersicht der Risikobeurteilungen

13.1 Betriebssicherheit beim Konzept der Streckenlagerung

Situation	Gefährdung	S	E	O	A	N	R	Maßnahmen	Änderung der Parameter					R _{neu}
									S	E	O	A	N	
1) Allg. Funktionsstörungen/Defekte														
Ausfall Automatikmodus	Handbedienung, Reparaturarbeiten	0,01	0,3	10	5	2	0,3	keine Maßnahmen nötig						0,3
Bremse löst sich nicht, Fahren aus Gefahrenbereich nicht möglich	Erhöhte Strahlenexposition	0,01	4	1,5	5	1	0,3	keine Maßnahmen nötig						
Ausfall Spindelhubantrieb	Erhöhte Strahlenbelastung	2	0,3	5	3	2	18	Zusatzausschirmungen benutzen	0,5					4,5
Defekt Hubsäule mit Längsnut und Hubspindel	Erhöhte Strahlenbelastung	2	0,3	5	3	2	18	Zusatzausschirmungen benutzen	0,5					4,5
Funkenbildung durch Kurzschluss	Brand/Thermische Gefahren	20	4	5	5	1	2000	Sicherungsschalter, regelmäßige Kontrolle der Verkabelung, Löschsystem mitführen und einsetzen	1	1				80

Situation	Gefährdung	S	E	O	A	N	R	Maßnahmen	Änderung der Parameter					R _{neu}
									S	E	O	A	N	
Brandentstehung an Reifen oder Batterie	Thermische Gefahren	20	0,1	5	3	2	60	AGM Batterie, Automatisches Löschsystem, Auslegung des Behälters gegen Brandfälle		1	1			4
Ausfall der Lenkung	Quetschen, Anfahren, Kollision, Stoßen	20	0,3	5	3	2	180	Keine Personen im Gefahrenbereich			0,1			
Rahmenbruch	Quetschen, erhöhte Strahlenbelastung,	20	0,1	2	3	2	24	Keine Personen im Gefahrenbereich			0,1			6
Schäden an den Akkus / Austritt von Batteriesäure	Verätzungen, Kurzschluss, Brand	11	0,1	5	3	2	33	AGM Batterie, automatisches Löschsystem		1	1			2,2
2) Fahrbewegung														
Ungewolltes Rollen	Personengefährdung durch Überfahren werden, Quetschen, Stoßen	20	1,5	1	1	2	60	regelmäßige Wartung, Betriebsanleitung beachten, stehenden Wagen manuell absichern; keine wesentlichen Neigungen im Endlagerbergwerk		0,01	0,1			0,06

Situation	Gefährdung	S	E	O	A	N	R	Maßnahmen	Änderung der Parameter					R _{neu}
									S	E	O	A	N	
Bremsen ohne Feed-back (Bremsausfall)	Personengefährdung durch Überfahren werden, Quetschen, Stoßen	20	1,5	1,5	3	1	135	regelmäßige Wartung der Bremsen, Personalschulung, Sicherheitsanweisungen beachten, kein Aufenthalt im Gefahrenbereich			1	1		30
3) Handhabung des Abfallgebindes														
Anheben / Absenken des Spindeltriebs / Behälters / Portals	Quetschen	20	5	2	3	1	600	Personen nicht zulässig im Gefahrenbereich		0,01		0,1		0,04
Ungleichmäßiges Heben des Behälters, Gefährdung der Standsicherheit	Quetschen, erhöhte Strahlenexposition,	20	1,5	1	3	1	90	Personen nicht zulässig im Gefahrenbereich		0,01		0,1		0,02
Herabfallen des Abfallgebindes / Brechen der Aufnahmelaschen	erhöhte Strahlenexposition, Quetschen	20	0,5	1	1	1	10	Personen nicht zulässig im Gefahrenbereich, Redundantes Behältersicherungssystem, geringe Fallhöhe, Auslegung der Behälter gegen relevante Fallhöhen		0,01				0,1

Situation	Gefährdung	S	E	O	A	N	R	Maßnahmen	Änderung der Parameter					R _{neu}
									S	E	O	A	N	
Ausfall eines Spindeltriebs / Fressen des Spindeltiebs	erhöhte Strahlenexposition, Quetschen, Stoßen,	11	1	1,5	3	1	49,5	Zusatzausschirmungen benutzen	0,01					0,045
Ausfall der Verstellung der Behälteraufnahmen	erhöhte Strahlenexposition, Quetschen, Stoßen,	11	0,5	1	3	1	16,5	Zusatzausschirmungen benutzen, keine Personen im Gefahrenbereich				0,1		
Ausfall der Motoren des Spindeltriebs	erhöhte Strahlenexposition, Quetschen, Stoßen,	11	0,5	1	3	1	16,5	Zusatzausschirmungen benutzen, keine Personen im Gefahrenbereich				0,1		
Ausfall der Hubsäulen	erhöhte Strahlenexposition, Quetschen, Stoßen,	11	0,5	1	3	1	16,5	Zusatzausschirmungen benutzen, keine Personen im Gefahrenbereich				0,1		
Dichtungsversagen, Austritt von Medien unter Druck	Gefahr für die Augen, Kontakt mit Medien, Heiße / Kalte Medien, Aufwirbeln von Staub / Partikeln, Lärm, Unbeabsichtigte Bewegungen	15 0,5 1 3 1 22,5						Personen nicht zulässig im Gefahrenbereich				0,1 0,75	0,55	0,55

Situation	Gefährdung	S	E	O	A	N	R	Maßnahmen	Änderung der Parameter					R _{neu}
									S	E	O	A	N	
Abreißen von Schläuchen / Leitungen	Austritt von unter Druck stehenden Medien, Schläge/ Stöße, Verletzung der Augen, unbeabsichtigte Bewegungen	15	0,5	1,5	3	1	33,75	Personen nicht zulässig im Gefahrenbereich				0,1		1,125
4) Installations- / Wartungs- und Umrüstvorgänge														
Befüllen von Betriebsflüssigkeiten	Augenkontakt, Hautkontakt, Sturz (falls Einfüllöffnung höher gelegen)	15	2	5	1	1	150	Qualifiziertes Personal; Betriebs-/ Wartungsanleitung beachten						
Geringes Eingreifen in den Betrieb (z. B. Beseitigen von Blockierungen)	Quetschen, Sturz, Verbrennung (heiße Bauteile)	11	1,5	8	1	1	132	Qualifiziertes Personal; Betriebs-/ Wartungsanleitung beachten			2			
Schmieren	Augenkontakt, Hautkontakt, Sturz (falls Einfüllöffnung höher gelegen), Quetschen	15	2	5	1	1	150	Zentrales Schmiersystem evtl. mit Kartusche; Qualifiziertes Personal; Betriebs-/ Wartungsanleitung beachten		0,8	1,5			
Reinigen	Sturz, Quetschen	20	2	5	1	1	200	Qualifiziertes Personal; Betriebs-/ Wartungsanleitung beachten		1,5				60

Situation	Gefährdung	S	E	O	A	N	R	Maßnahmen	Änderung der Parameter					R _{neu}
									S	E	O	A	N	
Austausch von Verschleißteilen	Quetschen, Scheren, Schneiden	15	0,8	8	1	1	96	Qualifiziertes Personal; Betriebs-/ Wartungsanleitung beachten			2	0,1		2,4
Kontakt mit spannungsführenden Teilen	Stromschlag	20	2	2	5	1	400	Qualifiziertes Personal; Betriebs-/ Wartungsanleitung beachten			1,5	1		60
Arbeiten an unter Druck stehenden Komponenten	Ungewollte Bewegungen von Teilen, Kontakt mit heißen oder kalten Medien, Austritt von Medien unter Druck, Augenkontakt, Hautkontakt, Quetschen	20	0,8	8	1	1	128	Qualifiziertes Personal; Betriebs-/ Wartungsanleitung beachten, vor Beginn der Arbeiten drucklos schalten			0,1			12,8
5) Transport, Plateauwagen														
Entgleisen des Plateauwagens	Kollision mit dem Stoß; Reparaturarbeiten, Aufgleisen: Quetschen, Stoßen, Erhöhte Strahlenbelastung	20	1	8	3	2	960	Niedrige Fahrgeschwindigkeit, Regelmäßige Prüfung von Fahrzeugen und Schienen, keine Personen im Gefahrenbereich			1,5	1	1	30

Situation	Gefährdung	S	E	O	A	N	R	Maßnahmen	Änderung der Parameter					R _{neu}
									S	E	O	A	N	
Ausfall der Bremsen	Entgleisen, Kollision mit dem Stoß, Anfahren, Quetschen, Stoß, Erhöhte Strahlenbelastung	20	0,02	5	3	2	12	Keine Personen im Gefahrenbereich, Regelmäßige Überprüfung von Fahrzeugen und Schienen				1,5	0,1	
Rad / Achsbruch	Entgleisen, Kollision mit dem Stoß, Anfahren, Quetschen, Stoß, Erhöhte Strahlenbelastung	20	0,02	5	3	2	12	Regelmäßige Überprüfung von Fahrzeugen und Radsatz, Dauerfeste Auslegung, feste Austauschintervalle				1,5	0,1	
Herunterfallen des Behälters	Quetschen, Stoß, Erhöhte Strahlenbelastung	20	0,02	1,5	3	2	3,6	Auslegung des Behälters gegen Fallhöhen, keine Personen im Gefahrenbereich			0,01	1,5	0,1	
Rahmenbruch	Entgleisen, Kollision mit dem Stoß, Anfahren, Quetschen, Stoß	20	0,02	1,5	3	2	3,6	Keine Personen im Gefahrenbereich, Regelmäßige Überprüfung von Fahrzeugen			0,01	0,1		
Räder schleifen auf Gleisen / Festklemmen der Bremsen	Verletzen durch herausschleudernde Teile, Funkenbildung (Brandgefahr)	20	1,5	5	3	1	450	Enge Prüfintervalle der Räder und Gleise, Schutzbleche um Räder, Einleiten einer Bremsung bis zum Stillstand aufgrund von Warnsystem			1	1		30

13.2 Betriebssicherheit beim Konzept der vertikalen Bohrlochlagerung

Situation	Gefährdung	S	E	O	A	N	R	Maßnahmen	Änderung der Parameter					R _{Neu}
									S	E	O	A	N	
1) Allg. Funktionsstörungen/Defekte														
Ausfall Automatikmodus	Handbedienung, Reparaturarbeiten	0,01	0,3	10	5	2	0,3	keine Maßnahmen nötig						0,3
Bremse löst sich nicht, Fahren aus Gefahrenbereich nicht möglich	Erhöhte Strahlenexposition	0,01	4	1,5	5	1	0,3	keine Maßnahmen nötig						
Ausfall Hubantrieb	Erhöhte Strahlenbelastung	2	0,3	5	3	2	18	Zusatzausschirmungen benutzen						4,5
Defekt Hubsäule	Erhöhte Strahlenbelastung	2	0,3	5	3	2	18	Zusatzausschirmungen benutzen	0,5					4,5
Funkenbildung durch Kurzschluss	Brand/Thermische Gefahren	20	4	5	5	1	2000	Sicherungsschalter, regelmäßige Kontrolle der Verkabelung, Löschsystem mitführen und einsetzen				1	1	80

Situation	Gefährdung	S	E	O	A	N	R	Maßnahmen	Änderung der Parameter					R _{Neu}
									S	E	O	A	N	
Ausfall der Lenkung	Quetschen, Anfahren, Kollision, Stoßen	20	0,3	5	3	2	180	Keine Personen im Gefahrenbereich				0,1		6
Rahmenbruch	Quetschen, erhöhte Strahlenbelastung	20	0,1	2	3	2	24	Keine Personen im Gefahrenbereich				0,1		0,8
2) Fahrbewegung														
Entgleisen des Gespanns Plateauwagen/ ELV; ELV ist auf dem Plateauwagen aufgesattelt, Plateauwagen steht auf Rädern	Kollision, Überfahren werden, Wegeschleudert werden, Quetschen, Stürzen	20	2	1	3	1	120	Bei Fahrbewegung Personen im Nahbereich des Gespanns nicht zulässig (insbesondere in Streckenabschnitten mit erhöhtem Unfallrisiko); nur geringe Geschwindigkeit beim Transport zulässig				0,01	0,1	0,04
Entgleisen und Kippen des Gespanns Plateauwagen/ ELV	Kollision, Überfahren werden, Wegeschleudert werden, Quetschen, Stürzen	20	2	1	3	1	120	Bei Fahrbewegung Personen im Nahbereich des Gespanns nicht zulässig (insbesondere in Streckenabschnitten mit erhöhtem Unfallrisiko); nur geringe Geschwindigkeit beim Transport zulässig				0,01	0,1	0,04

Situation	Gefährdung	S	E	O	A	N	R	Maßnahmen	Änderung der Parameter					R _{Neu}
		S	E	O	A	N	R		S	E	O	A	N	
3) Installation der Einlagerungsvorrichtung über Bohrloch														
Ausfall des Antriebs für eine Hubstütze/ Hubstütze kann nicht weiter bewegt werden	Personaleingriff erforderlich - evtl. Gefährdung durch Strahlungsexposition des Personals	11	0,3	1	3	1	9,9	Regelmäßige Wartung der Hubstützen und Kontrolle auf Defekte; entsprechend den Umgebungsbedingungen Reparaturarbeiten nur mit Schutzeinrichtung				0,1		0,33
Ausfall der Bremse im Motor zum Halten der Hubwerke in Position	Fehler tritt unbemerkt auf. Gefährdung des Personals beim Abbau der ELV. Quetschen, Klemmen	15	8	1,5	5	1	900	Selbsthemmende Motoren vorsehen; regelmäßige Wartung der Motoren durch qualifiziertes Personal			0,01	1		1,2
3a) Arbeitsbewegung / Einlagerungsvorgang: Aufnahme & Positionierung Transferbehälter														
Schwenkrahmen (Gleitlagerbuchse) fällt aus, Reparatur erforderlich, gegebenenfalls Ersatzteiltausch	Gefährdung des Personals bei der Behebung des Fehlers; Quetschen, Klemmen, Schneiden, Stoßen, Sturz	20	0,5	1,5	5	1	75	Qualifiziertes Personal; regelmäßige Wartungen und Überprüfung der Gängigkeit			1	1		10

Situation	Gefährdung	S	E	O	A	N	R	Maßnahmen	Änderung der Parameter					R _{Neu}
									S	E	O	A	N	
Schwenkwerk klemmt, Behebung der Störung	Gefährdung des Personals bei der Behebung des Fehlers; Quetschen, Klemmen, Schneiden, Stoßen, Sturz, geringe Strahlungsexposition	20	0,3	1,5	3	1	27	Qualifiziertes Personal; regelmäßige Wartungen und Überprüfung der Gängigkeit			1	1		6
Schwenkmotor defekt, Reparatur/ Tausch des defekten Teiles	Gefährdung des Personals bei der Behebung des Fehlers; Quetschen, Klemmen, Schneiden, Stoßen, Sturz, geringe Strahlungsexposition	20	0,3	1,5	5	1	45	Qualifiziertes Personal; regelmäßige Wartungen und Überprüfung der Gängigkeit			1	0,1		0,6
Abschirmhaube nicht einsatzfähig	Gefährdung des Personals bei der Behebung des Fehlers; Quetschen, Klemmen, Schneiden, Stoßen, Sturz, Erschlagen werden	20	0,3	1,5	3	2	54	Qualifiziertes Personal; regelmäßige Wartungen und Überprüfung der Gängigkeit			1	0,1		1,2

Situation	Gefährdung	S	E	O	A	N	R	Maßnahmen	Änderung der Parameter					R _{Neu}
									S	E	O	A	N	
3b) Arbeitsbewegung / Einlagerungsvorgang: Einlagern der BSK														
Greifer defekt – Reparatur/ Tausch erforderlich	Gefährdung des Personals bei der Behebung des Fehlers; Quetschen, Klemmen, Schneiden, Stoßen, Sturz, Erschlagen werden	20	1,5	1,5	3	2	270	Qualifiziertes Personal; regelmäßige Wartungen und Überprüfung der Gängigkeit		0,3	1	0,1		1,2
Bohrlochschleuse defekt mit eingelagerten BSK	erhöhte Strahlenexposition bei Reparatur/ Tausch; Absturz	20	0,3	1	5	2	60	Qualifiziertes Personal; regelmäßige Wartungen und Überprüfung der Gängigkeit			1			60
Seiltrommel klemmt/ defekt, Greifer kann nicht aus dem Bohrloch gehoben werden – Reparatur erforderlich	Gefährdung des Personals bei der Behebung des Fehlers; Quetschen, Klemmen, Schneiden, Stoßen, Sturz, geringe Strahlungsexposition	15	1,5	2	5	2	450	Qualifiziertes Personal; regelmäßige Wartungen und Überprüfung der Gängigkeit		0,3	1,5			67,5

Situation	Gefährdung	S	E	O	A	N	R	Maßnahmen	Änderung der Parameter					R _{Neu}
									S	E	O	A	N	
4) Installations-/ Wartungs- und Umrüstvorgänge														
Befüllen von Betriebsflüssigkeiten	Augenkontakt, Hautkontakt, Sturz (falls Einfüllöffnung höher gelegen)	15	2	5	1	1	150	Qualifiziertes Personal; Betriebs-/ Wartungsanleitung beachten			2			60
Anschluss an die Energieversorgung	Stromschlag, Quetschung	20	1,5	5	0,1	1	15	Qualifiziertes Personal; Betriebs-/ Wartungsanleitung beachten			1,5			4,5
Geringes Eingreifen in den Betrieb (z. B. Be-seitigen von Blockierungen)	Quetschen, Sturz, Verbrennung (heiße Bauteile)	11	1,5	8	1	1	132	Qualifiziertes Personal; Betriebs-/ Wartungsanleitung beachten			1,5			24,75
Schmieren	Augenkontakt, Hautkontakt, Sturz (falls Einfüllöffnung höher gelegen), Quetschen	15	2	5	1	1	150	Zentrales Schmiersystem evtl. mit Kartusche; Qualifiziertes Personal; Betriebs-/ Wartungsanleitung beachten	0,8	1				12
Reinigen	Sturz, Quetschen	20	2	5	1	1	200	Qualifiziertes Personal; Betriebs-/ Wartungsanleitung beachten	1,5					60

Situation	Gefährdung	S	E	O	A	N	R	Maßnahmen	Änderung der Parameter					R _{Neu}
									S	E	O	A	N	
Austausch von Verschleißteilen	Quetschen, Scheren, Schneiden	15	0,8	8	1	1	96	Qualifiziertes Personal; Betriebs-/ Wartungsanleitung beachten			2	0,1		2,4
Kontakt mit spannungsführenden Teilen	Stromschlag	20	2	2	5	1	400	Qualifiziertes Personal; Betriebs-/ Wartungsanleitung beachten			1,5	1		60
Reparatur-/Wartungsarbeiten bei aufgebauter ELV über Bohrlochkeller	Absturz des Personals	20	5	8	3	1	2400	Einrichtung zur Abdeckung des Bohrlochs vorsehen; evtl. direkt in die ELV integrieren; Personal schulen – nur bei abgedecktem Bohrloch im Nahbereich des Bohrlochkellers Aufenthalt erlaubt			0,01	0,1		0,1
5) Transport, Plateauwagen s. Betriebssicherheit der Streckenlagerung														

13.3 Betriebssicherheit beim Konzept der horizontalen Bohrlochlagerung

Situation	Gefährdung	S	E	O	A	N	R	Maßnahmen	Änderung der Parameter					R _{Neu}
									S	E	O	A	N	
1) Allg. Funktionsstörungen/Defekte														
Ausfall der Parkbremse	Überfahren werden, Weggeschleudert werden, Quetschen, Stürzen	8	4	1,5	5	1	240	Redundantes System, Anzeige bzw. Feedback das System störungsfrei; fernbedient	0,01		1			0,2
Bremse löst sich nicht, Fahren aus Gefahrenbereich nicht möglich	Erhöhte Strahlenexposition	0,01	4	1,5	5	1	0,3							0,3
Defektes Rad (Entgleisen, unerwarteter Stillstand)	Kollision, Überfahren werden, Weggeschleudert werden, Quetschen, Stürzen, erhöhte Strahlenexposition	20	4	5	3	1	1200	Enge Prüfintervalle der Räder, geringe Fahrgeschwindigkeit			1	1		80
Räder schleifen auf Gleisen	Verletzen durch herausschleudernde Teile, Funkenbildung (Brandgefahr)	20	4	5	3	1	1200	Enge Prüfintervalle der Räder, Schutzbleche um Räder, Einleiten einer Bremsung bis zum Stillstand aufgrund von Warnsystem			1	1		80

Situation	Gefährdung	S	E	O	A	N	R	Maßnahmen	Änderung der Parameter					R _{Neu}
									S	E	O	A	N	
Funkenbildung durch Kurzschluss	Brandgefahr	20	4	5	5	1	2000	Sicherungsschalter, regelmäßige Kontrolle der Verkabelung, Löschsystem mitführen und einsetzen			1	1		80
2) Fahrbewegung														
Ungewolltes Rollen	Personengefährdung durch Überfahren werden, Quetschen, Stoßen	20	1,5	1	1	2	60	regelmäßige Wartung, Betriebsanleitung beachten, stehenden Wagen manuell absichern			0,01	0,1		0,06
Bremsen ohne Feedback (Bremsausfall)	Personengefährdung durch Überfahren werden, Quetschen, Stoßen	20	1,5	1,5	3	1	135	regelmäßige Wartung der Bremsen, Personalschulung, Sicherheitsanweisungen beachten			1	1		30
3) Arbeitsbewegung / Handhaben des Behälters – Umladevorgang														
Drehen des Oberwagens	Quetschen	20	5	2	3	1	600	Personen nicht zulässig im Gefahrenbereich		0,01		0,1		0,04
Anheben / Absenken des Oberwagens	Quetschen	20	5	2	3	1	600	Personen nicht zulässig im Gefahrenbereich		0,01		0,1		0,04

Situation	Gefährdung	S	E	O	A	N	R	Maßnahmen	Änderung der Parameter					R _{Neu}
									S	E	O	A	N	
Andocken der Maschine am Einlagerungsbohrloch / Verspannen der Maschine mit dem Stoß	Quetschen	20	5	2	3	1	600	Personen nicht zulässig im Gefahrenbereich		0,01		0,1		0,04
Öffnen / Schließen der Schleusen	Quetschen	2	5	1	1	1	10	Keinerlei Personen im Bereich des Vorgangs		0,01		0,1		
Bewegung des Molches	Quetschen	2	5	1	1	1	10	Keinerlei Personen im Bereich des Vorgangs		0,01		0,1		
Ungleichmäßiges Heben des Behälters, Gefährdung der Standsicherheit	Quetschen, erhöhte Strahlenexposition	20	1,5	1	3	1	90	Personen nicht zulässig im Gefahrenbereich,		0,01		0,1		
Herabfallen des Behälters	erhöhte Strahlenexposition, Quetschen	20	0,5	1	1	1	10	Personen nicht zulässig im Gefahrenbereich, redundantes Behältersicherungssystem, geringe Fallhöhe		0,01		0,1		
Ausfall des Schleusenantriebs, Klemmen der Schleusen, Schließen von Hand	erhöhte Strahlenexposition, Quetschen, Stoßen,	11	1	1,5	3	1	49,5	Zusatzabschirmungen benutzen	0,01					0,045

Situation	Gefährdung	S	E	O	A	N	R	Maßnahmen	Änderung der Parameter					R _{Neu}
									S	E	O	A	N	
Verkanten der BSK im Bohrloch	erhöhte Strahlenexposition	8	8	1	1	1	64	Zusatzabschirmungen benutzen		0,01				
Verkanten des Molches	erhöhte Strahlenexposition	8	8	1	1	1	64	Zusatzabschirmungen benutzen		0,01				
Ausfall Schwenkantrieb	erhöhte Strahlenexposition, Quetschen, Stoßen	11	1	1,5	3	1	49,5	Zusatzabschirmungen benutzen		0,01				
Dichtungsversagen, Austritt von Medien unter Druck	Gefahr für die Augen, Kontakt mit Medien, Heiße / Kalte Medien, Aufwirbeln von Staub / Partikeln, Lärm, Unbeabsichtigte Bewegungen	15	0,5	1	3	1	22,5	Personen nicht zulässig im Gefahrenbereich						
Abreißen von Schläuchen / Leitungen	Austritt von unter Druck stehenden Medien, Schläge/ Stöße, Verletzung der Augen, unbeabsichtigte Bewegungen	15	0,5	1,5	3	1	33,75	Personen nicht zulässig im Gefahrenbereich		0,1				

Situation	Gefährdung	S	E	O	A	N	R	Maßnahmen	Änderung der Parameter					R _{Neu}
									S	E	O	A	N	
Ausfall der Luftdruckversorgung	erhöhte Strahlenexposition	8	8	2	3	1	384	Zusatzabschirmungen benutzen	0,01					0,48
4) Installations- / Wartungs- und Umrüstvorgänge														
Befüllen von Betriebsflüssigkeiten	Augenkontakt, Hautkontakt, Sturz (falls Einfüllöffnung höher gelegen)	15	2	5	1	1	150	Qualifiziertes Personal; Betriebs-/ Wartungsanleitung beachten						60
Geringes Eingreifen in den Betrieb (z. B. Beseitigen von Blockierungen)	Quetschen, Sturz, Verbrennung (heiße Bauteile)	11	1,5	8	1	1	132	Qualifiziertes Personal; Betriebs-/ Wartungsanleitung beachten			2			24,75
Schmieren	Augenkontakt, Hautkontakt, Sturz (falls Einfüllöffnung höher gelegen), Quetschen	15	2	5	1	1	150	Zentrales Schmiersystem evtl. mit Kartusche; Qualifiziertes Personal; Betriebs-/ Wartungsanleitung beachten		0,8	1,5			12
Reinigen	Sturz, Quetschen	20	2	5	1	1	200	Qualifiziertes Personal; Betriebs-/ Wartungsanleitung beachten		1,5				60

Situation	Gefährdung	S	E	O	A	N	R	Maßnahmen	Änderung der Parameter					R _{Neu}
									S	E	O	A	N	
Austausch von Verschleißteilen	Quetschen, Scheren, Schneiden	15	0,8	8	1	1	96	Qualifiziertes Personal; Betriebs-/ Wartungsanleitung beachten			2	0,1		2,4
Kontakt mit spannungsführenden Teilen	Stromschlag	20	2	2	5	1	400	Qualifiziertes Personal; Betriebs-/ Wartungsanleitung beachten			1,5	1		60
Arbeiten an unter Druck stehenden Komponenten	Ungewollte Bewegungen von Teilen, Kontakt mit heißen oder kalten Medien, Austritt von Medien unter Druck, Augenkontakt, Hautkontakt, Quetschen	20	0,8	8	1	1	128	Qualifiziertes Personal; Betriebs-/ Wartungsanleitung beachten, vor Beginn der Arbeiten drucklos schalten,			0,1			12,8

13.4 Betriebssicherheit beim Konzept der Direkten Endlagerung von TLB

Situation	Gefährdung	S	E	O	A	N	R	Maßnahmen	Änderung der Parameter					R _{neu}
									S	E	O	A	N	
1) Allg. Funktionsstörungen/Defekte														
Ausfall der Parkbremse	Überfahren werden, Weggeschleudert werden, Quetschen, Stürzen	8	4	1,5	5	1	240	Redundantes System, Anzeige bzw. Feedback das System störungsfrei; Fernbedient	0,01		1			
Bremse löst sich nicht, Fahren aus Gefahrenbereich nicht möglich	Erhöhte Strahlenexposition	0,01	4	1,5	5	1	0,3							
Weichen falsch gestellt	Überfahren werden, Weggeschleudert werden, Quetschen, Stürzen	20	4	1,5	3	1	360	Signalanlagen auf Fahrtwegen, Kollisionswarnsysteme, Fahrwege auch unbenutzt freihalten	0,01					
Defektes Rad (Entgleisen, unerwarteter Stillstand)	Kollision, Überfahren werden, Weggeschleudert werden, Quetschen, Stürzen, erhöhte Strahlenexposition	20	4	5	3	1	1200	Enge Prüfintervalle der Räder, geringe Fahrgeschwindigkeit	1		1			80

Situation	Gefährdung	S	E	O	A	N	R	Maßnahmen	Änderung der Parameter					R _{neu}
									S	E	O	A	N	
Räder schleifen auf Gleisen	Verletzen durch herausschleudernde Teile, Funkenbildung (Brandgefahr)	20	4	5	3	1	1200	Enge Prüfintervalle der Räder, Schutzbleche um Räder, Einleiten einer Bremsung bis zum Stillstand aufgrund von Warnsystem			1	1		
Funkenbildung durch Kurzschluss	Brandgefahr	20	4	5	5	1	2000	Sicherungsschalter, regelmäßige Kontrolle der Verkabelung, Löschsystem mitführen und einsetzen			1	1		80
2) Fahrbewegung														
STEV rollt ungewollt	Kollision, Überfahren werden, Weggeschleudert werden, Quetschen, Stürzen	20	4	1,5	1	2	240	Redundantes Feststellbremsen-System, Hemmschuhe, Sicherheitsunterweisung			1	0,1		16
Falsche Bewegungsrichtung nach Fahrtichtungswahl	Kollision, Überfahren werden, Weggeschleudert werden, Quetschen, Stürzen	20	4	1	2	2	320	Unterweisung, sinnfällige Bedienung			0,1			16

Situation	Gefährdung	S	E	O	A	N	R	Maßnahmen	Änderung der Parameter					R _{neu}
									S	E	O	A	N	
Fehlerhaftes Be- schleunigen	Kollision, Überfahren werden, Weggeschleudert werden, Quetschen, Stürzen	20	4	0,01	3	2	4,8							4,8
Bremsen ohne Feed-back (Bremsausfall)	Kollision, Überfahren werden, Weggeschleudert werden, Quetschen, Stürzen	20	4	1,5	3	2	720	Enge Wartungsintervalle, redundantes Bremssystem			0,1			48
Entgleisen der STEV	Kollision, Überfahren werden, Weggeschleudert werden, Quetschen, Stürzen, erhöhte Strahlenexposition	8	4	5	3	2	960	Regelmäßige Prüfung der Schienen und Räder, Zustandsüberwachung von Radsatzlagern sowie ein Freihalten der Gleise, Geschwindigkeitsbegrenzung bei Weichenüberfahrt	2		1,5			72
Freies Drehgestell reagiert nicht, Entgleisung	Kollision, Überfahren werden, Weggeschleudert werden, Quetschen, Stürzen	8	4	1,5	3	2	288	Enge Wartungsintervalle	2		1			48

Situation	Gefährdung	S	E	O	A	N	R	Maßnahmen	Änderung der Parameter					R _{neu}
									S	E	O	A	N	
Funkenflug	Brand, Explosion	20	4	0,01	1	2	1,6	bestehende Sicherheitsunterweisungen & Brandschutzkonzepte Senken das Risiko						1,6
3) Arbeitsbewegung / Handhaben des Behälters – Umladevorgang														
Kopplung STEV mit Schachttransportwagen	Quetschgefahr	15	15	1,5	0,01	1	0,225	Personen nicht zulässig im Gefahrenbereich; Automatikkupplung für Versorgungsleitungen		0,01				0,0015
Ungleichmäßiges Heben des Behälters, Gefährdung der Standsicherheit	Quetschen, erhöhte Strahlenexposition	20	20	1,5	1	3	90	Personen nicht zulässig im Gefahrenbereich, Schwerpunkt der STEV tief		0,01				
Herabfallen des Behälters	erhöhte Strahlenexposition, Quetschen	15	1,5	1,5	2	3	135	Personen nicht zulässig im Gefahrenbereich, redundantes Behältersicherungssystem		0,01	0,01			
Hubbewegung der Zylinder	Quetschen	1,5	1,5	2	1	1	135	Zylinder soweit wie möglich einhausen		0,01	0,01			0,0045

Situation	Gefährdung	S	E	O	A	N	R	Maßnahmen	Änderung der Parameter					R _{neu}
									S	E	O	A	N	
Abreißen eines Hydraulikschlauches	Verbrennung, Schlag / Stoß, Verletzung der Augen	11	0,8	1,5	5	1	66	Hydraulikschläuche zusätzlich gesichert, soweit möglich eingehaust, so weit möglich Einsatz von Verrohrungen		0,01	1			0,55

4) Arbeitsbewegung / Handhaben des Behälters – Einlagerungsvorgang

Verkanten der STEV am Einlagerungsbohrloch	erhöhte Strahlenexposition	8	8	1	3	1	192	Aufenthaltsdauer von Personal im Gefahrenbereich limitiert, zul. Strahlendosis wird nicht überschritten		0,3				7,2
Hubbewegung durch Zylinder nicht möglich, Kontrollverlust über Schlitten	erhöhte Strahlenexposition	8	8	5	5	1	1600	Aufenthaltsdauer von Personal im Gefahrenbereich limitiert, zul. Strahlendosis wird nicht überschritten		0,3				60
Kollision des Behälters mit Stoß	erhöhte Strahlenexposition	8	8	1	3	1	192	Aufenthaltsdauer von Personal im Gefahrenbereich limitiert, zul. Strahlendosis wird nicht überschritten		0,3				7,2

Situation	Gefährdung	S	E	O	A	N	R	Maßnahmen	Änderung der Parameter					R _{neu}
									S	E	O	A	N	
Kollision der STEV mit Stoß	erhöhte Strahlenexposition	8	8	1	3	1	192	Aufenthaltsdauer von Personal im Gefahrenbereich limitiert, zul. Strahlendosis wird nicht überschritten		0,3				7,2
Verkanten des Schlittens auf der STEV	erhöhte Strahlenexposition	8	8	2	5	1	640	Aufenthaltsdauer von Personal im Gefahrenbereich limitiert, zul. Strahlendosis wird nicht überschritten		0,3				24
Verkanten des Schlittens im Bohrloch	erhöhte Strahlenexposition	8	8	2	5	1	640	Aufenthaltsdauer von Personal im Gefahrenbereich limitiert, zul. Strahlendosis wird nicht überschritten		0,3				24
Blockieren der Panzerrollen	erhöhte Strahlenexposition	8	8	5	5	1	1600	Aufenthaltsdauer von Personal im Gefahrenbereich limitiert, zul. Strahlendosis wird nicht überschritten, Räumschild/Schutzblech vor den Panzerrollen		0,3				60

Situation	Gefährdung	S	E	O	A	N	R	Maßnahmen	Änderung der Parameter					R _{neu}
									S	E	O	A	N	
Panzerrollen-Bruch	erhöhte Strahlenexposition	8	8	2	5	1	640	Aufenthaltsdauer von Personal im Gefahrenbereich limitiert, zul. Strahlendosis wird nicht überschritten, Panzerrollen redundant angeordnet			0,01			
Schlitten kommt während des Einschubvorgangs im Bohrloch zum Erliegen durch defekte Rollen (Blockade)	erhöhte Strahlenexposition	8	8	2	5	1	640	Aufenthaltsdauer von Personal im Gefahrenbereich limitiert, zul. Strahlendosis wird nicht überschritten, redundant angeordnete Rollen, Räumschilde / Schutzbleche		0,3				
Blockieren der Stützylinder – Einfahren nicht möglich	erhöhte Strahlenexposition	8	8	5	5	1	1600	Aufenthaltsdauer von Personal im Gefahrenbereich limitiert, zul. Strahlendosis wird nicht überschritten, Notfallsystem an Zylindern	0,3	1,5				18

Situation	Gefährdung	S	E	O	A	N	R	Maßnahmen	Änderung der Parameter					R _{neu}
									S	E	O	A	N	
Blockieren der Stütz-zylinder – Ausfahren nicht möglich	erhöhte Strahlen-exposition	8	8	5	5	1	1600	Aufenthaltsdauer von Personal im Gefahrenbereich limitiert, zul. Strahlendosis wird nicht überschritten, Notfallsystem an Zylindern		0,3	1,5			18
Kippen der STEV beim Drehvorgang des Schlitten	erhöhte Strahlen-exposition	8	8	1	3	1	192	Aufenthaltsdauer von Personal im Gefahrenbereich limitiert, zul. Strahlendosis wird nicht überschritten, Schwerpunkt-lage bleibt beim Drehvor-gang gleich		0,3				
Drehvorgang in sei-ner Funktion be-schränkt	erhöhte Strahlen-exposition	8	8	5	5	1	1600	Aufenthaltsdauer von Personal im Gefahrenbereich limitiert, zul. Strahlendosis wird nicht überschritten		0,3				60
Verbindung Hubzylin-der und Schlitten nicht ohne Eingreifen lösbar	erhöhte Strahlen-exposition, Quetschen	8	8	5	5	1	1600	Aufenthaltsdauer von Personal im Gefahrenbereich limitiert, zul. Strahlendosis wird nicht überschritten		0,3				60

Situation	Gefährdung	S	E	O	A	N	R	Maßnahmen	Änderung der Parameter					R _{neu}
									S	E	O	A	N	
Fernbedienbarkeit nicht möglich	erhöhte Strahlenexposition	8	8	5	5	1	1600	Aufenthaltsdauer von Personal im Gefahrenbereich limitiert, zul. Strahlendosis wird nicht überschritten		0,3				60
5) Installations- / Wartungs- und Umrüstvorgänge														
Befüllen von Betriebsflüssigkeiten	Augenkontakt, Hautkontakt, Sturz (falls Einfüllöffnung höher gelegen)	2	2	4	8	3	1	192	gut zugängliche Einfüllöffnungen			1,5	1	12
Anschluss an die Energieversorgung	Stromschlag, Quetschung	20	1,5	1,5	1,5	1	1	45	Schutzschalter, bedienerfreundlicher Anschluss			1		
Geringes Eingreifen in den Betrieb (z. B. Beseitigen von Blockierungen)	Quetschen, Sturz, Verbrennung (heißer Bauteile)	15	2	2	5	1	1	150	Beseitigen von Blockierungen nur im Stillstand		2			60
Schmieren	Augenkontakt, Hautkontakt, Sturz (falls Schmierpunkt höher gelegen), Quetschen	2	2	5	1	1	1	20	gut zugängliche Schmiernippel/ Schmierstellen; Zentralschmiersystem wenn möglich, bestenfalls wartungsfreie Gleitlager		1	1		4

Situation	Gefährdung	S	E	O	A	N	R	Maßnahmen	Änderung der Parameter					R _{neu}
									S	E	O	A	N	
Reinigen	Sturz, Quetschen	2	2	5	5	1	1	nur im Stillstand möglich			1,5			
Austausch von Verschleißteilen	Quetschen, Scheren, Schneiden	2	1,5	5	1	1	50	Nur im Stillstand möglich			1,5			
Kontakt mit spannungsführenden Teilen	Stromschlag	20	8	2	1	1	320	Schutzschalter, Schutzplatten, Schutzschränke mit begrenztem Zugang; Persönliche Schutzausrüstung		1,5	1,5	1,5		45

14 Anhang 2: Auslegung für Varianten des POLLUX®-Behälters

Abschirmberechnungen und Massenabschätzungen für verschiedene Varianten des POLLUX-Behälters

März 2020

WTI/20/20

POLLUX, Abschirmung, MCNP, RBB, Massen

Dieser Bericht wurde im Auftrag der BGE TECHNOLOGY GmbH von der WTI Wissenschaftlich-Technische Ingenieurberatung GmbH, Jülich, erstellt. Der Bericht darf nur mit schriftlicher Zustimmung der BGE TECHNOLOGY GmbH und WTI GmbH zitiert, ganz oder teilweise vervielfältigt bzw. Dritten zugänglich gemacht werden. Alle Rechte bei WTI GmbH und BGE TECHNOLOGY GmbH.

INHALTSVERZEICHNIS

	Seite
1. Einleitung und Zusammenfassung	4
2. Randbedingungen	4
2.1 Geometrie	4
2.2 Inventar	7
2.3 Grenzwerte	8
3. Ergebnisse	9
3.1 Normale Beförderungsbedingungen	9
3.2 Unfall-Beförderungsbedingungen.....	13
Abbildungsverzeichnis	14
Tabellenverzeichnis	14
Literaturverzeichnis	15

1. EINLEITUNG UND ZUSAMMENFASSUNG

Für die Weiterentwicklung der Transport- und Einlagerungstechnik für ein zukünftiges HAW-Endlager ist neben dem Wirtsgestein der Endlagerbehälter entscheidend für die Maschinenentwicklung.

Ausgehend vom Referenzkonzept POLLUX 10 DWR-/30 SWR-BE (im Folgenden kurz POLLUX) werden durch Abschirmanalysen mit dem 3D-Monte-Carlo-Programm MCNP vier POLLUX-Typen/Größen mit jeweils verringriger Brennstab-Aufnahmekapazität gegenüber dem Referenzkonzept dimensioniert. Hierbei werden die Wanddicken und die Abmessungen / die Anordnung der Moderatorstangen so angepasst, dass die verkehrsrechtlichen Grenzwerte gemäß IAEA SSR-6 [1] eingehalten werden.

Andere Gewerke (Thermik, Aktivitätsfreisetzung, Kritikalitätssicherheit) werden nicht bewertet, aber die Massen der entsprechenden Konfigurationen werden, soweit der Modellierungsgrad es zulässt, abgeschätzt.

Unter den gegenüber dem Referenzkonzept geänderten Inventarparametern, die i. W. eine wesentlich höhere Mindestabklingzeit beinhalten, ist dieses Referenzkonzept so überdimensioniert, dass auf eine Moderatorbohrungsreihe und ca. 5 cm Außenradius verzichtet werden kann entsprechend einer Massenersparnis von ca. 3.700 kg. Die Massen der POLLUX-Typen mit weniger als 10 DWR-BE liegen bei ca. 53 t/ 47,5 t/ 41,4 t/ 34,7 t für 8 BE/ 6 BE/ 4,5 BE/ 3 BE.

2. RANDBEDINGUNGEN

Die Berechnungen werden mit dem Monte-Carlo-N-Partikel-Transport-Programm MCNP in der Version 6.2 [2] durchgeführt.

2.1 Geometrie

Die Geometrie des POLLUX für 10 DWR-BE mit Innenbehälter sowie die entsprechenden Materialzusammensetzungen werden analog zum Sicherheitsnachweis für den POLLUX [3] berücksichtigt.

Es wird eine homogene Beladung des POLLUX mit Brennstäben aus DWR- oder SWR-BE analysiert. Die Brennstäbe werden in den Kreissegment-Büchsen homogen modelliert. Eine Unterscheidung zwischen Brennstäben aus SWR- und DWR-BE erfolgt nicht explizit. Die Annahme von 560 kg SM/BE bei einer aktiven Länge von 390 cm wird aber ebenso wie die zugehörige Hüllrohrmasse und das axiale Abbrand-/Quellstärkenprofil von DWR-BE abgeleitet.

Zunächst wird der POLLUX gemäß Referenzkonzept modelliert und mit dem aktuellen Inventar versehen. Auf Basis der Ergebnisse für diese Konfiguration werden zunächst die Wandstärke von Behältermantel, -deckel und -boden sowie die Anzahl und Anordnung der Moderatorstangen im Behältermantel in mehreren Varianten so angepasst, dass die verkehrsrechtlichen Grenzwerte nach IAEA SSR-6 eingehalten werden. Abbildung 1 zeigt die Modelle für die einzelnen POLLUX-Varianten für 10 DWR-BE.

Mit Variante 1 aus Abbildung 1 (s. auch Tabelle 2) werden die weiterführenden Analysen für POLLUX für weniger als 10 DWR-BE durchgeführt. Zur Berücksichtigung der geringeren BE-Anzahl und der dadurch verringerten Quellstärken werden folgende Anpassungen der Geometrie des POLLUX vorgenommen:

- Der Tragkorb bzw. die Büchsengeometrie wird bei der POLLUX-Variante für 8 DWR-BE auf 4 angepasste Büchsen reduziert, ab 6 DWR-BE wird das Inventar vereinfacht über den Schachtquerschnitt abzüglich der Büchsenaußenwand homogenisiert.
- Anpassung des Durchmessers des Innenbehälters an die geringere BE-Anzahl.
- Anpassung des Innendurchmessers des Abschirmbehälters an den veränderten Durchmesser des Innenbehälters.
- Verringerung der Wandstärke des Abschirmbehälters.
- Veränderung von Lage und Anzahl der Moderatorbohrungen.
- Verringerung der Deckelstärke des Abschirmbehälters.

Abbildung 2 zeigt die Modelle für die einzelnen POLLUX-Varianten für weniger als 10 DWR-BE.

Die Bestimmung der Umgebungsäquivalentdosisleistung $\dot{H}^*(10)$ an der Oberfläche und in der Umgebung des POLLUX erfolgt mit einem 3D-Detektorgitter in geeigneter Auflösung. Ergänzend werden Detektorzellen vor der Mitte der aktiven Zone oberflächennah und in 2 m Abstand vom Behälterkörper und dem Stoßdämpferaußenradius modelliert, um Aussagen über die statistische Relevanz der Ergebnisse treffen zu können.

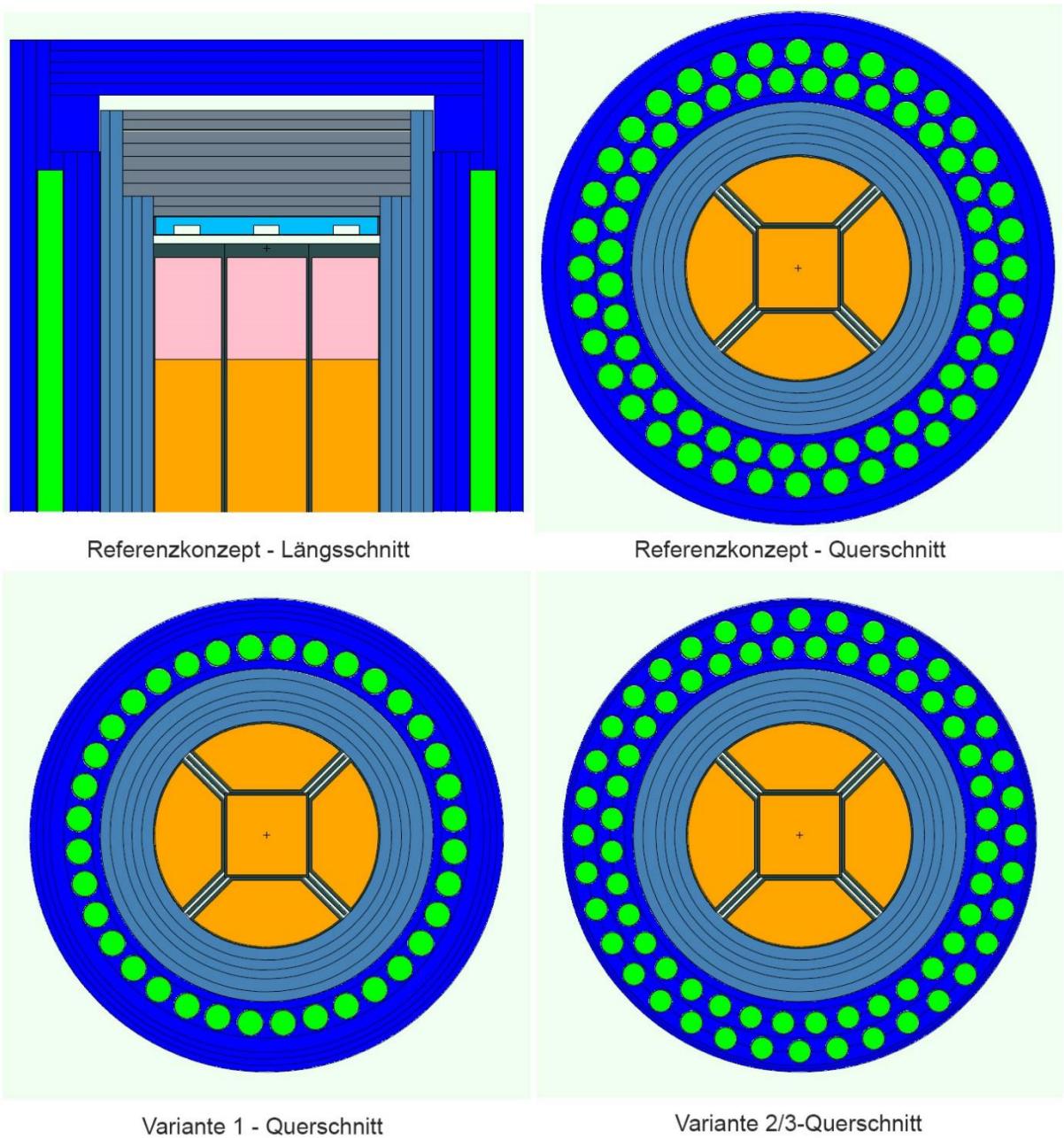


Abbildung 1: Berechnungsmodelle POLLUX für 10 DWR-BE

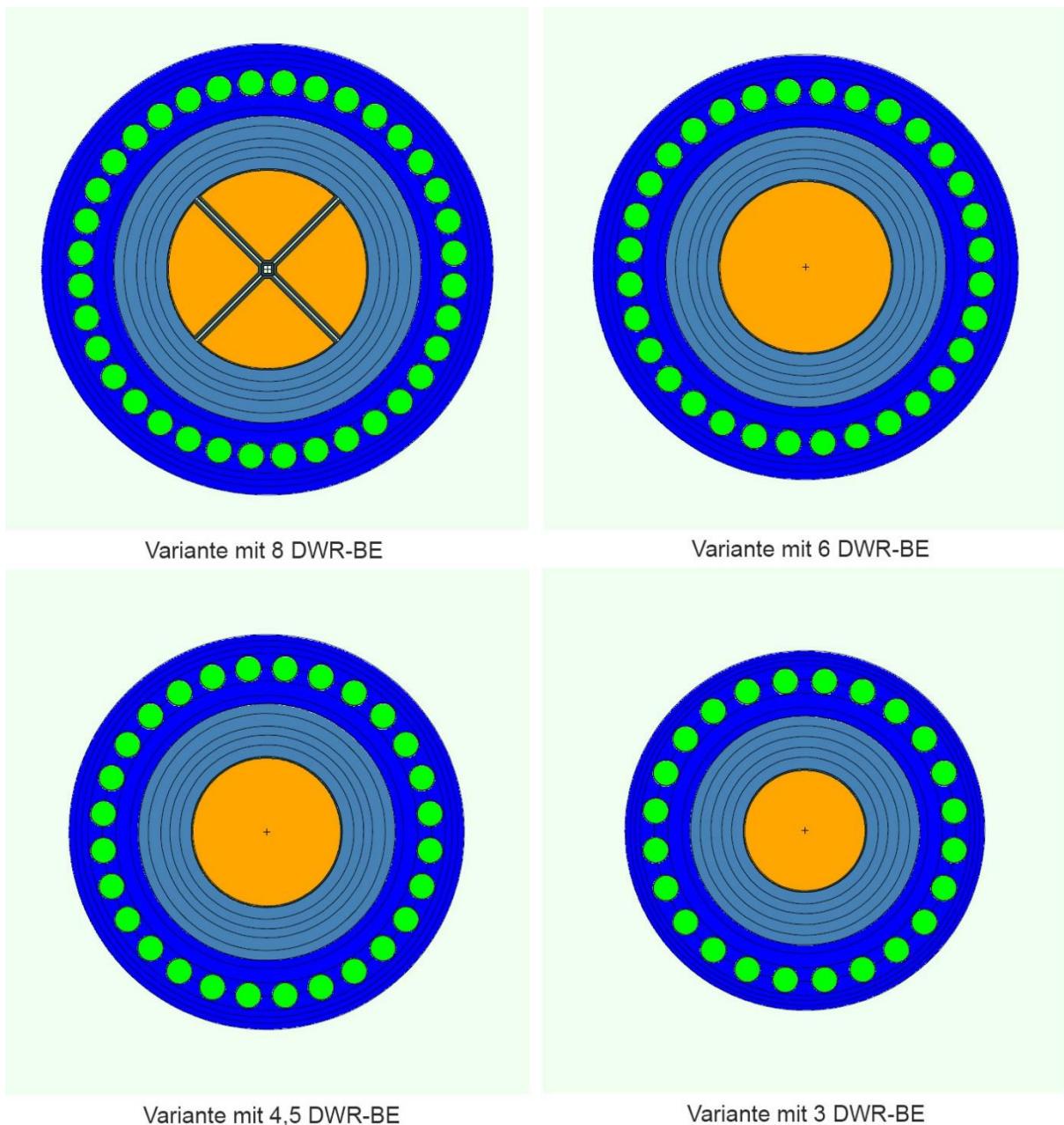


Abbildung 2: Berechnungsmodelle POLLUX für 8/6/4,5/3 DWR-BE

2.2 Inventar

Das Inventar der DWR- und SWR-Brennstoffe wird durch folgende Randbedingungen charakterisiert und bei der Berechnung der Dosisleistungen abdeckend berücksichtigt:

- ^{235}U -Anfangsanreicherung: 3,4 - 5,0 Gew.-%
- Pu_{fiss}-Gehalt: 3,4 - 4,75 Gew.-%

- BE-gemittelter Abbrand: 33 - 65 GWd/tSM
- Abklingzeit: 57 Jahre

Die abgeleiteten Quellstärken für eine Kombination aus 89 % UO₂- und 11 % MOX-BS mit 65 GWd/tSM Abbrand und 57 Jahren Abklingzeit sind in Tabelle 1 enthalten. Für Neutronen wurde wegen der überproportionalen Abhängigkeit der Quellstärke vom lokalen Abbrand für das axiale Abbrandprofil ein 20 %iger Quellstärkenaufschlag berücksichtigt. Die Neutronenquelle besteht aus 4 % (α, n)-Neutronen und 96 % Spontanspaltungsneutronen.

Energiegruppe/ Neutronen	Quellstärke in 1/(s*10 DWR-BE)
0,575 MeV	9,75E+15
0,85 MeV	6,58E+13
1,25 MeV	3,58E+13
1,75 MeV	2,19E+12
2,25 MeV	4,61E+10
2,75 MeV	5,95E+09
3,5 MeV	4,72E+08
Neutronen	4,47E+09

Tabelle 1: Verwendete Gamma- und Neutronenquellstärken für 10 DWR-BE

2.3 Grenzwerte

Die verkehrsrechtlichen Auslegungsanforderungen (Dosisleistungsgrenzwerte) für die Behälterabschirmung gemäß [1] sind im Folgenden zusammengestellt. Dies sind im Einzelnen:

Maximal zulässige Dosisleistungen (Summe aus Gamma- und Neutronendosisleistung) bei Beförderung unter ausschließlicher Verwendung:

- Routine-Beförderungsbedingungen
 - (a) an jedem Punkt der Außenfläche des Versandstücks: 10 mSv/h
 - (b) an jedem Punkt der Außenfläche des Fahrzeugs: 2 mSv/h
 - (c) an jedem Punkt in 2 m Abstand von den senkrechten Außenflächen des Fahrzeugs: 0,1 mSv/h

- normale Beförderungsbedingungen
- (d) maximal zulässige Steigerung der höchsten Dosisleistung an irgendeiner Stelle der äußeren Oberfläche des Versandstücks infolge der Prüfungen zum Nachweis der Widerstandsfähigkeit unter normalen Beförderungsbedingungen: 20 %
- Unfall-Beförderungsbedingungen
- (e) maximale Dosisleistung in 1 m Abstand von der Oberfläche des Versandstücks nach den Prüfungen zum Nachweis der Widerstandsfähigkeit unter Unfall-Beförderungsbedingungen: 10 mSv/h

Die Anforderungen (a) und (b) sind durch Anforderung (c) abgedeckt. Da die Beförderung unter ausschließlicher Verwendung nicht sichergestellt ist, wird über Auslegungsanforderung (c) hinausgehend die Einhaltung des Dosisleistungsgrenzwerts umlaufend auf einem Zylinder in 2 m Abstand um das Versandstück gezeigt.

Es kann davon ausgegangen werden, dass für die hier betrachteten POLLUX-Designs die Anforderung (d) für normale Beförderungsbedingungen immer erfüllt werden, da der POLLUX axial eine homogene Abschirmgeometrie aufweist und durch die dichte Packung der Brennstäbe im Innenbehälter eine signifikante Veränderung der Brennstoffanordnung unter normalen Beförderungsbedingungen nicht unterstellt werden muss.

Es wird exemplarisch gezeigt, dass die Anforderung (e) für Unfall-Beförderungsbedingungen auch unter Annahme des vollständigen Verlusts des Moderatormaterials immer erfüllt wird.

3. ERGEBNISSE

3.1 Normale Beförderungsbedingungen

Im Folgenden werden die Ergebnisse zusammengefasst. Dabei werden die berechneten Dosisleistungen zusammen mit den Hauptabmessungen und berechneten Massen dargestellt.

Die Massenberechnung erfolgt auf der Basis der im Datenblatt für das Referenzkonzept genannten Massen. Dabei fällt auf, dass die Berechnungen für das MCNP-Modell zu ca. 2.000 kg geringeren Massen als im Datenblatt genannt führen. Ca. 50 % dieser Differenz lassen sich durch die nicht modellierten oder nicht in der Berechnung berücksichtigten

Bauteile wie Kühlrippen, Tragzapfen, Grafitmoderator, Abstandsgitter, Federn in den Bohrungen etc. zuordnen. Für die übrigen 50 % ist zu berücksichtigen, dass die Massenabschätzungen im Datenblatt nicht als Nominal-, sondern Maximalmassen zu verstehen sind, d. h. auf maximalen theoretischen Dichten und ungünstigsten Toleranzpaarungen beruhen. Insofern muss das Abschirmmodell sogar niedrigere Massen aufweisen, um realistische bzw. konservative Ergebnisse zu liefern. Die o. g. 2000 kg sind für alle berechneten Varianten den sich aus den Modellen ergebenden Massen zugeschlagen, so dass Maximalmassen ausgewiesen werden.

Die Ergebnisse für das Referenzkonzept in Tabelle 2 zeigen, dass das Referenzkonzept trotz der hohen Abbrände und des MOX-Anteils des Inventares aufgrund der gegenüber den ursprünglichen 10 Jahren sehr viel längeren Abklingzeit von 57 Jahren überdimensioniert ist. Dies gilt vor allem für die Gammastrahlung. Aber auch die Neutronenstrahlung schöpft nur ca. 20 % des führenden 2 m-Grenzwertes (inkl. Sekundärgammastrahlung) aus. Die Varianten 1 bis 3 beschreiben verschiedene Ansätze zur Optimierung. Allen Varianten gemeinsam ist dabei die Reduktion des Außen-durchmessers, d. h. Einsparung von Gussmaterial. Variante 1 hält den Grenzwert gerade ein und liefert damit höhere Werte als die Varianten 2 und 3. Da davon auszugehen ist, dass aus mechanischen Gründen die Varianten 2 und 3 mit zwei Moderatorbohrungsreihen problematisch sind, werden die Varianten für weniger als 10 DWR-BE auf Basis der Variante 1 so abgeleitet, dass sie die Grenzwerte einhalten. Die Ergebnisse sind in Tabelle 3 dargestellt.

Alle Varianten außer dem Referenzkonzept haben einen um 6 cm reduzierten Abschirmdeckel. Dies erhöht die Dosisleistungen auf der Deckeloberfläche ohne Stoßdämpfer von ca. 40 $\mu\text{Sv/h}$ auf ca. 60 $\mu\text{Sv/h}$, die in jedem Fall nahezu ausschließlich aus Neutronen stammen. Selbst ein Entfall des Grafitmoderators führt am (reduzierten) Deckel nicht zu unzulässig hohen Dosisleistungen, wie eine Berechnung für Unfall-Beförderungsbedingungen zeigt. Theoretisch könnte die Dicke des Abschirmdeckels (mit Moderator) auf 0 cm sinken; dies entspricht aber nicht dem Konzept des POLLUX. Gleiches gilt für den Boden des Abschirmbehälters.

Referenzkonzept

Innenbehälter: $D_i = 68,9 \text{ cm}, D_a = 101,16 \text{ cm}$

Abschirmbehälter: $D_i = 101,3 \text{ cm}, D_a = 156 \text{ cm}$

Bohrungen: 2 x 36 Bohrungen, $d = 80 \text{ mm}$

Masse: 63460 kg ohne Std. lt. Zeichnung, **63300 kg berechnet**

DL $\mu\text{Sv}/\text{h}$	Gamma	Neutronen	Sek.-G	Summe
OFL	2,9	137	24,6	164,5
2 m	0,41	19,8	4,6	24,8
2 m FZG	0,36	17,0	4,0	21,3

Variante 1

Innenbehälter: $D_i = 68,9 \text{ cm}, D_a = 101,16 \text{ cm}$

Abschirmbehälter: $D_i = 101,3 \text{ cm}, D_a = 146 \text{ cm}$

Bohrungen: 1 x 36 Bohrungen, $d = 80 \text{ mm}, D_{TK} = 114,5 \text{ cm}$

Masse: **59600 kg berechnet**

DL $\mu\text{Sv}/\text{h}$	Gamma	Neutronen	Sek.-G	Summe
OFL	3,2	770	29,7	802,6
2 m	0,65	111,5	5,2	117,4
2 m FZG	0,54	95	4,2	99,7

Variante 2

Innenbehälter: $D_i = 68,9 \text{ cm}, D_a = 101,16 \text{ cm}$

Abschirmbehälter: $D_i = 101,3 \text{ cm}, D_a = 146 \text{ cm}$

Bohrungen: 2 x 36 Bohrungen, $d = 70 \text{ mm}$

Masse: **56200 kg berechnet**

DL $\mu\text{Sv}/\text{h}$	Gamma	Neutronen	Sek.-G	Summe
OFL	9,3	366	74,7	450,1
2 m	1,21	57,5	11,4	70,1
2 m FZG	1,04	49,2	9,7	60,0

Variante 3

Innenbehälter: $D_i = 68,9 \text{ cm}, D_a = 101,16 \text{ cm}$

Abschirmbehälter: $D_i = 101,3 \text{ cm}, D_a = 144 \text{ cm}$

Bohrungen: 2 x 36 Bohrungen, $d = 70 \text{ mm}$

Masse: **54500 kg berechnet**

DL $\mu\text{Sv}/\text{h}$	Gamma	Neutronen	Sek.-G	Summe
OFL	14,9	399	96,2	509,6
2 m	2,59	64,1	14,1	80,8
2 m FZG	2,00	54,8	12,0	68,9

Tabelle 2: Berechnungsergebnisse für Varianten des POLLUX für 10 DWR-BE

Variante 8 BE

Innenbehälter: $D_i = 61,6 \text{ cm}$, $D_a = 93,86 \text{ cm}$
 Abschirmbehälter: $D_i = 94 \text{ cm}$, $D_a = 138 \text{ cm}$
 Bohrungen: 1 x 36 Bohrungen, $d = 80 \text{ mm}$, $D_{TK} = 114,5 \text{ cm}$
Masse: **53000 kg berechnet**

DL $\mu\text{Sv}/\text{h}$	Gamma	Neutronen	Sek.-G	Summe
OFL	3,0	700	57,1	760
2 m	0,65	99,0	9,0	109
2 m FZG	0,56	85,0	7,7	93,3

Variante 6 BE

Innenbehälter: $D_i = 53,4 \text{ cm}$, $D_a = 85,66 \text{ cm}$
 Abschirmbehälter: $D_i = 85,8 \text{ cm}$, $D_a = 130 \text{ cm}$
 Bohrungen: 1 x 32 Bohrungen, $d = 80 \text{ mm}$, $D_{TK} = 108 \text{ cm}$
Masse: **47500 kg berechnet**

DL $\mu\text{Sv}/\text{h}$	Gamma	Neutronen	Sek.-G	Summe
OFL	2,1	703	56,0	761
2 m	0,53	96,2	8,2	105
2 m FZG	0,46	82,2	7,0	89,6

Variante 4,5 BE

Innenbehälter: $D_i = 46,2 \text{ cm}$, $D_a = 78,46 \text{ cm}$
 Abschirmbehälter: $D_i = 78,6 \text{ cm}$, $D_a = 120,8 \text{ cm}$
 Bohrungen: 1 x 28 Bohrungen, $d = 80 \text{ mm}$, $D_{TK} = 100,5 \text{ cm}$
Masse: **41400 kg berechnet**

DL $\mu\text{Sv}/\text{h}$	Gamma	Neutronen	Sek.-G	Summe
OFL	2,7	763	56,5	822
2 m	0,60	99,6	7,7	108
2 m FZG	0,53	85,0	6,6	92,2

Variante 3 BE

Innenbehälter: $D_i = 37,8 \text{ cm}$, $D_a = 70,06 \text{ cm}$
 Abschirmbehälter: $D_i = 70,2 \text{ cm}$, $D_a = 110 \text{ cm}$
 Bohrungen: 1 x 24 Bohrungen, $d = 80 \text{ mm}$, $D_{TK} = 92 \text{ cm}$
Masse: **34700 kg berechnet**

DL $\mu\text{Sv}/\text{h}$	Gamma	Neutronen	Sek.-G	Summe
OFL	3,1	825	55,7	884
2 m	0,81	95,9	7,0	104
2 m FZG	0,71	81,6	6,0	88,2

Tabelle 3: Berechnungsergebnisse für Varianten des POLLUX für 8/6/4,5/3 DWR-BE

3.2 Unfall-Beförderungsbedingungen

Für die Variante 1 des POLLUX für 10 DWR-BE wird stellvertretend für alle anderen Varianten eine Berechnung für Unfall-Beförderungsbedingungen, d. h. ohne Moderator im gesamten Behältersystem, durchgeführt und ausgewertet. Die maximalen Dosisleistungen in 1 m Abstand vom Behälter treten vor dem Behältermantel auf und betragen 2,16 mSv/h. In 1 m Abstand von Boden und Deckel resultieren 0,1 mSv/h bzw. 0,04 mSv/h. Damit ist der zulässige Grenzwert unter Unfall-Beförderungsbedingungen von 10 mSv/h in 1 m Abstand für den POLLUX sicher eingehalten.

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

	Seite
Abbildung 1: Berechnungsmodelle POLLUX für 10 DWR-BE	6
Abbildung 2: Berechnungsmodelle POLLUX für 8/6/4,5/3 DWR-BE	7

TABELLENVERZEICHNIS

	Seite
Tabelle 1: Verwendete Gamma- und Neutronenquellstärken für 10 DWR-BE	8
Tabelle 2: Berechnungsergebnisse für Varianten des POLLUX für 10 DWR-BE	11
Tabelle 3: Berechnungsergebnisse für Varianten des POLLUX für 8/6/4,5/3 DWR-BE	12

LITERATURVERZEICHNIS

- [1] IAEA Safety Standards
Specific Safety Requirements No. SSR-6 (Rev. 1)
Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material
2018 Edition
- [2] C. J. Werner, et al.
MCNP6.2 Release Notes
Los Alamos National Laboratory, report LA-UR-18-20808 (2018)

C. J. Werner (editor)
“MCNP Users Manual – Code Version 6.2”
Los Alamos National Laboratory, report LA-UR-17-29981 (2017)
- [3] GNB B 078/95, Rev. 1
Sicherheitsnachweis für den Transport-, Lager- und Endlagerbehälter
POLLUX 10 DWR-/30 SWR-BE
November 1998

BGE TECHNOLOGY GmbH
Eschenstraße 55
31224 Peine – Germany
T + 49 5171 43-1520
F + 49 5171 43-1506
info@bge-technology.de
www.bge-technology.de