

Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Fakultät Life Sciences

Konzeptionelle Entwicklung eines Tunnelfahrzeuges als integraler Bestandteil des Sicherheits- und Rettungskonzeptes ElbX.

Bachelorarbeit
Im Studiengang Rettungsingenieurwesen (BA)

vorgelegt von
Voigt, Julian



Hamburg
4. Juli 2020

Gutachterin: Prof. Dr. Andrea, Berger-Klein (HAW Hamburg)

Gutachter: Dipl. Ing. Per, Dost (WTM Engineers)

Die Abschlussarbeit wird erstellt in Zusammenarbeit mit der Firma WTM Engineers.

Vorwort

Diese Bachelorarbeit wurde im Rahmen einer Zusammenarbeit mit dem Ingenieurbüro WTM Engineers im vorbeugenden Brandschutz, als Teil der Planungsgemeinschaft ElbX, geschrieben. Das Projekt, in das sich diese Arbeit eingliedert, besteht darin, ein Tunnelfahrzeug als Bestandteil des Sicherheits- und Rettungskonzeptes zu entwickeln. Die Arbeit fasst Disziplinen aus dem Projektmanagement, der medizinischen Gefahrenabwehr und dem Arbeitsschutz zusammen und ermöglichte es auf diese Weise, unterschiedliche Studienanteile in einer praktischen Arbeit zu integrieren. Neben der Anwendung gelernter Inhalte motivierte mich die Bedeutung des Projekts für die Energiewende in Deutschland, viel Zeit und Engagement in das Projekt zu investieren. Als Teil der Planungsgemeinschaft ElbX wurden mir Kontakte zu ganz unterschiedlichen Projektbeteiligten ermöglicht, was das Bearbeiten weiter spannend gestaltete., was das Bearbeiten weiter spannend gestaltete.

An dieser Stelle möchte ich mich bei all denen bedanken, die mich bereitwillig unterstützt und diese Arbeit möglich gemacht haben. Zuerst gilt dieser Dank der Prüfungsvorsitzenden der Hochschule für Angewandte Wissenschaften, Frau Prof. Dr. Andrea Berger-Klein, die trotz des Lockdowns während der COVID-19-Krise vieles ermöglicht hat und sich nach dem Ausfall des ersten Gutachters und Betreuers bereit erklärte, meine Bachelorarbeit zu betreuen. Ebenso möchte ich mich bei Herrn Dr. Stefan Ehmann, stellvertretend für die Geschäftsführung von WTM Engineers, und Per Dost, Projektingenieur von WTM Engineers und Zweitgutachter, dafür bedanken, dass sie mir so viele Ressourcen, Zeit und Vertrauen für meine Arbeit entgegenbrachten. Des Weiteren möchte ich mich bei Dr. Timo Ueltzhöffer und Dr. Christian Voigt bedanken, dass sie mich während des Schreibens mit viel konstruktiver Kritik, guten Vorschlägen und Anregungen vorangebracht und kommentarlos jedes falsche Komma und jede fehlende Endung ergänzt haben.

Ihnen allen ein herzliches Dankeschön und vergelte es Gott.

Zusammenfassung

In dieser Arbeit sind die konzeptionelle Entwicklung eines Tunnelfahrzeuges als integraler Bestandteil des Sicherheits- und Rettungskonzeptes ElbX sowie dessen Bedingungen und Fahrzeugspezifikationen beschrieben. Das ElbX ist ein nicht ständig besetzter Versorgungstunnel von Höchstspannungsleitungen, welcher von dem Übertragungsnetzbetreiber TenneT TSO GmbH (TTG) im Zuge der Energiewende und des Netzausbauprogramms in Norddeutschland im Bereich der Elbe gebaut werden soll. Die Bachelorarbeit basiert auf dem Planungsstand vom 24.01.2020.

In dieser Arbeit wird das Bauvorhaben ElbX ausführlich beschrieben und die Bedingungen erläutert, unter denen das Fahrzeug operieren soll. Dabei wird der Einsatz des Fahrzeuges in das Sicherheits- und Rettungskonzept integriert. Hierbei wird ein besonderer Schwerpunkt auf die Arbeitssicherheit und vier Notfallereignisse gelegt: Betriebsstörung, Unfall, Brand und andere kritische Ereignisse.

Der Tunnel soll eine Länge von 4.630 Meter haben und an dessen Anfang und Ende Schachtbauwerke mit Notausstiegen besitzen. Ebenfalls hervorzuheben ist der Verzicht auf eine Feuerlöschanlage zum Zeitpunkt der Planung. Betrieblich soll der Tunnel möglichst selten betreten werden und bedarf bei größeren Arbeiten einer Tunnelbesatzung von sechs Personen.

Ein weiterer Bestandteil dieser Arbeit sind die mittels Anforderungsanalyse eruierten Fahrzeugspezifikationen. Ziel der Anforderungsanalyse ist die Ermittlung beziehungsweise die Befragung und Analyse der Anforderungsquellen. Dabei spielen das Arbeitsschutzgesetz, die Unfallverhütungsvorschriften und Technischen Regeln für Arbeitsstätten sowie Anforderung von TTG eine übergeordnete Rolle. Als zentrale Anforderung muss das Tunnelfahrzeug unbemannte Inspektionen durchführen können. Mess- und Kameratechnik wie beispielsweise eine hochauflösende Wärmekamera und ein leistungsfähiges Informationsübertragungssystem ist dazu vonnöten. Außerdem muss es dem Personal die Möglichkeit bieten, Wartungs- und Instandsetzungsarbeiten im Tunnel durchzuführen. Reparaturkabel und Verbindungsmuffen müssen dazu von dem Fahrzeug Tunnelfahrzeug transportiert und auf Arbeitshöhe gebracht werden.

Als weiteren Schwerpunkt muss das Fahrzeug den Arbeitstrupps ein sicheres Flüchten und Retten aus dem Tunnel ermöglichen und soll deshalb über eine Löscheinrichtung und Mittel zur Ersthilfe sowie eine Rettungstrage für erkrankte und verletzte Personen verfügen. Die Anforderungen werden in einem Stufenmodell weiter detailliert und spezifiziert.

Mittels eines ersten Entwurfes wurde eine Evaluation der Fahrzeugspezifikationen durchgeführt. Ein Großteil der Anforderungen wurde erfüllt. Im Bereich der Arbeitssicherheit sind einige Mängel aufgetreten. So konnte nicht schlüssig dargelegt werden, wie Ersatzkabel und -muffen in Montageposition gehoben werden sollen. Ein dynamischer Kranarm wurde schließlich als vorteilhaftere Lösung angeboten. Auch wies das Konzept für die Verletzentrage Schwächen auf, die diskutiert und für die Verbesserungsvorschläge erarbeitet wurden: Eine dem Rettungswagen angelehnte Variante, bei der Patienten von Hinten in das Fahrzeug geschoben werden, wird der ersten Entwurfsvariante vorgezogen. Da ein Brandereignis die größte Gefahr für Personen im Tunnel darstellt, ist während der Integration ein besonderes Augenmerk daraufgelegt. Filterselbstretter und ein abgestimmtes Einsatzkonzept für das Tunnelfahrzeug reagieren auf diese Gefahr angemessen.

Abgeschlossen wird die Arbeit mit einer ausführlichen Diskussion der Ergebnisse. Zusammenfassend kann konkludiert werden, dass ein erfolgreiches ein Konzept in Bezug auf die Anforderungen entwickelt wurde. Die Defizite erster Modellierungen, insbesondere hinsichtlich der Arbeitssicherheit, konnten erfolgreich ausgeräumt werden.

Schlüsselwörter: Tunnelfahrzeug, Versorgungstunnel, Anforderungsanalyse, Sicherheitskonzept, Energiewende

Abstract

This work describes the conceptual development of a tunnel vehicle as an integral part of the safety and rescue concept ElbX as well as its conditions and vehicle specifications. The ElbX is a non-permanently manned supply tunnel for high-voltage lines in Northern Germany in the area of the Elbe river. Engineering planning has taken place under consideration of the energy transition towards the use of renewable energy and the German current network development plan. The bachelor thesis is based on the planning status of 24.01.2020.

This paper describes the construction of the project ElbX in detail and explains the conditions under which the vehicle is planned to operate. A key structural key feature is the length of the tunnel of 4,630 meters. Its start and end are planned to include solid build structures with emergency exits. Also worthy of mention is the fact that at the time of planning no firefighting systems are planned to be installed. In operational terms, the tunnel is to be entered as seldom as possible and requires in the maximum case a tunnel crew of six people for major works. The use of the vehicle is integrated into the safety and rescue concept and places emphasis on occupational safety and four events: malfunction, accident, fire and other critical events.

A further component of this work is the analysis of vehicle specifications determined by means of requirements. The laws and standards on occupational safety and health and the requirements of the transmission system operator TenneT TSO GmbH (TTG), play a superordinate role. As a central requirement, the tunnel vehicle must be able to perform unmanned inspections. Measurement and camera technology such as, for example, a high-resolution thermal camera and a strong information transmission system are required. In addition, it must enable the personnel to carry out maintenance and repair work in the tunnel. Repair cables and connecting sleeves must be transported by the vehicle tunnel and brought to working positions. Another important priority is the possibility of escape and rescue in dangerous situations. Therefore the vehicle should be equipped with a fire extinguishing system and first aid equipment plus a rescue stretcher for sick and injured persons. The requirements will be further detailed and specified in a step-by-step model.

A first draft model is also evaluated by means of the vehicle specifications. Most of the requirements have been fulfilled. But in the area of work ergonomics deficiencies have been found. For example, it could not be described conclusively how spare cables and joints should be lifted into

the assembly position. A dynamic crane arm is offered as a more advantageous solution. The concept for carrying the injured also showed weaknesses. A variant based on the ambulance, in which patients are slid into the vehicle from behind, is preferred to the first design variant. A fire event represents the greatest danger for people in the tunnel. Special attention is paid to this during integration. Filter self-rescuers and a coordinated operational concept for the tunnel vehicle react to this danger appropriately.

The work is concluded with a detailed discussion of the results. In conclusion it can be said that a sufficient operational concept has been successfully developed. Deficiencies in the first modelling in regard of occupational safety have been rationally ruled out.

Keywords: tunnel vehicle, supply tunnel, requirements analysis, safety concept, energy transition

Inhaltsverzeichnis

Vorwort.....	2
Zusammenfassung.....	3
Abstract.....	5
Inhaltsverzeichnis.....	7
Abbildungsverzeichnis.....	10
Tabellenverzeichnis.....	11
1 Einleitung.....	12
1.1 Zielsetzung.....	14
1.2 Aufbau der Arbeit	14
1.3 Projektstatus	15
2 Das Projekt ElbX.....	16
2.1 Nutzung.....	16
2.2 Geografische Einordnung.....	17
2.3 Allgemeiner Aufbau des Querungsbauwerks	18
2.4 Sicherheitsrelevante Anlagentechnik	21
2.5 Betriebskonzept und Sicherheitskonzept	22
3 Defizite im Sicherheits- und Rettungskonzept	24
4 Methodik und Durchführung.....	29
5 Anforderungs- und Informationsquellen.....	32
5.1 Projektbeteiligte.....	32
5.2 Vorschriften, Regeln und Dokumente.....	34

5.3	Vergleichsprojekte.....	35
6	Fahrzeugspezifikationen.....	36
6.1	Spezifikationslevel 0.....	37
6.2	Spezifikationslevel 1.....	38
6.3	Spezifikationslevel 2.....	42
6.4	Spezifikationslevel 3.....	44
7	Fahrzeugkonzept.....	48
7.1	Gesamtkonstruktion.....	48
7.2	Karosserie.....	49
7.3	Personenkabine.....	49
7.4	Anhänger.....	51
7.5	Konstruktionstechnische Besonderheiten.....	53
7.5.1	Antrieb, Batterie und Leistungsdaten.....	53
7.5.2	Installationen und Verschiebepattform.....	55
7.5.3	Datenübertragung.....	56
7.5.4	Video- und Messtechnik.....	57
7.5.5	Bedienung und Fahrt.....	58
7.5.6	Flucht- und Rettungsmittel.....	58
7.5.7	Löschmittel und Feuerwiderstand.....	59
7.6	Einsatz des Tunnelfahrzeuges.....	62
8	Diskussion.....	64
9	Fazit.....	66

Literaturverzeichnis68

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 Geografische Einordnung: Visualisierung des Trassenkorridor des SuedLinks von Brunsbüttel nach Großgartach in Deutschland (Bundesnetzagentur 2019).....	13
Abbildung 2 Geografische Einordnung: Verlauf des Querungsbauwerk ElbX (blau strichliert) zwischen Wewelsfleth, SH (oberer blauer Punkt) und Freiburg, NDS (unterer blauer Punkt) im TSK 13 (violett). (ElbX Planungsgemeinschaft 2020).....	17
Abbildung 3 Bauwerkquerschnitt: Rot eingefasst liegt oberirdisch das Betriebsgebäude des ElbX, darunter liegend orange eingefasst das Schachtbauwerk mit Anschluss an das Muffenbauwerk mit blauer und dem Tunnel mit schwarzer Umrandung. Die Oberfläche ist grün dargestellt. (In Anlehnung an: ElbX Planungsgemeinschaft 2019a).....	18
Abbildung 4 Grundriss: Das fünfte Untergeschoss mit dem Sicherheitstreppehaus, dem Aufzug und dessen Vorraum ist hellblau eingefasst. Die baurechtlich notwendigen Bereiche sind grün hinterlegt. Die Hochspannungskabel innerhalb des Tunnels sind farblich als rote und grüne Linien dargestellt. (In Anlehnung an: ElbX Planungsgemeinschaft 2019b).....	19
Abbildung 5 Tunnelquerschnitt Variante mit 8 Kabeln: Bei einer Nennweite von 4 m und einer die Verkehrsbreite für das Tunnelfahrzeug von 1 m auf eine Breite von begehbaren Fläche von 2,72 m sind in dieser Variante des Tunnelquerschnitts acht Kabel sowie vier Notfallkabel am Tunnelrand eingezeichnet. Zusätzlich kommen weitere Kabel zur Versorgung der Tunnelanlage und Erdungskabel hinzu (ElbX Planungsgemeinschaft 2019a).....	20
Abbildung 11 Typischer Brandverlauf am Beispiel eines Naturbrandes (Zürcher & Frank 2018).....	27
Abbildung 6 Die SOPHIST-Satzschablone dient der standardisierten Formulierung von Anforderungen (Kluge 2016)	31
Abbildung 7: Abbildung des Tunnelfahrzeug für das ElbX mit Personenkabine und Anhänger zum Transport verletzter und erkrankter Personen (NOWILAN GmbH 2020).....	49

Abbildung 8 Abbildung der Personenkabine mit 6 Sitzplätzen und dem Fahrercockpit, Stauraum sowie einem Löschtank auf dem Dach (NOWILAN GmbH 2020)	50
Abbildung 9 Abbildung des Anhängers mit Sitzplatz für einen Ersthelfer, einer Schleifkorbtrage, Hub- und Hebevorrückung sowie einer Absaugpumpe mit Tank und Schaum- und Löscheinrichtung auf dem Fahrzeugdach (NOWILAN GmbH 2020)	51
Abbildung 10 3D-Modell der Kabelführung aus dem Muffenbauwerk über das Schachtbauwerk hinein in den Tunnel mit einer vorläufigen Variante der Verschiebepattform mit Tunnelfahrzeug. (NOWILAN GmbH 2020).....	56

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Art der Arbeiten unter Angabe von Mitarbeiterzahl, Ort, Dauer und Häufigkeit (ElbX Planungsgemeinschaft 2019b).	22
Tabelle 6 Die Notfallszenarien Betriebsstörung, Unfall, Brand und Kritisches Ereignis mit Erläuterungen und Beispielen, eingeteilt in Ereignisgruppen und im Stufensystem zueinander abgegrenzt.....	25
Tabelle 3: Leistungsdaten bei voller Zuladung (NOWILAN GmbH 2020)	55
Tabelle 4: Personenkabinenspezifikation (NOWILAN GmbH 2020)	60
Tabelle 5: Anhängerspezifikation (NOWILAN GmbH 2020)	61

1 Einleitung

Deutschland verfolgt das Ziel, bis 2050 seine Energie zu 80 % aus erneuerbaren Quellen zu gewinnen. Dieses Vorhaben soll im Wesentlichen durch den Ausbau von Windenergieanlagen realisiert werden. Dies stellt neue Anforderungen an das Stromnetz, da die konventionell gewonnene Energie wie zum Beispiel aus Kohle- und Atomkraftwerken überwiegend dort produziert wird, wo sie benötigt wird. Diese Standortfreiheit besteht bei erneuerbarer Energie häufig nicht, da sie auf natürliche Ressourcen zurückgreift. Sie ist von Parametern wie Windstärke und Sonnenstrahlungsintensität abhängig, welche von geographischen und klimatischen Gegebenheiten bestimmt werden.

Dadurch ergibt sich mit zunehmendem Anteil regenerativer Energiequellen auch eine immer ungleichmäßigere Verteilung von energiegewinnenden Standorten, die in das Energienetz einspeisen, und den Verbrauchern. Konkret bedeutet dies eine Energiegewinnung in den küstennahen Regionen Deutschlands und industriestarke, verbrauchende Standorte in Süddeutschland (Netzentwicklungsplan 2020). In diesem Kontext planen die Übertragungsnetzbetreiber TTG und TransnetBW eine 700 km lange leistungsstarke Gleichstromleitung, den sogenannten SuedLink, um die dezentral gewonnene erneuerbare Energie von den nördlichen Windkraftparks in die südlichen Verbraucherzentren der Bundesrepublik zu befördern (Abb. 1). Dadurch soll die Energieversorgung auch nach Abschaltung der verbliebenen Atom- und Kohlekraftwerke in Deutschland gewährleistet werden. Die verfahrensführende Behörde ist die Bundesnetzagentur (TenneT TSO GmbH 2020).

Das ElbX wird, als Teilprojekt des SuedLinks und somit Teil eines europaweiten Netzausbauprogramms, von der Europäischen Union als ein Vorhaben von gemeinsamem Interesse ausgeschrieben und gefördert. Nicht nur in Deutschland, sondern auch in ganz Europa wird als Folge der Energiewende Strom dezentral erzeugt. Dementsprechend ist in Zukunft damit zu rechnen, dass Tunnelanlagen wie das ElbX auch in anderen europäischen Netzausbauprojekten notwendig werden. Als Beispiel sei hier der Netzentwicklungsplan 2030 genannt.

Hiermit kann der Lösungsansatz, ein Tunnelfahrzeug als Bestandteil des Sicherheits- und Rettungskonzeptes zu verwenden, als Referenz für Folgeprojekte herangezogen werden und ist damit über das eigentliche Projekt hinaus international relevant.



Abbildung 1 Geografische Einordnung: Visualisierung des Trassenkorridor des SuedLinks von Brunsbüttel nach Großgartach in Deutschland (Bundesnetzagentur 2019)

Im nördlichsten Abschnitt dieser Trasse zwischen Brunsbüttel (Schleswig-Holstein) und Scheeßel (Niedersachsen) quert der SuedLink die Elbe. Dieser Abschnitt, das Querungsbauwerk ElbX mit einer Länge von mit 4.630 Metern und einem Tunnelinnendurchmesser von vier Metern, wird technisch federführend von dem Ingenieurbüro WTM Engineers und kaufmännisch von BabEng GmbH betreut. Im Zuge der Planung und Realisierung sind spezielle Anforderungen seitens des Sicherheits- und Rettungskonzeptes gestellt worden, wobei als Besonderheit keine Notausstiege vorgesehen sind, um die Schifffahrt auf der Elbe nicht zu behindern. Ebenfalls soll auf Schutzräume und Fluchtstollen verzichtet werden, um das Projekt baulich nicht überzudimensionieren.

Der Verzicht auf diese Komponenten würde eine große Gefahr für Personen in einem Tunnel darstellen, die von einem Brand- oder einem Unfallereignis beziehungsweise einer Erkrankung betroffen sind (Bargon & Scholl 2007:283). Rauch und Hitze können binnen kurzer Zeit tödlich sein, wenn eine Flucht in einen sicheren Bereich nicht möglich wäre. Da der Faktor Zeit eine wichtige

Variable im Zusammenhang von Unfallereignis zum Überleben darstellt, und insbesondere für schwer zugängliche Regionen wie Tunnel von besonderer Bedeutung ist, muss diesem Sachverhalt Rechnung getragen werden. Ebenfalls stellen Ersatzleitungen und deren Verbindungsmuffen sowie die benötigten Arbeitsmittel für die Wartung und Installation auf Grund des hohen Gewichts ohne weiteres Hilfsmittel eine gesundheitliche Gefahr dar. Daher wird ein Tunnelfahrzeug entwickelt, welches nicht nur zur Wartung und Instandsetzung eingesetzt und ergonomisch sicheres Arbeiten ermöglicht, sondern gleichermaßen auch als Rettungs- und Fluchtfahrzeug für das Tunnelpersonal dienen kann.

1.1 Zielsetzung

Im Mittelpunkt dieser Arbeit steht die konzeptionelle Entwicklung des Tunnelfahrzeuges als integraler Bestandteil des Sicherheits- und Rettungskonzeptes ElbX unter Betrachtung der baulichen und betrieblichen Bedingungen im Tunnel und die daraus resultierenden Fahrzeugspezifikationen. Das Sicherheits- und Rettungskonzept ist Teil des übergeordneten Betriebskonzeptes. Dazu sollen mittels Anforderungsanalyse grundsätzliche Prinzipien der Gefahrenabwehr, welche aus Straßen- und Schientunnel bekannt sind, sowie der Arbeitssicherheit analysiert werden. Diese werden anschließend mit den Gegebenheiten in einem Versorgungstunnel verglichen und daraus Anforderungen für das Tunnelfahrzeug abgeleitet.

1.2 Aufbau der Arbeit

Im ersten Teil der Arbeit wird im Kapitel 2 „*Das Projekt ElbX*“ das Bauvorhaben ausführlich beschrieben. Dabei wird auf die Nutzung, die äußere Erschließung, auf bauliche und anlagentechnische Gegebenheiten der Tunnelanlage sowie auf das allgemeine Sicherheits- und Rettungskonzept des ElbX eingegangen. Im Kapitel 3 sind „*Defizite im Sicherheits- und Rettungskonzept*“ hervorgehoben. Im Kapitel 4 „*Methodik und Durchführung*“ werden anschließend die angewandten Methoden erläutert und das Vorgehen skizziert.

Das Kapitel 5 „*Anforderungs- und Informationsquellen*“ stellt die ermittelten Projektbeteiligten und deren Interessen an diesem Projekt dar und geht auf Regeln und Normen, welche für das Projekt relevant sind, sowie Referenzprojekte ein. Im Teil 6 „*Fahrzeugspezifikationen*“ werden die Ergebnisse der analysierten Quellen aus Abschnitt 5 dargelegt und als Anforderungen formuliert.

Anschließend wird in Kapitel 7 „*Fahrzeugkonzept*“ der erste konzeptionelle Prototyp der Firma NOWILAN GmbH, welcher anhand der ermittelten Anforderungen erstellt worden ist, vorgestellt, bewertet und ein möglicher Einsatz im Tunnel beschrieben. Im Schlussteil werden die Ergebnisse in Abschnitt 8 „*Diskussion*“ kritisch betrachtet und Anregungen für die Weiterentwicklung gegeben. Das 9 „*Fazit*“ stellt resümiert die Arbeit abschließend und fasst deren Ergebnisse prägnant zusammen.

1.3 Projektstatus

Diese Arbeit nimmt den Projektstand vom am 24.01.2020 zur Grundlage. Zu diesem Zeitpunkt wurden alle wesentlichen Projektbeteiligten befragt und ein erster Entwurf des Tunnelfahrzeugs lag der Planungsgemeinschaft ElbX vor. Das Projekt ElbX befand sich zum angebenen Zeitpunkt noch im Planungs- und Entwicklungsprozess. Es kann daher keine Gewähr für die Aktualität der bereitgestellten Informationen in Bezug auf den Planungsstand der Tunnelanlage ElbX übernommen werden. Änderungen sind vorbehalten.

2 Das Projekt ElbX

Im Projekt ElbX, das den Bau eines Querungsbauwerk zur Kabelführung von Hochspannungsleitungen unter der Elbe realisieren soll, ist der Übertragungsnetzbetreiber TTG disziplinarisch federführend. Als Planungsgemeinschaft sind WTM Engineers und BabEng von TTG beauftragt, das Bauvorhaben ElbX zu planen und den Bau durchzuführen. Dabei übernimmt schwerpunktmäßig WTM Engineers die Planung des Ingenieursbaus sowie die Entwicklung des Sicherheitskonzepts im Betrieb. BabEng, als Fachfirma im Tunnelbau, realisiert maßgeblich den Tunnelbau.

Neben den Projektpartnern ist die gemeine Öffentlichkeit ein wichtiger Interessent an ElbX. Diese wird nach den Vorgaben des Netzausbaubeschleunigungsgesetzes Übertragungsnetz (NABEG) informiert. Hierbei schafft das NABEG „die Grundlage für einen rechtssicheren, transparenten, effizienten und umweltverträglichen Ausbau des Übertragungsnetzes [...]. Die Realisierung der Stromleitungen [...] ist aus Gründen eines überragenden öffentlichen Interesses und im Interesse der öffentlichen Sicherheit erforderlich.“ (§ 1 NABEG). Nachdem bei der Öffentlichkeit umfassend um Beteiligung geworben wurde, fand im dritten Quartal 2019 ein Erörterungstermin nach § 10 NABEG statt. Eine Entscheidung nach § 12 NABEG steht zum jetzigen Zeitpunkt für das Jahr 2020 aus.

Bei der zeitlichen Dimensionierung des Projekts wird damit gerechnet, dass 2021 mit den ersten Baumaßnahmen begonnen werden kann. Die vollständige Inbetriebnahme des Tunnels ist für das Jahr 2026 vorgesehen.

2.1 Nutzung

Das ElbX ist als Höchstspannungsleitungstunnel und damit als Teil des deutschen Übertragungsnetzes konzipiert, bei dessen Ausfall nachhaltig Versorgungsengpässe zu erwarten wären. Er soll in großen Maßen die Energieversorgung für Teile Deutschlands sicherstellen und wird als kritische Infrastruktur eingestuft (Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe, 2020).

Damit der Tunnel mit seinen Höchstspannungskabel in angemessenem Rahmen gewartet und instandgehalten werden kann, ist der Tunnel so geplant, dass er zu diesen Zwecken begangen werden kann. Das dafür erforderliche und in diesem Zuge geplante Betriebsgebäude dient dem Zugang und

der Versorgung der Anlage, zum Schutz der Anlagentechnik sowie dem Personal als Aufenthaltsraum. Außer zu Wartungs- und Instandsetzungsarbeiten muss die Anlage jedoch nicht betreten werden. Eine dauerhafte personelle Besetzung ist daher weder geplant noch notwendig (ElbX Planungsgemeinschaft 2019b)¹.

2.2 Geografische Einordnung

Das Querungsbauwerk wird im Trassenkorridorsegment (TKS) 13 errichtet. Beginnend im nordöstlichen Teil der Anlage im Landkreis Steinburg in Schleswig-Holstein verbindet es den südwestlichen Gebäudeteil im Landkreis Stade in Niedersachsen. Das Erschließungsbauwerk wird jeweils hinter dem zugehörigen Deich der entsprechenden Elbseite errichtet (Netzausbau, 2020) (Abb. 2).

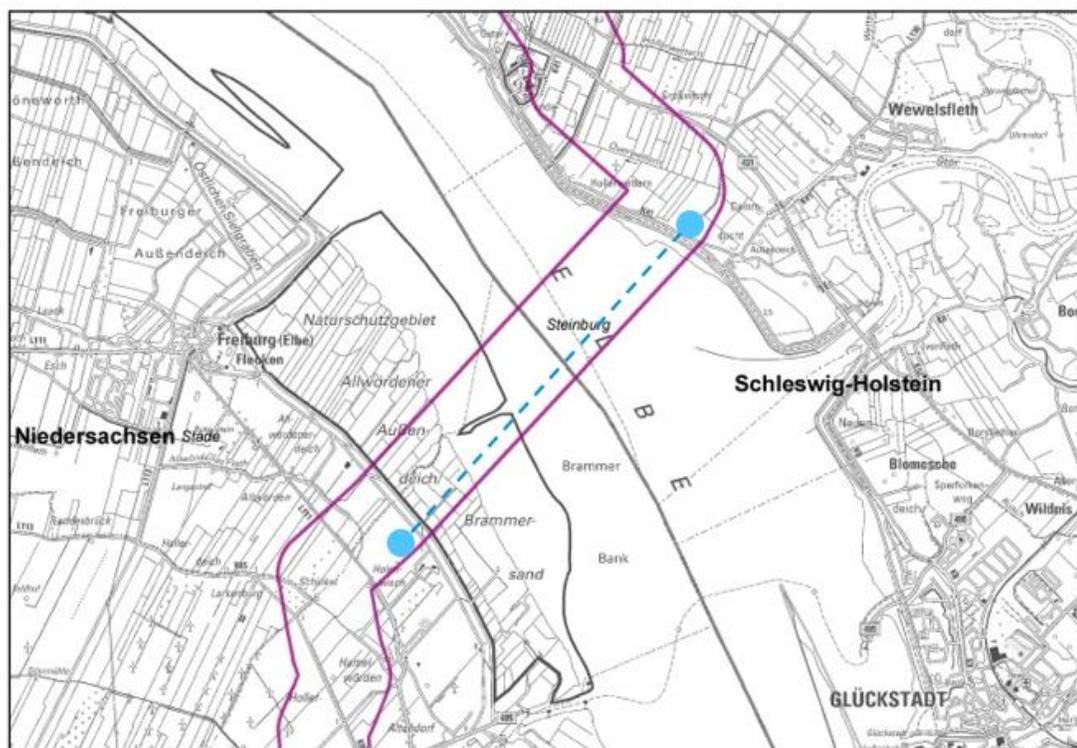


Abbildung 2 Geografische Einordnung: Verlauf des Querungsbauwerk ElbX (blau strichliert) zwischen Wewelsfleth, SH (oberer blauer Punkt) und Freiburg, NDS (unterer blauer Punkt) im TSK 13 (violett).

(ElbX Planungsgemeinschaft 2020)²

¹ Quelle aus dem Intranet (nicht öffentlich zugänglich) von WTM Engineers GmbH

² Quelle aus dem Intranet (nicht öffentlich zugänglich) von WTM Engineers GmbH

2.3 Allgemeiner Aufbau des Querungsbauwerks

Das Querungsgebäude besteht aus zwei äquivalenten Erschließungsbauwerken auf jeder Elbseite. Wesentliche Bestandteile werden jeweils ein Betriebsgebäude, ein unterirdisches Muffenbauwerk und das Schachtbauwerk. Diese sind mit dem Tunnel miteinander verbunden. Die Aufteilung der Bestandteile sind der Abbildung 3 zu entnehmen.

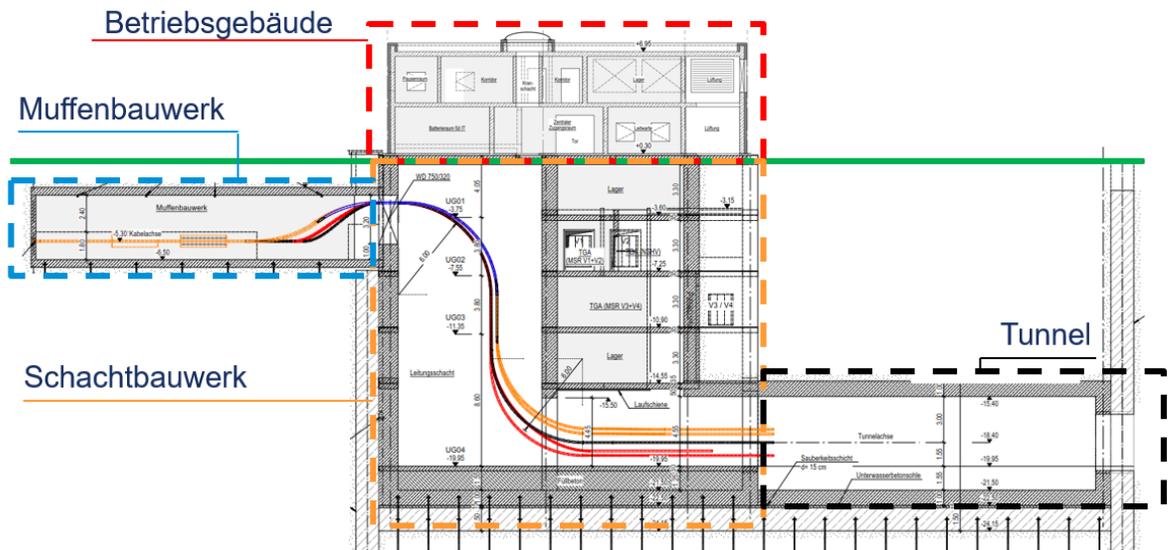


Abbildung 3 Bauwerkquerschnitt: Rot eingefasst liegt oberirdisch das Betriebsgebäude des ElbX, darunter liegend orange eingefasst das Schachtbauwerk mit Anschluss an das Muffenbauwerk mit blauer und dem Tunnel mit schwarzer Umrandung. Die Oberfläche ist grün dargestellt. (In Anlehnung an: ElbX Planungsgemeinschaft 2019a)³

Die Außenanlage wird der Zufahrt von Einsatzkräften und Betriebspersonal sowie der Unterbringung der Löschwasserversorgung dienen. Die gesamte Anlage wird vor unbefugtem Zutritt gesichert sein. Das Muffenbauwerk wird das Verbindungsbauwerk zwischen den Erdleitungen des SuedLinks und den Tunnelleitungen des ElbX sein. Die Planung sieht vor, dass die Leitung innerhalb des Tunnels muffenlos verlegt werden. Die Leitungen werden so nur im Muffenbauwerk durch Verbindungsstücke, den Muffen, mit der Erdleitung verbunden.

³ Quelle aus dem Intranet (nicht öffentlich zugänglich) von WTM Engineers GmbH

Im Betriebsgebäude wird die Haus- und Anlagentechnik untergebracht. Dazu gehört auch die Leitwarte, welche die Überwachung und Kommunikation mit dem Tunnelpersonal gewährleisten soll. Auf dieser können alle weiteren sicherheitstechnischen Anlagen geschaltet werden. Das Betriebsgebäude wird über einen Sicherheitstreppenraum das Schachtbauwerk und den Tunnel erschließen. Der Zugang in den Tunnel erfolgt nach Fertigstellung über eine Sicherheitskaskade im fünften Untergeschoss (Abb. 4). Dabei bilden der notwendige Treppenraum und der Fahrstuhl, welcher auch durch die Feuerwehr genutzt werden kann, die erste Kaskade, gefolgt von einem notwendigen Flur. Dieser soll im Falle eines Brandes den Raucheintritt aus dem Tunnel ins Treppenhaus, beziehungsweise den Fahrstuhlschacht verhindern.

Das Sicherheitstreppenhaus mitsamt Vorräumen stellt baurechtlich einen sicheren Brandabschnitt dar (Nr. 4.2 Muster-Hochhaus-Richtlinie). In diesen werden sich Einsatzkräfte entfalten und Personal aus dem Tunnel hineinflüchten können.

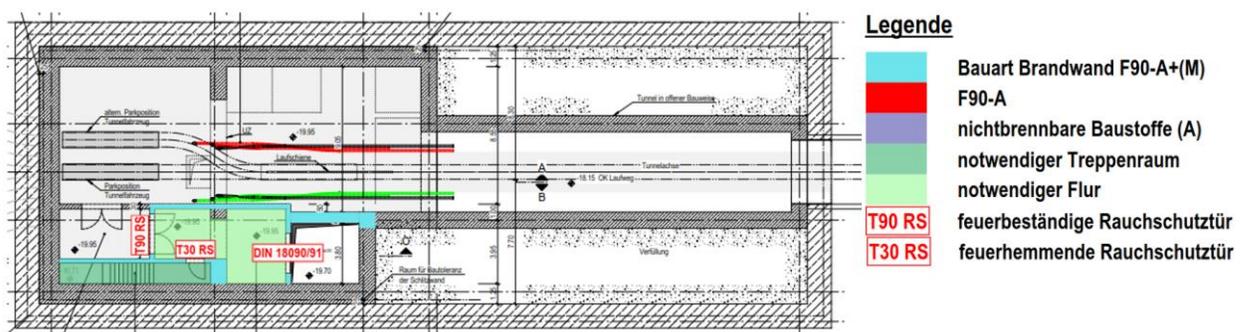


Abbildung 4 Grundriss: Das fünfte Untergeschoss mit dem Sicherheitstreppenhaus, dem Aufzug und dessen Vorraum ist hellblau eingefasst. Die baurechtlich notwendigen Bereiche sind grün hinterlegt. Die Hochspannungskabel innerhalb des Tunnels sind farblich als rote und grüne Linien dargestellt.

(In Anlehnung an: ElbX Planungsgemeinschaft 2019b)⁴

Eine Überdruckschleuse zwischen Flur und Tunnel gewährleistet einen stabilen Druck im Tunnel, welcher verhindert, dass Rauch ins Treppenhaus gelangen kann. Die Tunnellänge beträgt insgesamt 4.630 m und hat eine Nennweite von 4 m. Der Tunnel wird nur über die Sicherheitstreppenträume der jeweiligen Betriebsgebäude erschlossen und verfügt über keine weiteren Notausstiege, Schutzräume oder vergleichbaren baulichen Rettungseinrichtungen (Abb. 5).

⁴ Quelle aus dem Intranet (nicht öffentlich zugänglich) von WTM Engineers GmbH

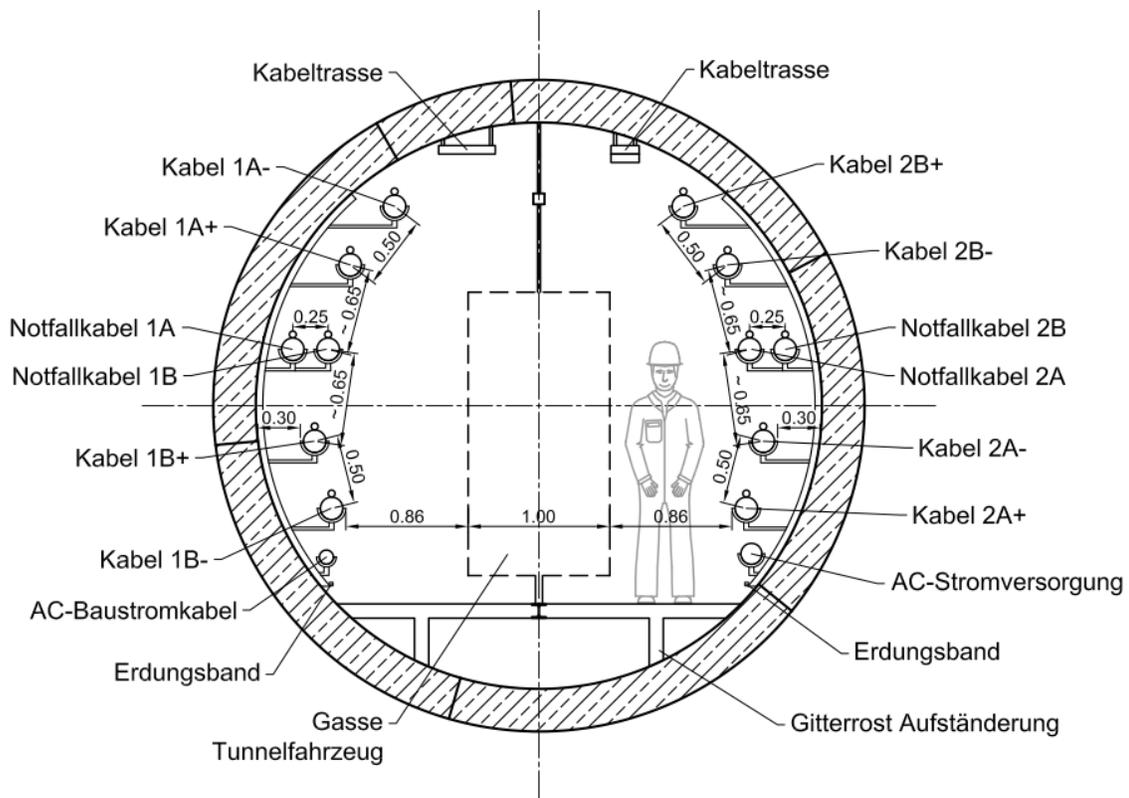


Abbildung 5 Tunnelquerschnitt Variante mit 8 Kabeln: Bei einer Nennweite von 4 m und einer die Verkehrsbreite für das Tunnelfahrzeug von 1 m auf eine Breite von begehbaren Fläche von 2,72 m sind in dieser Variante des Tunnelquerschnitts acht Kabel sowie vier Notfallkabel am Tunnelrand eingezeichnet. Zusätzlich kommen weitere Kabel zur Versorgung der Tunnelanlage und Erdungskabel hinzu (ElbX Planungsgemeinschaft 2019a)⁵.

In dem Tunnel sind vier Systeme mit je zwei Leitungen mit einem Durchmesser von jeweils circa 15 cm sowie vier Notfallleitungen geplant. Da die Ausschreibung für den Kabelhersteller zum Zeitpunkt der Recherche noch nicht abgeschlossen ist, lassen sich noch keine detaillierteren Angaben machen. Es ist davon auszugehen, dass es sich um Kabel handeln wird, welche schwer entflammbar und selbstlöschend sein werden und dem neuesten Stand der Forschung entsprechen. Darüber hinaus ist die Anzahl an weiteren Brandlasten auf ein Minimum reduziert. Es sind ausschließlich die für das Betreiben des Tunnels notwendigen Einbauten vorhanden. Hier seien insbesondere die Beleuchtungs- und die Kommunikationstechnik sowie die Brandmeldeanlage und Sicherheitstechnik genannt. Der Tunnel verfügt auf einer Breite von circa 2,70 m Bewegungs- und Verkehrsfläche.

⁵ Quelle aus dem Intranet (nicht öffentlich zugänglich) von WTM Engineers GmbH

2.4 Sicherheitsrelevante Anlagentechnik

Die Anlagentechnik ist ein elementarer Bestandteil des Sicherheitskonzeptes von Gebäuden und speziell des ElbX. Gerade in Tunnelanlagen ist eine gute Belüftung, eine schnelle Branddetektion und uneingeschränkte Orientierung und Kommunikation, analog zum Straßentunnel, unabdingbar (Brauner u. a. 2014:46–59). Das Brandschutzkonzept des ElbX sieht eine flächendeckende, automatische Brandmeldeanlage mit zusätzlichen Handauslösestellen und eine Aufschaltung zur Leitwarte vor. Zur schnellen Alarmierung dienen Sirenen und Blitzleuchten. Die Alarmierung der Einsatzkräfte erfolgt über die Leitwarte.

Die Fluchtrichtung im Tunnel wird durch eine dynamische Fluchtweglenkung mit Hilfe einer beleuchteten Rettungswegkennzeichnung angezeigt. In Abhängigkeit des Brandentstehungsortes und des Aufenthaltsortes von Personen wird die Fluchtrichtung automatisch ermittelt. Das System ist dabei mit der Brandmeldeanlage und den Ortungsgeräten des Tunnelpersonals gekoppelt. Dies verhindert, dass in Panik oder bei schlechter Sicht eine falsche Fluchtrichtung eingeschlagen wird.

Außerdem besteht zu jeder Zeit eine Sprechverbindung zwischen den Personen im Tunnel und der Leitwarte im Betriebsgebäude. Dies soll über das Kommunikationssystem der Anlage sowie des geplanten Tunnelfahrzeugs gewährleistet werden. Das Kommunikationssystem ermöglicht darüber hinaus den Rettungskräften, über Digitalfunk die Verbindung auch im Tunnel aufrecht zu erhalten.

Das Bauwerk ist über beide Elbufer mit dem Stromnetz verbunden und gewährleistet so eine redundante Stromversorgung über das ganze Bauwerk hinweg. Auf diese Weise wird der Funktionserhalt der sicherheitstechnischen Anlagen und Einrichtungen auch bei Stromausfall auf einer Elbseite gesichert. Dennoch verfügt der Tunnel planmäßig über eine flächendeckende Sicherheitsbeleuchtung, welche über 90 Minuten Sicht ermöglicht. Notfallgeneratoren sind jedoch nicht geplant (J: Nielsen, interne Kommunikation, Januar 2020).

Da die Hochspannungsleitungen Wärme abgeben, muss der Tunnel durchgängig gekühlt werden. Ventilatoren im Schachtbauwerk ziehen dazu Umgebungsluft an und drücken die Luft mit 4 m/s Wettergeschwindigkeit während des Betriebs durch den Tunnel und erreichen so eine ausreichende Kühlung der Anlage. Vor dem Betreten des Tunnels müssen die Ventilatoren so herunter gedrosselt werden, dass während des Aufenthalts eine Wettergeschwindigkeit von 1 m/s herrscht (ElbX Planungsgemeinschaft 2019b). d

Um die Anlage zu schonen, sollen die Ventilatoren im Betrieb abwechseln unter Belastung laufen. So kann bei Bedarf auch die Strömungsrichtung geändert werden. In beiden Schachtbauwerken befinden sich jeweils redundante Lüftungssysteme, um eine Belüftung jederzeit sicher zu stellen.

2.5 Betriebskonzept und Sicherheitskonzept

Das Betriebskonzept und das Sicherheitskonzept dienen der sicheren Organisation der Arbeit: Sie enthalten unter anderem allgemeine Anweisungen wie die Art der Tätigkeiten, Sicherheitsziele und die Gefährdungsbeurteilung sowie weitere Notfallpläne.

Das Betriebskonzept soll einen störungsfreien und sicheren Betrieb des Querungsbauwerk ermöglichen. Es sieht dazu vor, dass der Tunnel zu Wartungs- und Inspektionszwecken betreten wird. Dabei unterscheidet sich die Häufigkeit und Dauer von der Art der Wartung und der Intensität der Inspektion (Tab. 1). Es wird damit geplant, dass der Tunnel regulär vier Mal jährlich betreten wird. Die Aufenthaltsdauer bei Routinetätigkeiten beträgt bis zu einem Tag. Die Reparatur eines defekten Hochspannungskabels kann hingegen bis zu 7 Tagen in Anspruch nehmen.

Tabelle 1: Art der Arbeiten unter Angabe von Mitarbeiterzahl, Ort, Dauer und Häufigkeit (ElbX Planungsgemeinschaft 2019b)⁶.

Tätigkeit	Mitarbeiter	Ort	Dauer	Intervall
Brandmeldeanlage	3	Querungsbauwerk	≤ 1Tag	Vier Mal im Jahr
Beleuchtungstechnik	3	Tunnel	≤ 1Tag	Jährlich
Kommunikationstechnik	3	Querungsbauwerk	≤ 1Tag	Jährlich
Bauwerksprüfung	4	Schacht und Tunnel	-	Alle 3 Jahre
Reparatur (klein)	3	Querungsbauwerk	≤ 1 Tag	Bei Bedarf
Reparatur (groß)	6	Tunnel	≤ 7 Tag	Bei Bedarf

⁶ Quelle aus dem Intranet (nicht öffentlich zugänglich) von WTM Engineers GmbH

Das allgemeine Sicherheitskonzept des ElbX beschreibt zum einem die für das Querungsgebäude geltenden Sicherheitsziele und deren Sicherheitsorganisation, ausführlich. Andererseits bezieht es auch das Anlagenmanagement, die Gefährdungsbeurteilung für die gesamte Anlage sowie das Notfallmanagement mit ein. Angegliedert an dieses Dokument ist ebenfalls der Brand- und Umweltschutz.

Die Sicherheitsziele für das ElbX ergeben sich aus den staatlichen Gesetzen und Verordnungen zu Arbeitsschutz und Umweltschutz und aus der TTG Unternehmensrichtlinie „Safety, Health & Environment“ (SHE). Zentrale Punkte der Gesundheits- und Sicherheitsziele sind die Vermeidung von Unfällen, die Überwachung und Verbesserung der Sicherheit während der Arbeit, die Verminderung von Risiken mittels Gefährdungsbeurteilung sowie die technischen und organisatorischen Maßnahmen zur Unfallverhütung sowie Verhalten in Notfallsituationen (ElbX Planungsgemeinschaft o. J.).

3 Defizite im Sicherheits- und Rettungskonzept

Während der Begutachtung des Vorentwurfs des ElbX mit Blick auf die Arbeitssicherheit und den vorbeugenden Brandschutz sind einige vorhandene Defizite sichtbar geworden, auf die reagiert werden muss. So sollen die Leitung und die Tunnelanlage laut des Betriebskonzeptes regelmäßig inspiziert werden, um einen reibungslosen und kontinuierlichen Betrieb der Anlage zu gewährleisten. Auf der anderen Seite soll aus Aspekten der Arbeitssicherheit der Tunnel so selten wie möglich betreten werden. An dieser Stelle ist eine erste Lücke im Bereich der Sicherheit sichtbar. Eine Inspektion zu Fuß bei einer Länge von 4.650 m stellt sich zusätzlich als nicht zumutbar heraus.

Des Weiteren soll die Anlagen gewartet und im Falle einer Störung instandgesetzt werden können. Während des aufwendigsten Einsatzes im Tunnel, dem großen Reparatursatz, sind neben sechs Personen ebenfalls 20 m lange Ersatzkabel mit jeweils zwei Verbindungsmuffen innerhalb des Tunnels an ihren Einsatzort zu transportieren und zu installieren. Das Gewicht dieser Bauteile, abhängig von den verbauten Kabeln, beläuft sich dabei zum Teil auf über 1000 kg. Ein solches massives Gewicht kann ohne Hilfsmittel nicht ohne Gefährdung der Sicherheit und Gesundheit der Mitarbeitenden vertretbar innerhalb des Tunnels bewegt werden. Neben diesen offensichtlichen Defiziten sind weitere Mängel im Bereich der Arbeitssicherheit aufgefallen. Diese sind detailliert in der Gefährdungsbeurteilung (Kapitel ...) aufgeführt und beschrieben.

Neben den Risiken in Bezug auf die Arbeitssicherheit sind ebenfalls Schwächen im Flucht- und Rettungskonzept hervorgetreten. Betrachtet man dazu unterschiedliche Notfallszenarien wird dieses deutlich. Ein Notfall ist als die drohende oder eingetretene Gefahr für Personen und Anlagen im Sicherheitskonzept des ElbX beschrieben. Da sich unterschiedlich schwere Zwischenfälle ereignen können, werden diese im Folgenden erläutert werden:

Es wird zwischen vier Ereignisgruppen, namentlich Betriebsstörung (S), Unfall (U), Brand (B) und Kritischem Ereignis (K), unterschieden:

S Eine Betriebsstörung ist ein ungewolltes drohendes oder eingetretenes Ereignis, das den regulären Betrieb behindert oder zum Erliegen bringt.

U Ein Unfall ist ein drohendes oder eingetretenes Ereignis, welches eine Gefahr für die körperliche Unversehrtheit von Personen darstellt. Dies kann ein Arbeitsunfall oder eine Erkrankung sein.

B Ein Brand ist ein ungewolltes drohendes oder eingetretenes Ereignis, bei dem unkontrollierte Hitze freigesetzt wird. Dies kann unter Flammen- und Rauchbildung geschehen.

K Ein kritisches Ereignis ist ein ungewolltes drohendes oder eingetretenes, von außen wirkendes, Ereignis, das mit den vorhandenen Mitteln nicht kontrollierbar ist.

Tabelle 2 Die Notfallszenarien Betriebsstörung, Unfall, Brand und Kritisches Ereignis mit Erläuterungen und Beispielen, eingeteilt in Ereignisgruppen und im Stufensystem zueinander abgegrenzt.

Ereignisgruppe		Beschreibung		Beispiel
S	Betriebsstörung	B.1	Betriebsstörung – ohne direkten Einfluss auf die Sicherheit	Funktionsausfall von Arbeitsmitteln, Spannungsdurchschlag ohne Personenschaden
		B.2	Betriebsstörung – in einem redundanten oder sicherheitskritischen System	Ausfall der Lüftungsanlage, Funktionsausfall des Tunnelfahrzeugs, Stromausfall auf einer Elbseite, Ausfall der Leitwarte
U	Unfall	U.1	Unfall – transportfähig	Übelkeit, Fraktur der Extremitäten, Schlaganfall
		U.2	Unfall – nicht transportfähig	Kreislaufstillstand, Verletzung der Wirbelsäule
B	Brand	B.1	Brand – mit Eigenmitteln löschar	Entstehungsbrand
		B.2a	Brand – nicht einzudämmen	Voll entwickelter Brand
		B.2b	Brand – nicht einzudämmen	Brand des Tunnelfahrzeugs
K	Kritisches Ereignis	K.1	Kritisches Ereignis – ausgelöst durch Menschen	Einbruch, Sabotage, Vandalismus, Terrorismus
		K.2	Kritisches Ereignis – ausgelöst durch höhere Gewalt	Wetterumschwung, unerwartete Flut, Erdbeben

Mittels eines Stufensystems werden diese Szenarien funktional weiter voneinander abgegrenzt. Indikatoren für die Unterteilung sind bei einer Betriebsstörung die Schwere der Auswirkung auf die Sicherheit der Tunnelanlage und des Personals. Die Frage, die an dieser Stelle beantwortet werden muss, ist, ob das Tunnelpersonal ihre Tätigkeit einstellen und den Tunnel unmittelbar verlassen muss oder die andauernde Tätigkeit zu Ende geführt werden kann. Befindet sich eine Person während einer Betriebsstörung in Mitten der Anlage bei einer Tunneltiefe von circa 2300 m und muss die Anlage verlassen, benötigte sie bei einer Geschwindigkeit von 1 m/s etwa 40 Minuten. Dieses im Falle eines kritischen Ereignisses deutlich zu lange.

Bei einem Unfall oder einer Verletzung einer Person im Tunnel ist der entscheidende Faktor die Transportfähigkeit des Betroffenen, beziehungsweise, ob das vorhandene verbliebene Personal in der Lage ist, den Verletzten allein aus dem Tunnel retten zu können. Demgegenüber steht die Entscheidung, ob Einsatzkräfte zur Versorgung und Rettung den Tunnel betreten müssen. Da bei einem Unfall, unabhängig von der Schwere der Verletzung, die Tunnelanlage unverzüglich zu verlassen ist und Einsatzkräfte allarmiert werden sollen, ist eine Unterscheidung in zeitkritisch und unkritisch an dieser Stelle nicht notwendig. Dass sich möglichst wenige Personen in der Tunnelanlage aufhalten sollen, gilt auch im Notfall für Einsatzkräfte wie den Rettungsdienst. Daher sollten diese nur bei berechtigter Indikation den Tunnel betreten. Dies ist der Fall, wenn ein Transport von der Unfallstelle mit den vor Ort bereitstehenden Mitteln nicht adäquat erfolgen kann oder der Patient nicht stabil ist. Das ist zum Beispiel bei einer Verletzung der Wirbelsäule der Fall, bei der eine Rettung beispielsweise mittels Vakuummatratze erfolgen muss oder bei einem Kreislaufstillstand, bei der die Reanimation gegenüber dem Transport Vorrang hat. Bei einem solchem Szenario kann jedoch gemäß dem vorliegenden Konzept nicht adäquat reagiert werden. Ein Transport einer verletzten oder erkrankten Person ist zu Fuß und ohne Hilfsmittel bei einer Strecke von 2300 Metern nicht vorstellbar. Auch das Mitführen von Erste-Hilfe-Mitteln auf dieser Länge ist nicht denkbar.

Ein Brand innerhalb der Tunnelanlage stellt für das Tunnelpersonal ein besonders großes Risiko dar. Dabei wird jedoch wesentlich zwischen zwei Phasen eines Brandes unterschieden (Abb. 11). Dieses ist zum einen der Entstehungsbrand und zum anderen der voll entwickelte Brand. Der Übergang, der sogenannte Flashover, ist gekennzeichnet durch einen schlagartigen Anstieg der Hitzeentwicklung und nur noch schwer einzudämmen. Ein Entstehungsbrand, gerade in der Zündphase,

ist auch in der Schwellbrandphase noch zu kontrollieren und mittels Feuerlöscher zu löschen. Daher wird im Sicherheitskonzept zwischen Entstehungsbrand und voll entwickeltem Brand unterschieden (Zürcher & Frank 2018). In allen Phasen eines Brandes kommt es zu einer toxischen Rauchentwicklung.

Bei einem Brand in einem Autotunnel beispielsweise entwickelt sich pro Sekunde 200 m³ Rauch mit einer Geschwindigkeit von bis zu 20 km/h (Bargon & Scholl 2007:283) und ist im Brandfall die größte Gefahr für das Personal.

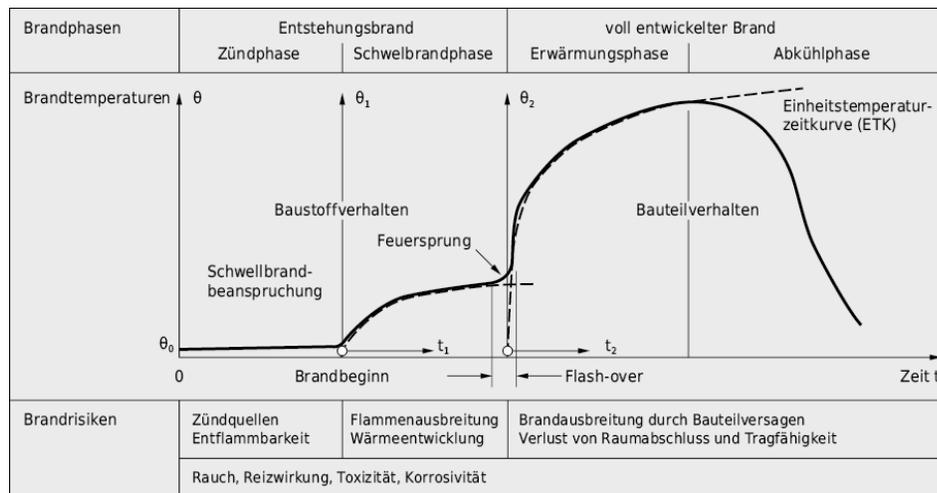


Abbildung 6 Typischer Brandverlauf am Beispiel eines Naturbrandes (Zürcher & Frank 2018).

Rauch und Hitze verteilen sich für gewöhnlich in einem Tunnel nicht gleichmäßig. Eine Lüftung wirkt sich darauf in mehrere Hinsichten aus: So können sich, beeinflusst durch die Längsströmung der Belüftungsanlage, die Temperaturen und Rauchmengen auf der An- und Abströmseite erheblich unterscheiden. Die Anströmseite ist die Seite, aus der Luft durch den Tunnel geführt wird, und die Abströmseite jene, aus der die Luft aus dem Tunnel gelangt. Dabei treten zwei Effekte auf: Zum einen kühlt die hereinströmende Luft den Bereich vor dem Brandereignis und behindert die Rauchausbreitung und zum anderen führt der Luftstrom Hitze und Rauch auf der abströmenden Seite ab (Brauner u. a. 2014:64–69). Allerdings versorgt die Belüftung in diesem Fall das Feuer auch weiterhin mit Sauerstoff. Für das Sicherheitskonzept überwiegt dieser Einfluss, weshalb im Falle des ElbX vorgesehen ist, dass die Belüftungsanlage unverzüglich abgestellt wird. Auch in

diesem Notfallszenario kann das Tunnelpersonal ohne zusätzliche Hilfsmittel weder einen Entstehungsbrand löschen noch sich vor der toxischen Wirkung des Rauches schützen. Eine Flucht aus der Mitte des Tunnels während eines Brandes ist in der jetzigen Situation nicht sicher.

Unter der letzten Kategorie, den Kritischen Ereignissen, werden eine Vielzahl von Situationen zusammengefasst. Dabei wird unterschieden, wie das Ereignis ausgelöst wird: durch Dritte, wie Sabotage oder Terrorismus, oder beispielsweise durch höhere Gewalt. Ein Beispiel hierfür ist ein überraschendes Flutereignis oder Erdbeben. Wie während einer Betriebsstörung ist hier ein geordnetes, aber schnelles Verlassen des Tunnels wichtig, das ebenfalls ohne Hilfsmittel nicht zu gewährleisten ist.

Um diese Defizite im Sicherheitskonzept zu schließen, soll ein Tunnelfahrzeug konzipiert werden. Die Integration des Tunnelfahrzeuges in das Rettungs- und Sicherheitskonzept des ElbX stellt einen wesentlichen Pfeiler für die Sicherheit des Tunnelpersonals dar.

4 Methodik und Durchführung

Um ein Tunnelfahrzeug als integralen Bestandteil des Sicherheits- und Rettungskonzeptes ElbX konzeptionell zu entwickeln, wurde eine qualitative Untersuchung durchgeführt. Literaturrecherche sowie Leitfadeninterviews der Projektbeteiligten (Vgl. 1.1 Projektbeteiligte) dienten als zentrales Werkzeug der Arbeit. Das halbstrukturierte themenzentrierte Leitfadeninterview zeichnet sich dadurch aus, dass im Vorfeld ein Gesprächsleitfaden erarbeitet wird und dass während des Interviews themenzentriert auf das Fokusthema hin moderiert wird (Endres o. J.). Dabei war der Leitfaden der Befragung die Vorstellung des Projekts. In der halb-standardisierten Interviewform kann der Befragte frei antworten und ist nicht durch einen Fragebogen eingeschränkt. Sie ermöglicht es, flexibel auf den Gesprächsverlauf zu reagieren. Die Befragung der Projektbeteiligten orientierte sich an folgender Leitfrage: Wie können die Defizite im Sicherheits- und Rettungskonzept (Vgl. 1 Defizite im Sicherheits- und Rettungskonzept) – unter Beachtung der Kosten, technischen Machbarkeit und unter Abwägung der Vor- und Nachteile – durch das Tunnelfahrzeug kompensiert werden? Die anschließende Analyse folgte über die Ergebnisprotokolle der Interviews mit Blick auf die vorangestellte Leitfrage.

Als Ausgangslage der Untersuchung dient der Projektentwurf des ElbX, wie er im Kapitel 2 beschrieben ist. Um einen Überblick über die rechtlichen Voraussetzungen zu erhalten, wurden im Zuge der Literaturrecherche die in Bezug auf Flucht und Rettung relevanten Richtlinien und Gesetze herausgesucht. Die Internetpräsenz der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin sowie der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung waren wesentliche Quellen. Fachliteratur, in denen spezielle Techniken der Tunnelrettung und deren Schwierigkeiten thematisiert werden, sowie Tunnelanlagen mit ähnlichen Sicherheitskonzept wurden ebenfalls erfasst. Spezifische Literatur und Gesetze zum Thema Rettung und Flucht aus einem Versorgungstunnel ließen sich nicht in Publikationsverzeichnissen und Datenbanken finden.

Da zu diesem Thema keine einschlägige Literatur und Regelwerke existieren, wurden zusätzlich alle maßgeblich am Projekt beteiligten Personen mit Erfahrung und Zuständigkeiten im Bereich Arbeitssicherheit und medizinischer Gefahrenabwehr in halbstandardisierten Leitfadeninterviews befragt. Die Gespräche wurden entsprechend der oben erläuterten Vorgehensweise in den Räumlichkeiten der jeweiligen Behörde und Organisationen sowie in den Konferenzräumen von WTM Engineers GmbH durchgeführt.

Ziel war es, alle relevanten Projektbeteiligten zum Thema zu befragen, um neue Erkenntnisse hinsichtlich der technischen und organisatorischen Anforderungen zu gewinnen. Dazu wurde den Befragten ausführlich der aktuelle Projektstand des gesamten Querungsbauwerks vorgestellt (Vgl. 2 Das Projekt ElbX). Die Befragten hatten jederzeit die Möglichkeit, Zwischenfragen zu stellen und Anmerkungen zu geben. Sie wurden aktiv aufgefordert, ihre Einschätzung zu den jeweiligen Aspekten zu geben. Darüber hinaus wurden keine standardisierten Fragen gestellt. Vielmehr wurde die Methode des Brainstormings als Methode gewählt, um die Aspekte des Projekts zu beleuchten (Mai 2020). Da häufig nicht nur das Tunnelfahrzeug, sondern das gesamte Bauwerk thematisiert wurde, belief sich der Zeitrahmen der Interviews auf jeweils bis zu 1,5 Stunden. Die Interviews wurden anhand der Notizen, welche während des Gesprächs gemacht wurden, zu einem Ergebnisprotokoll zusammengefasst und an die Teilnehmer verschickt. Diese hatten zu einem späteren Zeitpunkt die Möglichkeit, zusätzlich etwas zu ergänzen oder zu korrigieren. Entsprechende Änderungsbedarfe wurden jedoch nicht angemeldet. Nachdem alle Daten ermittelt waren, wurden die Daten aus Literaturrecherche und Befragung dahingehend analysiert, inwieweit die erhobenen Informationen zu einer Steigerung der Sicherheit beitragen und sich als Anforderung an das Tunnelfahrzeug formulieren lassen.

Zur einfacheren Strukturierung und Dokumentation der Ergebnisse aus den o.g. Interviews wurden die Anforderungen auf ihr Spezifikationslevel hin unterschieden (Vgl. 6 Fahrzeugspezifikationen). Dabei werden die Detailebenen der jeweiligen Anforderung von den groben Systemzielen hin zu detaillierteren Anwenderanforderungen differenziert (Kluge 2018). In der Informatik wird darüber hinaus häufig noch in funktionale und nicht funktionale Anforderungen unterschieden. Nach Ansicht des Autors führt dies in dem vorliegenden Projekt jedoch nicht zu einer verbesserten Übersicht und wurde daher nicht angewandt.

Als Grundlage zur Formulierung von Anforderungen dient Die SOPHIST-Satzschablone (Kluge, 2016). Diese folgt dabei einem immer gleichen Aufbau (Abb. 6). Dabei wird zuerst benannt, welches System gemeint ist und anschließend in welchem Verbindlichkeitsgrad diese Anforderung umgesetzt werden soll: ob das System selbstständig dies ausführen, einem Akteur die Möglichkeit bieten oder als Schnittstellen fungieren soll. Als letzten Teil der Wortschablone wird festgelegt, was das System genau leistet.

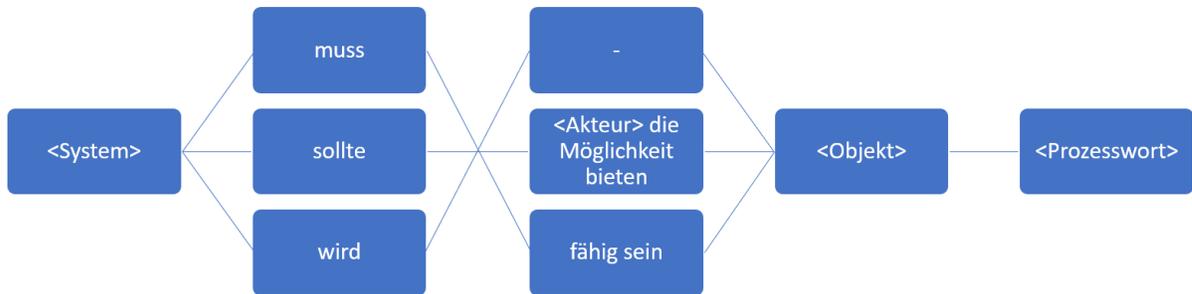


Abbildung 7 Die SOPHIST-Satzschablone dient der standardisierten Formulierung von Anforderungen (Kluge 2016)

Nachdem durch die Fachfirma NOWILAN GmbH ein erster konzeptioneller Prototyp anhand der ausgearbeiteten Vorgaben erstellt wurde, folgte eine weitere Analyse und erste Anforderungsrevision. Anhand der erhobenen Daten und der ermittelten und dokumentierten Fahrzeuganforderung konnte parallel zum Erstellen des Prototypens der organisatorische Ablauf der Flucht und Rettung entworfen werden, sodass dieser in das Sicherheits- und Rettungskonzept des ElbX integriert werden kann.

5 Anforderungs- und Informationsquellen

Anforderungen beschreiben unterschiedliche Aspekte eines Systems, welche die Grundlage eines erfolgreichen Projektentwurfs bilden. Das Gesetz über die Durchführung von Maßnahmen des Arbeitsschutzes zur Verbesserung der Sicherheit und des Gesundheitsschutzes der Beschäftigten bei der Arbeit (Arbeitsschutzgesetz - ArbSchG) fordert als Mindeststandard für Anforderungen an ein System, dass „[...] der Stand von Technik, [...] sowie sonstige gesicherte arbeitswissenschaftliche Erkenntnisse zu berücksichtigen“ sind (§4 Abs.3 ArbSchG).

Die Forderung des ArbSchG wird dabei dahingehend erfüllt, dass

- zu einem frühestmöglichen Zeitpunkt Projektbeteiligte mit berechtigtem Interesse gehört und berücksichtigt sind,
- bestehende Gesetze und Normen zur Anwendung kommen und
- vergleichbare Projekte, die erfolgreich im Betrieb erprobt wurden, betrachtet sind.

Diese bilden im Wesentlichen die Anforderungs- und Informationsquellen, aus denen sich auch alle anderen Leistungsanforderung für das zu entwickelnde Tunnelfahrzeug ElbX ergeben. Diese sind in den folgenden Kapiteln ausführlich beschrieben.

5.1 Projektbeteiligte

Die Projektbeteiligten sind all jene Personengruppen, Organisationen und Behörden, welche an der Umsetzung eines funktionierenden Rettungs- und Sicherheitskonzeptes Interesse haben oder indirekt Einfluss auf diese nehmen. Diese seien in ihrer Funktion und ihrem möglichen Einfluss im Folgenden kurz aufgeführt:

Die Bauaufsichten in Schleswig-Holstein und Niedersachsen sind die Genehmigungsbehörden und haben unter anderem bei der Errichtung von Anlagen darüber zu wachen, dass die öffentlichen-rechtlichen Vorschriften und Anordnungen ordnungsgemäß eingehalten werden (§59 LBO, §59 NBauO).

Die Staatliche Arbeitsschutzbehörde bei der Unfallkasse Nord in Schleswig-Holstein und die niedersächsische Gewerbeaufsicht sind beratende und überwachende Behörden, welche sich primär

um den Arbeits- und Gesundheitsschutz bemühen. Dabei achten sie auf die Umsetzung der Rechtsvorschriften zum Arbeitsschutz (Gewerbeaufsichtsamt Göttingen 2020; Unfallkasse Nord 2020).

Die freiwilligen Feuerwehren der anliegenden Kreisgemeinden Steinburg (SH) und Freiburg (NDS) übernehmen als Organisationen des abwehrenden Brandschutzes und der Gefahrenabwehr die Lösch- und Rettungsmaßnahmen vor Ort und erfüllen auf diese Weise die Forderungen der Länder gemäß den jeweiligen Brandschutzgesetzen.

Ihre Einschätzung und Expertise sind maßgeblich dafür, inwieweit die Anforderungen, die das Tunnelfahrzeug auch im Falle eines Brandes für etwaige Personenrettungen erfüllen muss, den sicherheitsrelevanten Standards entsprechen. Des Weiteren ermöglichen und unterstützen die Feuerwehren von SH und NDS bei einer Rettung.

Die Rettungsdienst-Kooperation in Schleswig-Holstein (RKISH) sowie das Deutsche Rote Kreuz (DRK) mit Kreisverband in Stade in Niedersachsen übernehmen für die jeweiligen Landkreise die rettungsdienstliche Versorgung. Somit sind die RKISH und das DRK für die medizinische Erstversorgung im Falle eines Unfalles oder einer Erkrankung zuständig (Rettungsdienst-Kooperation in Schleswig-Holstein 2020; DRK-Kreisverband Steinburg e.V. 2020). Die Verbände können mit ihren medizinischen Erfahrungen einen weiteren Beitrag leisten. Dabei greift die RKiSH auf bestehende Erfahrungen mit den Forschungsanlagen des *DESY*⁷ zurück (Vertreter RKiSH, persönliche Kommunikation, 24.01.2020). Die jeweiligen Feuerwehr- und Rettungsdienstleitstellen der Landkreise haben als übergeordnete Stelle der Feuerwehren und Rettungsdienste ebenfalls ein begründetes Interesse, dass das Sicherheitskonzept des ElbX kohärent gestaltet ist.

Die TTG ist als Auftraggeber und Betreiber des ElbX für die Sicherheit des Betriebs gesetzlich verantwortlich. Hierdurch besteht ein ureigenes Interesse daran, dass zum einen der Betrieb der Anlage reibungslos verläuft und zum anderen die gesundheitliche Unversehrtheit seiner Mitarbeiter zu jedem Zeitpunkt gewährleistet wird. Des Weiteren soll eine Rettung aus der Anlage jederzeit möglich sein (§3 ArbSchG). Demnach enthält der Erfolg, dass das Rettungs- und Sicherheitskonzept funktioniert, eine hohe Prozessgewichtung für das Projekt ElbX. Als Betreiber besitzt TTG

⁷ Deutsches Elektronen-Synchrotron; eine Forschungseinrichtung, die mehrere unterirdische Forschungsanlagen in kilometerlangen Tunneln betreibt

weitreichende Kompetenzen, die zum Erfolg beitragen. Mit Erfahrung aus der Windkrafttechnologie im Off- und Onshore Bereich kann TTG sicherheitstechnisches Fachwissen einbringen.

WTM ist als beauftragtes Unternehmen vertraglich für die Umsetzung des Bauvorhabens verantwortlich. In diesem Sinne ist WTM durch die Vertragstreue verpflichtet, alle Vorschriften einzuhalten und ein Rettungs- und Sicherheitskonzept im Sinne der TTG TSO zu erstellen. Des Weiteren sind verschiedene Personengruppen von WTM in den projektkritischen Teilbereichen des Bauvorhabens zuständig. Hieraus bildet sich eine interne Projektgruppe, welche beratend für den jeweiligen anderen Fachbereich zu Verfügung steht.

Die NOWILAN GmbH ist Teil der SMT Scharf Unternehmensgruppe und Spezialist für unterschiedliche Tunnelbahnen und Spezialmaschinen. NOWILAN konstruiert nach den Anforderungen von TTG und WTM das Tunnelfahrzeug und die dazugehörige Infrastruktur. Mit dem spezifischen Fachwissen im Fahrzeugbau vervollständigt dieser Partner das Projektteam.

5.2 Vorschriften, Regeln und Dokumente

Viele Anforderungen an Systeme sind in Vorschriften und Regeln bereits festgehalten und stellen hohe Ansprüche an Sicherheit und Gesundheitsschutz. Neben gesetzlichen Vorgaben gibt es weitere Informationsquellen, die beim Ermitteln der Anforderungen unterstützend sind.

Die Arbeitsstättenverordnung (ArbStättV) „dient der Sicherheit und dem Schutz der Gesundheit der Beschäftigten“ (§1 Abs.1 ArbStättV) und ist damit maßgeblich für die Gestaltung von Arbeitsstätten. Die Unfallverhütungsvorschriften (DGUV) und Technischen Regeln für Arbeitsstätten (ASR) befassen sich ebenfalls mit der Gestaltung von Arbeitsstätten und dem Schutz von Beschäftigten.

Dabei beinhaltet die überwiegende Mehrheit der Vorschriften keine quantitativen Angaben, sondern sind am Schutzziel orientiert. Diese Vorschriften haben Gesetzescharakter und müssen im Sinne des Schutzziels für Arbeitsstätten umgesetzt werden. Aus den Forderungen der Vorschriften und Regeln lassen sich direkt verpflichtende Anforderungen an das Tunnelfahrzeug ableiten.

Neben den gesetzlichen Forderungen gibt es weitere wichtige Grundlagen, zum Beispiel einschlägige Fachliteratur aus dem Bereich Gefahrenabwehr. TTG hat außerdem eigene Sicherheitsrichtlinien (TenneT TSO GmbH 2019), welche in diesem Bauvorhaben Beachtung findet. Außerdem

dienen die Ergebnisprotokolle der Besprechungen der internen Projektgruppe, sowie eine Befragung der Projektbeteiligten, als Anforderungsquelle.

5.3 Vergleichsprojekte

Vergleichbare Projekte, welche erfolgreich in Betrieb genommen sind, spiegeln den Stand der Technik wider. Mitunter unterscheiden sich die rechtlichen Gegebenheiten innerhalb der Bundesländer und zwischen den Staaten der Europäischen Union stark, sodass eine direkte Übernahme der Anforderungen nicht möglich ist. Des Weiteren ist die Komplexität des Bauvorhabens ein Kriterium, anhand dessen die Vergleichbarkeit gering ist. Infolgedessen ist die Anzahl an vergleichbaren Projekten für das ElbX-Projekt niedrig.

Dennoch kann zwischen dem ElbX und einem spanisch-französischer Hochspannungsleitungstunnel, welcher die Pyrenäen quert, Vergleichbares entdeckt werden. Der 8,5 km lange Tunnel verfügt wie das ElbX ebenfalls über keinerlei Zwischenausstiege und ähnelt auch bei anderen technischen Spezifikationen dem ElbX: So nutzt der Tunnel ebenfalls zwei schienengeführte Tunnelfahrzeuge, welche einen Wartungsbetrieb ermöglichen. Auch im Bereich der Messtechnik lassen sich Erkenntnisse gewinnen, da das Fahrzeug ebenfalls zur Ferninspektion von Hochspannungsleitung eingesetzt wird und ähnliche Messtechnik besitzt. Jedoch ist das spanisch-französische Tunnelfahrzeug mit einer Breite von 1,8 Metern in seinen Ausmaßen deutlicher größer. So lässt die Bauweise des ElbX im Vergleich lediglich eine Fahrzeugbreite von maximal 1,0 Meter zu. Zudem verfügt das spanisch-französische Fahrzeug über keine Möglichkeiten adäquat auf ein Brandereignis im Tunnel zum Beispiel über eine Löschvorrichtung zu reagieren (ARÉVALO 2016).

Ein weiterer Versorgungstunnel, bei dem eine Tunnelbahn zum Einsatz kommt, ist der Teilabschnitt UW Friedrichshain - UW Marzahn der 380 kV Diagonalverbindung in Berlin des Übertragungsnetzbetreiber 50Hertz. Der Tunnel ist mit 5,2 km ähnlich lang wie der ElbX, verfügt jedoch über insgesamt vier Schachtbauwerke in einem Abstand von maximal 2,2 km. Die Aufgaben der Tunnelbahn der Diagonalverbindung ist es, wie auch bei dem ElbX, bemannte und unbemannte Inspektionsfahrten durchzuführen. Darüber hinaus verfügt sie über eine Feuerlöschanlage für den Löscheinsatz. Allerdings ist die direkte Vergleichbarkeit durch einige Faktoren, wie auch bei dem spanisch-französischen Tunnel, gering. So erstreckt sich die maximale Entfernung zwischen zwei

sicheren Ausgängen auf maximal 2,2 km. Das ist weniger als die Hälfte als beim ElbX. Des Weiteren verfügt Berlin aufgrund des dichten U-Bahn-Netzes über eine im Umgang mit Tunnelbauwerken erfahrene Berufsfeuerwehr, auf die das ElbX nicht zurückgreifen kann. Es gibt ebenfalls signifikante Unterschiede in der Konstruktion der Tunnelbahn. So ist die Berliner Tunnelbahn nicht schienengeführt, sondern als Hängebahn konstruiert. Sie ist schmaler als das für ElbX geplante Fahrzeug und verfügt über weniger Sitzplätze, die hintereinander angeordnet sind. Das gesamte Tunnelbahnsystem besteht zwar aus einem Materialtransporter und einer Rettungsfahrzeug, die Module werden jedoch nur im Bedarfsfall mitgeführt und sind demnach nicht unmittelbar verfügbar. Ein weiterer Unterschied liegt in der Kühlung der Leitung. Diese werden für das Berliner Bauwerk in der 380 kV Diagonalverbindung, anders als im ElbX, mittels Wasserkühlung realisiert. Dabei hat die Kühlung durch Ventilation einen direkten Einfluss auf das Brandverhalten im Tunnel (vgl. 3 Defizite im Sicherheits- und Rettungskonzept) (50 Hertz Transmission GmbH o. D.).

6 Fahrzeugspezifikationen

Die Fahrzeugspezifikationen stellen das Grundgerüst für die Entwicklung des Tunnelfahrzeuges dar, anhand dessen Erfüllungsgrad sich eine erfolgreiche Umsetzung des Projekts messen lässt. Seine Spezifikationen gliedern sich durch die Anforderungen von Level 0 bis 3. Im Spezifikationslevel 0 (5.1) wird der Zweck des Systems definiert, im Level 1 (5.2) Anforderungen, welche sich aus dem Anlagenkonzept und Anwendungsfällen ergeben, im Level 2 (5.3) Nutzer- und Betriebsanforderung und im Level 3 (5.4) detailreichere Nutzer- und spezifische, technische Anforderungen.

Da das zur Flucht- und Rettung entwickelnde Fahrzeug in enger Verknüpfung mit den Spezifikationen der Leitwarte und im Kontext zu dem betrieblichen Nutzen steht, werden an dieser Stelle ebenfalls Fahrzeugspezifikationen entwickelt und diskutiert, welche in Bezug zu diesen stehen.

6.1 Spezifikationslevel 0

Das Spezifikationslevel 0 beinhaltet Anforderungen, die das Systemziel definieren. Die Spezifikationen beschreiben grob, welchem Zweck das System dienen und welche Fähigkeit das Tunnelfahrzeug im Wesentlichen besitzen soll. Es ist somit das erste Entwicklungsziel, aus dem sich im Kern alle weiteren Anforderungen ableiten lassen.

Um das Risiko eines Unfalls oder Schadens für das Tunnelpersonal möglichst niedrig zu halten, soll die Expositionszeit im Tunnel für alle Mitarbeiter auf ein Minimum reduziert werden. Daher ist eine wesentliche Forderung von TTG TSO an das Tunnelfahrzeug, dass dieses die Inspektionen der Tunnelanlage und vor allem der Hochspannungsleitungen unbemannt durchführen kann. Der Wunsch ist, dass letztlich lediglich zu Wartungs- und Instandhaltungsarbeiten der Tunnel betreten werden muss. Dies stellt vor allem Anforderungen an die Mess-, Video- und Datentechnik des Fahrzeugs und an die Leitwarte stellen.

Um Wartungs- und Instandhaltungsarbeiten durchführen zu können werden Mitarbeiter im Tunnel benötigt. Diese sollen durch das Tunnelfahrzeug an ihren Bestimmungsort verbracht werden können. Dies schließt das sichere Betreten, den Transport aller Mitarbeiter und deren Arbeitsmittel, sowie das Bereitstellen von Hilfsmitteln zur ergonomischen Arbeit ein.

Der begrenzte Platz für das Tunnelfahrzeug wird dabei voraussichtlich, die limitierende Kenngröße darstellen. Das Tunnelfahrzeug muss daher unter bestmöglicher Ausnutzung des Raumes gestaltet sein.

Bei allen Planungen und Entwicklungen steht die Sicherheit und die Gesundheit der Mitarbeiter im Zentrum. Aufgrund der Ausdehnung des Tunnels stellt dieser keinen gewöhnlichen Arbeitsplatz dar und eine Reihe von Anforderungen aus dem Bereich der Arbeitssicherheit muss durch das Tunnelfahrzeug erfüllt werden können wie zum Beispiel das Bereitstellen von Erste Hilfe-Mitteln. Ebenfalls muss das Tunnelfahrzeug, aufgrund der baulichen Gegebenheiten des Tunnels (2.3) die Rettung und Flucht, beispielsweise im Rahmen eines Brandereignisses oder einer plötzlichen Erkrankung einer Person im Tunnel, ohne die Unterstützung von externen Einsatzkräften gewährleisten werden können (Kap. 5.2 Abs. ASR A4.3: Erste-Hilfe-Räume, Mittel und Einrichtungen zur Ersten Hilfe). Das Tunnelfahrzeug und die Ausführungen müssen dabei, entsprechend gesetzlicher

Forderungen, in allen Belangen mindestens dem Stand der Technik entsprechen. Daraus ergeben sich folgende Anforderung des Spezifikationslevels 0:

- 0.1** Das Tunnelfahrzeug muss unbemannte Inspektionen durchführen können.
- 0.2** Das Tunnelfahrzeug muss dem Personal die Möglichkeit bieten, Wartungs- und Instandsetzungsarbeiten im Tunnel durchzuführen können.
- 0.3** Das Tunnelfahrzeug muss in der Lage sein, dem Tunnelpersonal die Möglichkeiten zu bieten, sich aus dem Tunnel selbst zu retten.
- 0.4** Das Tunnelfahrzeug muss dem Stand der Technik entsprechen.

6.2 Spezifikationslevel 1

Das Spezifikationslevel 1 beinhaltet Anforderungen mit einem insgesamt noch niedrigen Detaillierungsgrad, welche sich aus Anwendungsfällen und ersten Konzepten ergeben. Sie geben die konzeptionelle Richtung des Systems vor und ermöglichen dem Entwicklerteam bereits in einem frühen Stadium zielgerichtet zu planen.

Das Herzstück und die koordinierende Stelle des ElbX stellt die Leitwarte dar. In ihr sollen alle zentralen Informationen bezüglich der Tunnelanlagen einfließen und abgerufen werden können. Ebenso soll von dieser Stelle aus das Tunnelfahrzeug gesteuert werden können. Um eine unbemannte Inspektion durchführen zu können, benötigt das Tunnelfahrzeug eine geeignete Ausstattung, die das ermöglicht. Dazu ist ein hochwertiges Kamerasystem notwendig. Des Weiteren muss die Leitwarte auf alle wesentlichen Funktionen des Tunnelfahrzeugs wie die Steuerung und Kameratechnik zugreifen können.

Um den Datenaustausch zwischen dem Tunnelfahrzeug und der Leitwarte zu gewährleisten, benötigt der Tunnel die entsprechende Infrastruktur. Diese muss eine Informationsübertragung und Kontrolle des Fahrzeuges in Echtzeit garantieren, um beispielsweise im Falle einer drohenden Gefahrensituation unverzüglich eingreifen zu können.

- 1.1** Das Tunnelfahrzeug muss dem Personal der Leitwarte die Möglichkeit bieten, alle Funktionen des Tunnelfahrzeug fernsteuern zu können.

1.2 Das Tunnelfahrzeug muss Kameraaufnahmen zur Ferninspektion machen können.

1.3 Das Tunnelfahrzeug muss fähig sein, Daten in Echtzeit zu übermitteln.

Obwohl die Tunnelanlage zur Kühlung der Hochspannungskabel mit einer hohen Strömungsgeschwindigkeit mit frischer Umgebungsluft versorgt wird, kann nicht zu 100 % ausgeschlossen werden, dass es zu Ansammlung von potentiell gesundheitlichen Gasen kommt. Ebenso kann nach einem Brandereignis die Luftqualität deutlich herabgesetzt sein. Um dem Tunnelpersonal ein gefahrloses Betreten des Tunnels und Benutzen des Tunnelfahrzeuges zu ermöglichen, fordert daher TTG TSO, dass das Tunnelfahrzeug in der Lage sein muss die Luftqualität in der Tunnelanlage überprüfen zu können. Dieses muss über geeinigte Messtechnik realisiert werden, welche es ermöglicht die Qualität der Umgebungsluft zu überprüfen. Um eine Gefährdung des Tunnelfahrzeuges selbst für das Tunnelpersonal ausschließen zu können, muss dieses über eine vollautomatisierte Funktionsprüfung verfügen. Hierunter fallen Testungen der Antriebs- und Bremstechnik, der Kommunikations- und Messtechnik sowie aller anderen Einbauten.

1.4 Das Tunnelfahrzeug muss die Luftqualität überprüfen können.

1.5 Das Tunnelfahrzeug muss einen automatisierten Funktionstest durchführen können.

Das Anlagenkonzept (2.5) sieht für das Installieren eines Ersatzkabels zwei Arbeitstrupps mit je drei Personen im Tunnel vor und ist damit die personalintensivste Tätigkeit in der Tunnelanlage. Um einen reibungslosen und schnellen Ablauf dieser Arbeit zu ermöglichen muss das Tunnelfahrzeug über ausreichend Sitzplatz für die zwei Arbeitstrupps und deren Arbeitsmittel sowie Transportmöglichkeiten für die Reparaturkabel und Verbindungsmuffen verfügen. Da zum Zeitpunkt der Recherche keine Angaben über das Volumen der Arbeitsmittel gemacht werden konnte und im näheren Planungshorizont keine Entscheidung zu erwartet ist, muss nach Erfüllung aller Anforderung ein größtmöglicher Raum für Arbeitsmittel verbleiben. Neben der Steuerung durch die Leitwarte muss das Tunnelfahrzeug auch manuell durch das Tunnelpersonal gesteuert und vom Fahrzeug aus allen Funktionen genutzt werden können. Als Spezifikationen werden demnach definiert:

1.6 Das Tunnelfahrzeug muss sechs Personen transportieren können.

1.7 Das Tunnelfahrzeug muss dem Arbeitstrupp die Möglichkeit bieten, Arbeitsmittel verstauen zu können.

1.8 Das Tunnelfahrzeug muss Reparaturkabel und Verbindungsmuffen transportieren können.

1.9 Das Tunnelfahrzeug muss die Möglichkeit bieten, sich durch das Tunnelpersonal sowie von außen durch die Leitwarte steuern zu lassen.

Die Lichtstärke der Betriebsleuchtmittel des Tunnels ist aus Gründen des Brandschutzes und Wirtschaftlichkeit für Montage- und Reparaturarbeiten nicht ausreichend ausgelegt. Um Wartungs- und Inspektionsarbeiten dennoch sicher durchführen zu können, muss das Tunnelfahrzeug Beleuchtungsmittel für das Arbeiten im Tunnel bereitstellen. Des Weiteren benötigt der Arbeitstrupp eine Hubvorrichtung, um schwere Ersatzteile wie zum Beispiel die Verbindungsmuffen auf die jeweilige Arbeitshöhe anzuheben. Insgesamt ist darauf zu achten, dass alle Tätigkeiten im Zusammenhang mit dem Tunnelfahrzeug so gestaltet sind, dass ein ergonomisches Arbeiten im Sinne des Arbeitsschutzes ermöglicht wird.

1.10 Das Tunnelfahrzeug muss den Arbeitsbereich im Tunnel ausleuchten können.

1.11 Das Tunnelfahrzeug soll Ersatzteile anheben können.

1.12 Das Tunnelfahrzeug soll dem Arbeitstrupp die Möglichkeit bieten, höher gelegene Arbeitsbereiche im Tunnel zu erreichen.

1.13 Das Tunnelfahrzeug muss dem Arbeitstrupp die Möglichkeit bieten, alle Funktionen des Fahrzeugs auf ergonomische Weise zu benutzen.

1.14 Das Tunnelfahrzeug soll dem Arbeitstrupp Strom für Geräte bereitstellen können.

Aufgrund der beengten Verhältnisse im Tunnel wird es sich nicht vermeiden lassen, dass sich die Bewegungsfläche der Arbeitstrupps und die Verkehrsfläche des Tunnelfahrzeuges überschneiden. Um diesem Sachverhalt und der Arbeitsstättenrichtlinie (Kap. 4.2 Abs. 1 und 10 ASR A1.8: Verkehrswege) Rechnung zu tragen, muss durch technische Maßnahmen verhindert werden, dass die arbeitende Tunnelbesatzung durch das Tunnelfahrzeug angefahren werden könnte. Demzufolge werden folgende Spezifikationen formuliert:

1.15 Das Tunnelfahrzeug muss fähig sein, Personen zu erkennen und das Fahrzeug in diesem Fall selbstständig stoppen.

Die Dauer einer Schicht während Wartungs- und Instandsetzungsarbeiten kann bis zu einem regulären Arbeitstag andauern, was mit einer langen Aufenthaltsdauer im Tunnel für das Personal verbunden ist. Um Fahrten innerhalb einer Schicht zum Betriebsgebäude, aufgrund des logistischen und zeitlichen Aufwands, möglichst gering zu halten, sollte das Tunnelfahrzeug über eine sanitäre Infrastruktur verfügen. Ebenso soll es möglich sein, dass die Arbeitstrupps bei längeren Einsätzen Getränke mitführen können, um eine Dehydratation zu vermeiden. Mahlzeiten hingegen sollen aus hygienischen Gründen nur im Aufenthaltsraum des Betriebsgebäudes eingenommen werden.

1.16 Das Tunnelfahrzeug soll dem Tunnelpersonal die Möglichkeit bieten, Sanitärmöglichkeiten zu nutzen.

1.17 Das Tunnelfahrzeug soll dem Arbeitstrupp die Möglichkeit bieten, Getränke zu verstauen.

6.3 Spezifikationslevel 2

Das Spezifikationslevel 2 beinhaltet Nutzer-, sowie betriebliche Anforderungen. Ebenso werden gesetzliche Vorgaben als Anforderungen an das System formuliert. Auf dem mittleren Spezifikationslevel sind qualitative Anforderungen definiert.

Die Technischen Regeln für Arbeitsstätten fordern, dass Materialien und Räumlichkeiten für die Gewährleistung von Ersten-Hilfe-Maßnahmen in höchstens 100 m Wegstrecke erreichbar sein müssen (Kap. 4 Abs. 3 ASR A4.3). Es ist nicht vorgesehen, dass in der Tunnelanlage in regelmäßigen Abständen stationäre gelagertes Erste-Hilfe-Material vorgehalten wird.

Daraus ergibt sich die Anforderung an das Tunnelfahrzeug, Erste-Hilfe-Materialien mitzuführen. Aus der Gefährdungsbeurteilung ergeben sich weitere Anforderungen an die Mittel zur Ersten Hilfe (Kap. 4 Abs. 6 ASR A4.3).

2.1 Das Tunnelfahrzeug muss dem Personal die Möglichkeit bieten, auf Erste-Hilfe-Mittel zugreifen zu können.

Aufgrund der Ausdehnung des Tunnels, der Entfernung zu einem möglichen Einstieg in den Tunnel und der damit verbundenen verlängerten Eintreffzeit des öffentlichen Rettungsdienstes am Notfallort sind eigene Rettungstransportkapazitäten erforderlich (Kap. 5.2. Abs. 1 ASR A4.3). Das Tunnelfahrzeug muss demnach ein Rettungstransportmittel vorhalten und damit eine verletzte oder erkrankte Person transportieren können.

2.2 Das Tunnelfahrzeug muss verletzten und erkrankten Personen die Möglichkeit geben, fachgerecht aus dem Tunnel gerettet zu werden.

Die Personen, welche sich im Tunnel aufhalten, müssen ständig Zugang zu einer Meldeeinrichtung haben, um unverzüglich einen Notruf absetzen zu können. Bei der Meldeeinrichtung muss es sich nicht zwingend um ein stationäres System handeln (Kap. 5.1 ASR A4.3). Die Tunnelanlage verfügt über eine Betriebsfunkanlagen und ein Notruf kann über Handfunkgeräte abgesetzt werden. Aus Gründen der Redundanz muss das Tunnelfahrzeug jedoch ebenfalls über ein Kommunikationssystem verfügen.

Gleichzeitig muss gewährleistet sein, dass die Leitwarte zu jeder Zeit auch mit außerhalb und nicht in unmittelbarer Nähe zum Tunnelfahrzeugs befindliche Personen kommunizieren kann. Dies ist notwendig, um beispielsweise zu alarmieren oder Anweisungen zu erteilen. Akustische oder visuelle Verfahren sind denkbar.

2.3 Das Tunnelfahrzeug muss dem Tunnelpersonal die Möglichkeit bieten, Kontakt zur Leitwarte aufzunehmen und mit ihr zu kommunizieren.

2.4 Das Tunnelfahrzeug muss dem Leitwartenpersonal die Möglichkeit bieten, mit dem Tunnelpersonal während der Arbeit im Tunnel zu kommunizieren.

Das Tunnelfahrzeug soll im Falle eines Unfalls oder anderen zeitkritischen Ereignissen genutzt werden, um den Tunnel schnellstmöglich zu verlassen. Daher soll das Tunnelfahrzeug dem Tunnelpersonal ein schnelles und intuitives Auf- und Absitzen ermöglichen. Dabei steht der Anforderung der Sicherheit während der Fahrt unmittelbar gegenüber. Deshalb muss abgewogen werden, was konstruktiv sinnvoll möglich ist.

2.5 Das Tunnelfahrzeug soll die Möglichkeit bieten, schnell auf- und abzusteigen.

Eine weitere wichtige Spezifikation betrifft die Entfernungen zu Feuerlöschern, um Entstehungsbrände zu bekämpfen. Dies sind Brände, welche mit eigenen Mitteln von Laien und Brandhelfern bekämpft werden können, aber einen enormen Schaden verursachen, sollten sie nicht rechtzeitig eingedämmt werden. Die Entfernung zum nächstgelegenen Feuerlöscher soll nach der ASR nur 20 m Laufrichtung betragen (Kap. 5.3 Abs. 3 ASR A2.2), um einen schnellen Zugriff zu gewährleisten und einen Entstehungsbrand effektiv durch das Tunnelpersonal bekämpfen zu können. Um dieser Forderung sinnvoll nachzukommen, muss das Tunnelfahrzeug über eigene Feuerlöscher verfügen. Die zuständigen freiwilligen Feuerwehren sind nach Ausstattung und Qualifikation nicht in der Lage, adäquat auf ein Brandereignis in einem Tunnel zu reagieren (Kreisverwaltung Pinneberg, persönliche Kommunikation, 2018). Ebenso wurde während der ersten Vorstellung des Sicherheits- und Brandschutzkonzeptes am 29.05.2019 von Seiten der Feuerwehren aus Schwesig-Holstein erklärt, dass diese im Brandfall den Tunnel nicht betreten. Eine aktive Brandbekämpfung im Tunnel zum Zeitpunkt der Recherche ist nicht geplant.

Die Leitstelle in Stade erwägt zwar einen Einsatz der Feuerwehr im Tunnel (Feuerwehr- und Rettungsleitstelle LK Stade, persönliche Kommunikation, 15.01.2020), dies wird aber von Seiten des Betreibers aufgrund der Ausdehnung des Tunnels nicht für sinnvoll erachtet. Ein möglicher Einsatz der Feuerwehren endet somit planmäßig an den jeweiligen Schleusen des Sicherheitstreppenraumes im fünften Untergeschoss. Um dennoch auf ein Brandereignis im Tunnel reagieren zu können und größeren Sachschaden abzuwenden, soll das Tunnelfahrzeug über eine eigene Feuerlöscheinrichtung verfügen. Die Feuerwehr übernimmt in dem Fall den Einsatz von der Leitwarte aus.

2.5 Das Tunnelfahrzeug muss dem Personal die Möglichkeit bieten, auf Feuerlöscher zuzugreifen.

2.6 Das Tunnelfahrzeug muss Entstehungsbrände bekämpfen können.

6.4 Spezifikationslevel 3

Das Spezifikationslevel 3 beinhaltet detailreiche Nutzer- und spezifische, technische Anforderungen, welche an das Tunnelfahrzeug gestellt werden.

Im Falle eines Brandes können durch Löschmaßnahmen beispielsweise bei einem massiven Einsatz von Löschmitteln einen schnellen Betriebsstart verzögern. Um dies im Tunnel zu vermeiden und nach einem Brand eine schnelle Wiederinbetriebnahme zu ermöglichen, muss bei der Wahl des Löschmittels darauf geachtet werden, dass Schäden oder starke Verschmutzungen im Tunnel vermieden werden. Ebenso muss ein platz- und gewichtsparendes Löschmittel zum Einsatz kommen, das für das Löschen im Hochspannungsbereich geeignet ist. Die Menge des Löschmittels hat im Vergleich zu anderen Anforderungen jedoch eine geringere Priorität. Seitens des vorbeugenden Brandschutzes von WTM wurde die Forderung nach 1000 Liter Löschmittel formuliert (J. Nielsen, persönliche Kommunikation, 2020). Folgende Spezifikationen werden entsprechend definiert:

3.1 Die Löscheinrichtung des Tunnelfahrzeugs muss für das Löschen in der stromführenden Tunnelanlage geeignet sein.

3.2 Die Löscheinrichtung des Tunnelfahrzeugs soll 1000 Liter Löschmittel vorhalten.

Im Brandereignis stellt der Rauch des Feuers eine erhebliche Gefahr für Leib und Leben der Tunnelbesatzung dar. Neben der Gefahr durch Hitze ist die toxische Gefahr des Rauches ungleich größer. Eine Rauchgasvergiftung ist bei einem Brandereignis mit 90 % die häufigste Todesursache

(Dr. med. Paschen o. D.). Der Tunnel verfügt über keine Notausstiege, Sicherheitsstollen und Schutzräume. So kann sich das Personal nicht schutzzielorientiert – ohne gesundheitliche Schäden zu befürchten – von jedem Ort des Tunnels zu Fuß direkt ins Freie oder in einen anderen Brandabschnitt retten. Dies trifft gerade dann zu, wenn sich das Brandereignis in unmittelbarer Nähe zum Personal ereignet und sich diese in mittlerer Position der Anlage befinden. Angelehnt an die Musterbauordnung sollte eine maximale Entfernung in einen sicheren Bereich nicht weiter als 35 m betragen. Damit das Tunnelpersonal trotzdem sicher flüchten kann, muss das Tunnelfahrzeug wirksam vor der toxischen Wirkung des Rauchs und dessen Hitze schützen und demnach die Spezifikationen erfüllen:

3.3 Das Tunnelfahrzeug muss fähig sein, mitfahrende Personen vor Rauch zu schützen.

3.4 Das Tunnelfahrzeug muss fähig sein, mitfahrende Personen vor Hitze zu schützen.

Um die Brandlasten im Tunnel möglichst gering zu halten, muss das Tunnelfahrzeug unabhängig von einer externen Energieversorgung wie zum Beispiel einer Oberleitung betrieben werden können. Dabei soll der Antrieb eine möglichst geringe Brandlast aufweisen oder diese adäquat abschirmen können. Der Antrieb beziehungsweise der Energiespeicher des Antriebs muss emissionsfrei sein, um auch im Betrieb eine hohe Luftqualität im Tunnel aufrechtzuerhalten. Der Energiespeicher des Tunnelfahrzeuges muss dabei so bemessen sein, dass das Tunnelfahrzeug nach einer unbesetzten Inspektionsfahrt ausreichend lange bei maximaler Beladung, voller Fahrt und Besatzung einsatzbereit ist. Da das Tunnelfahrzeug stets zur Flucht eingesetzt werden können soll, muss sichergestellt werden, dass zu jedem Zeitpunkt ausreichend Energie vorhanden ist, um sicher das Schachtgebäude erreichen zu können. Erreicht der Energiespeicher ein definiertes schwaches Energieniveau, könnte das Tunnelpersonal beispielsweise akustisch oder visuell alarmiert werden. Da die Bauordnung und Arbeitsstättenverordnung mit ihren Regelungen zu Flucht- und Rettungswegen nicht adäquat auf das ElbX angewandt werden kann, wurde mit den Behörden für Arbeitsschutz eine individuelle und schutzzielorientierte Lösung abgesprochen.

Dabei wurde die Flucht- und Rettungszeit nach Predtetschenski-Miliski (Müller 2009:167–182), einem Standardrechenverfahren zur Bestimmung von Flucht- und Rettungszeiten, bei einer Geschwindigkeit von 20 km/h aufgerundet mit 17 Minuten errechnet (Anhang A). Entsprechend werden folgende Spezifikationen definiert:

3.5 Das Tunnelfahrzeug muss unabhängig von einer externen Energieversorgung alle Funktionen durchführen können.

3.6 Der Antrieb des Tunnelfahrzeug muss für den sicheren Betrieb in einer Tunnelanlage geeignet sein.

3.7 Der Antrieb des Tunnelfahrzeugs muss emissionsfrei Energie erzeugen können.

3.8 Der Energiespeicher muss für das Betreiben des Fahrzeuges, einschließlich Puffer, ausreichend Energie bereitstellen.

3.9 Das Tunnelfahrzeug muss mindestens 20 km/h fahren können.

Die größte Herausforderung bei der Entwicklung des Tunnelfahrzeugs ist die zur Verfügung stehende Stellfläche. Aufgrund des Biegeradius der über das Schachtbauwerk in den Tunnel führenden Kabel sowie der Anlagentechnik im Tunnel ist die Abmessung des gesamten Tunnelfahrzeugs limitiert und muss berücksichtigt werden. Demnach steht dem Tunnelfahrzeug und der benötigten Infrastruktur, wie zum Beispiel der Führungsschiene und Aufhängung, eine lichte Weite von 1 m und eine lichte Höhe von circa 3 m zur Verfügung. Die Länge des Fahrzeugs ist durch den Abstellbereich, welcher über eine Verschiebepattform realisiert wird, im beengten Schachtbauwerk auf etwa 8 m Länge begrenzt. Die genauen Maße ergeben sich aus der Infrastruktur im Tunnel und der Konstruktion der Verschiebepattform im Schachtgebäude. Ebenfalls müssen die Verbringung und Installation des Tunnelfahrzeug vor der ersten Inbetriebnahme in dem Tunnel berücksichtigt werden.

3.10 Das Tunnelfahrzeug muss in Breite, Höhe und Länge ausreichend konstruiert sein.

Die notwendigerweise schmale Form des Tunnelfahrzeugs führt zu einem ungünstig gelegenen vertikalen Schwerpunkt. Beispielsweise durch Einschwingen oder während einer Notbremse droht die Gefahr des Kippens. Daher muss durch technische Maßnahmen sichergestellt werden, dass ein Havarieren ausgeschlossen ist.

3.11 Das Tunnelfahrzeug Konstruktionsmerkmale aufweisen, die eine Havarie ausschließen.

7 Fahrzeugkonzept

Basierend auf den entwickelten Anforderungen der Anforderungsanalyse (Kapitel 5) designt NOWILAN GmbH im Auftrag der Planungsgemeinschaft ein erstes 3D-Modell des Tunnelfahrzeuges (NOWILAN GmbH 2020)⁸. Dabei hat im Vorfeld die Planungsgemeinschaft einige Spezifikationen vorkonkretisiert. Im Folgenden wird das Fahrzeugkonzept mit Fokus auf die Gesamtkonstruktion (Abschnitt 6.1), Karosserie (Abschnitt 6.2), Personenkabine (Abschnitt 6.3), Anhänger (Abschnitt 6.4) und konstruktive Besonderheiten (Abschnitt 6.5) vorgestellt und hinsichtlich der gestellten Anforderungen analysiert.

7.1 Gesamtkonstruktion

Das monospurgeführte, auf Rädern laufende Tunnelfahrzeug besitzt zwei voneinander getrennte Kabinen (Abb. 7). In der Personenkabine findet das Tunnelpersonal und deren persönliche Ausrüstung Platz. Zusätzlich ist in dieser die Batterie für die Antriebe verbaut. Die Messtechnik ist ebenfalls in der Personenkabine untergebracht. Im Anhänger befindet sich eine Rettungstrage und ein Begleitsitzplatz. Kranarme mit Handkettenzügen zum Heben von Lasten sind fest am Anhänger installiert. Eine Löscheinrichtung für Entstehungsbrände ist auf beide Fahrzeugdächer aufgeteilt vorhanden. Die technischen Daten der Personenkabine und des Anhängers sind in Tabelle 3 und 4 zusammengefasst.

Die wesentlichen Anforderungen aus dem Kapitel 5 „Anforderungsermittlung und Dokumentation“ wurden bei der Erstellung des Modells von NOWILAN umgesetzt. So kann das Fahrzeug Ferninspektionen durchführen (Spez. 0.1), die benötigte Anzahl von Arbeitern, Arbeitsmittel und Gerät mitführen (Spez. 0.2), das Tunnelpersonal mittels Filterselbstretter vor Rauch schützen und verletzte und erkrankte Personen mitführen (Spez. 0.3). Um die Spezifikation 0.4 (Stand der Technik) optimal zu erfüllen, bestehen – gerade im Bereich der Arbeitsergonomie – Verbesserungsmöglichkeiten im Rahmen des kontinuierlichen Verbesserungsprozesses im Sinne des PDAC-Zyklus nach William Edwards Deming. Dies ist dem frühen Projektstand geschuldet. Auf die einzelnen Aspekte wird im Folgenden detailliert eingegangen.

⁸ Quelle aus dem Intranet (nicht öffentlich zugänglich) von WTM Engineers GmbH

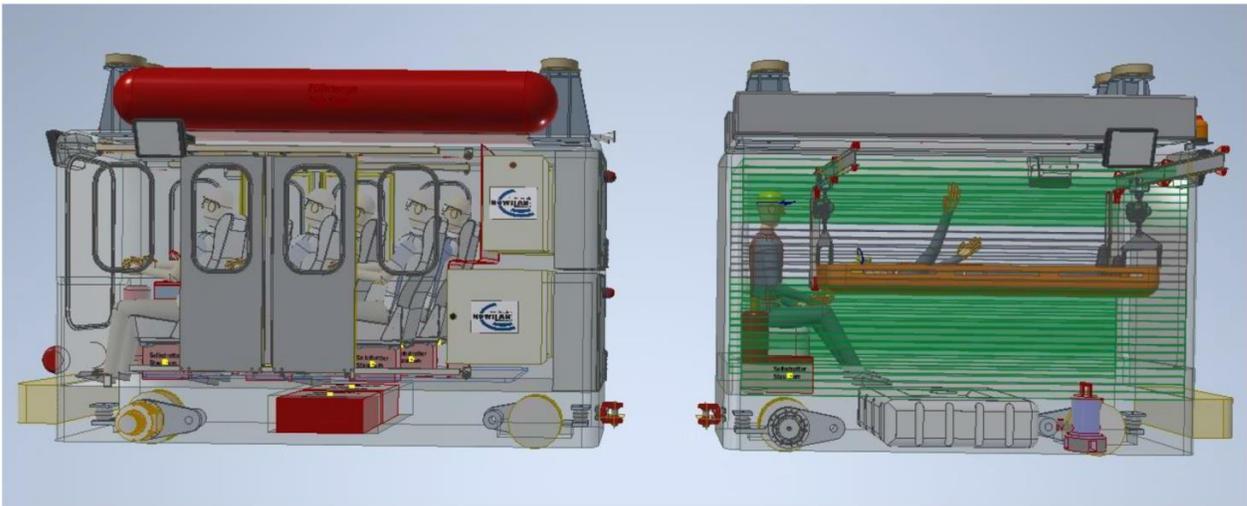


Abbildung 8: Abbildung des Tunnelfahrzeug für das ElbX mit Personenkabine und Anhänger zum Transport verletzter und erkrankter Personen (NOWILAN GmbH 2020)

7.2 Karosserie

Die Fahrzeugkabinen sind mit einer selbsttragenden Karosserie hergestellt. Das Fahrgestell und der Aufbau der Kabinen sind zu einer Einheit zusammengefasst, ein Rahmen ist somit nicht notwendig. Die Vorteile der selbsttragenden Karosserie gegenüber einer Rahmenbauweise sind das geringere Gewicht, eine höhere Sicherheit und bessere Ausnutzung des Raumes (The International Independent Aftermarket Association 2020). Dies ermöglicht die Umsetzung einer Vielzahl an Spezifikationen.

7.3 Personenkabine

Die sechs Sitzplätze für das Tunnelpersonal (Spez. 1.6) sind in der Personenkabine untergebracht, ebenso wie die Staukästen für ihre Arbeitsmittel (Spez. 1.7) und das Erste-Hilfe-Material (Spez. 2.3). Die Sitzplätze sind leicht versetzt angeordnet, sodass eine leichte Überschneidung der tatsächlichen Sitzflächen entsteht. Die DIN EN ISO 6385 *Grundsätze der Ergonomie für die Gestaltung von Arbeitssystemen* gibt vor, dass „[...] die Körpermaße der dort voraussichtlich arbeitenden Personen [...] berücksichtigt werden“ sollen. Insgesamt sind die Sitzverhältnisse beengt. Gerade bei überdurchschnittlich großen oder korpulenten Menschen könnte es zu Einschränkungen im Komfort kommen.

Bei dem Tunnelfahrzeug handelt es sich jedoch um ein Sonderfahrzeug, dessen Benutzung auf ein Minimum reduziert ist und dessen Fahrzeit selbst bei Schrittgeschwindigkeit bei höchstens 30 min pro Strecke liegt. Des Weiteren fährt das Fahrzeug lediglich bei komplexen Reparaturarbeiten unter voller Besetzung. Eine Gefährdung im Sinne des Arbeitsschutzes ergibt sich daher nicht. Im Bereich des Cockpits ist für ausreichend Platz und Sichtverhältnisse gesorgt.

Die Kabine wird nicht vollständig rauchdicht hergestellt, daher befindet sich unter jedem Sitz zusätzlich ein Filterselbstretter (FSR). Dieser filtert Kohlenstoffmonoxid sowie andere schädliche Gase, die bei Bränden auftreten, und schützt so das Tunnelpersonal für bis zu 90 min (Hermülheim & Bresser 2007:25–26). Eine vollständige Einhausung des Fahrzeugs, wie durch NOWILAN modelliert, ist somit, um vor der toxischen Wirkung des Rauches zu schützen, nicht mehr erforderlich. Die Spezifikation 3.3 wird durch die FSR dennoch erfüllt. In Anbetracht der Betriebstemperatur im Tunnel von 35 °C wird es in der Personenkabine jedoch unzumutbar warm. Eine an den Seiten offene Karosserie oder Belüftungsschlitze, um Kühlung durch den Fahrtwind zu ermöglichen, sind denkbar. Eine offene Bauweise ermöglicht außerdem ein schnelleres Aufsitzen in Notfallsituationen wie durch die Spezifikation 2.5 gefordert. Eine nahezu rauchdichte Kabine verlangsamt wiederum den Raucheintritt. Da das Fahrzeug, wie in 7.3 „Einsatz des Tunnelfahrzeuges“ beschrieben, innerhalb eines raucharmen Bereichs flüchtet ist dies allerdings nachrangig. Eine offene Bauweise wird daher empfohlen.

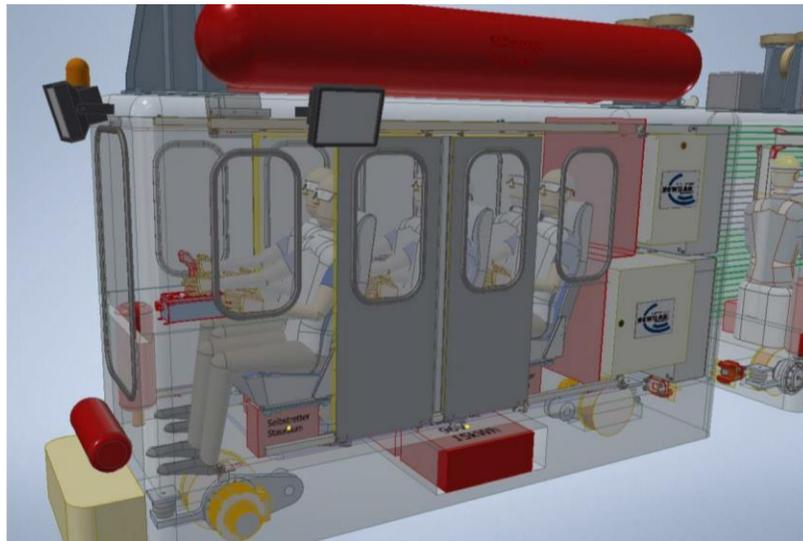


Abbildung 9 Abbildung der Personenkabine mit 6 Sitzplätzen und dem Fahrercockpit, Stauraum sowie einem Löschtank auf dem Dach (NOWILAN GmbH 2020)

Der Vordersitz verfügt über ein Steuerelement. Mit diesem kann die steuernde Person das Fahrzeug bewegen und bremsen. NOWILAN erklärt, dass mithilfe eines Displays und Kamerasystems eine Rückwärtsfahrt uneingeschränkt möglich ist (Spez. 1.9) (Wilzweski, persönliche Kommunikation, 16.01.2020).

Die Umgebungsbeleuchtung an den Kabinen soll ein umfassendes Ausleuchten des Arbeitsumfeldes ermöglichen. LED-Scheinwerfer, wie sie zum jetzigen Zeitpunkt vorgesehen sind, können dies nicht ausreichend gewährleisten. Stattdessen sollen Standlicht, Beleuchtung in Abhängigkeit zu Fahrtrichtung, Rundumbeleuchtung und Arbeitsscheinwerfer integriert werden.

7.4 Anhänger

Der Anhänger dient vorwiegend dem liegenden Transport von verletzten und erkrankten Personen und ihrer Begleitperson sowie von sperrigem Werk- und Arbeitsmaterial. Dazu verfügt der Anhänger über eine Schaufelkorbtrage und zusätzlichen Stauraum (Abb. 9).

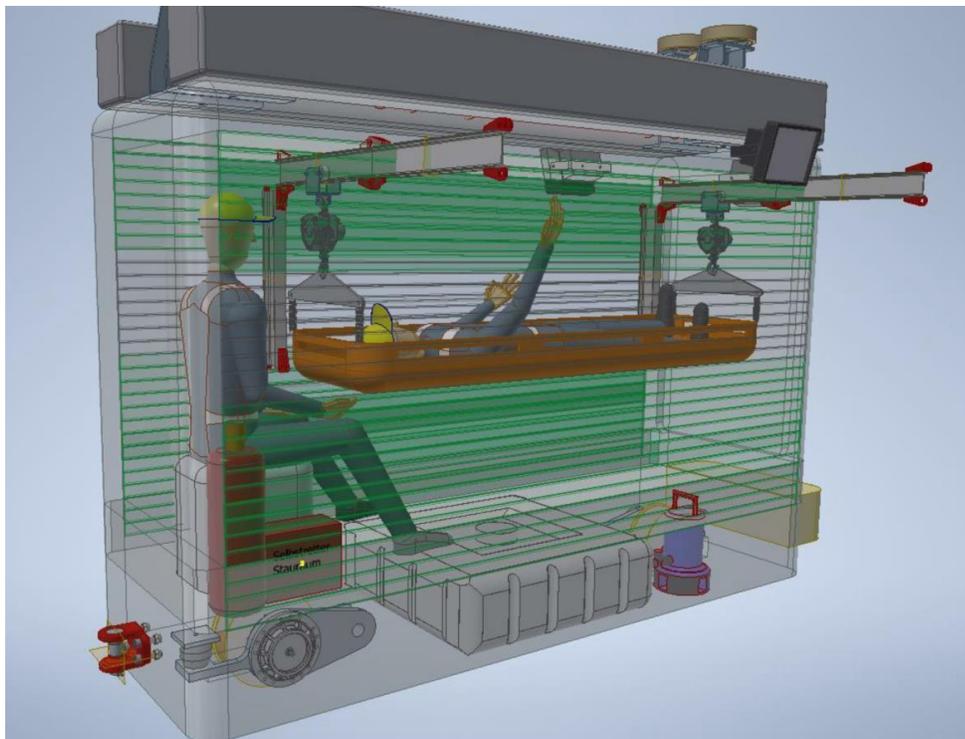


Abbildung 10 Abbildung des Anhängers mit Sitzplatz für einen Ersthelfer, einer Schaufelkorbtrage, Hub- und Hebevorrichtung sowie einer Absaugpumpe mit Tank und Schaum- und Löscheinrichtung auf dem Fahrzeugdach (NOWILAN GmbH 2020)

Nach dem vorläufigen Modell von NOWILAN soll die Trage an den Lastarmen des Fahrzeugs mittels einer Hängekonstruktion befestigt und seitlich eingeschoben werden. Dies erfüllt zwar im Wesen die Forderung der Spezifikation 2.2, ist nach der Auffassung von TTG allerdings keine abschließende Lösung (Planungsbesprechung Tunnelfahrzeug ElbX, interne Kommunikation, 16.01.2020). Zum einen wird der Begleitperson eine intensive Betreuung des Patienten durch die Hängevorrichtung verwehrt, zum anderen ist ein seitlicher Einschub ergonomisch nicht die bevorzugte Variante. Es wird daher in diesem Zusammenhang eine aufgelagerte Einschubmöglichkeit der Schleifkorbtrage analog zu einem Rettungswagen am Heck des Anhängers vorgeschlagen. Diese Variante hat einige Vorteile: So kann hinter dem Fahrzeug die ganze Breite des Tunnels zur Lagerung des Patienten, im Gegensatz zu dem schmalen Streifen seitlich des Fahrzeugs von lediglich 86 cm, genutzt werden. Ebenso ist das frontale Hineinschieben für den Menschen ergonomische deutlich besser umzusetzen im Vergleich zu Kraftanstrengungen mit einer Rückentorsion. Bereits eine Drehung von über 10° bewertet das IFA als unergonomisch (Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung 2015). Eine aufgelagerte Variante verhindert zusätzlich ein ungewolltes Schwingen der Trage. Des Weiteren verzichtet man so auf die doppelte Nutzung des Kranarms. Somit ist die Schleifkorbtrage auch bei dem Transport von Last uneingeschränkt verfügbar. Es ist jedoch davon auszugehen, dass durch diese Variante Stauraum verloren geht. Außerdem muss darauf geachtet werden, dass bei der Ankunft im Schachtbauwerk ausreichend Abstand zur abschließenden Wand des Tunnels eingehalten wird, um die Trage aus dem Fahrzeug schieben zu können.

An den starren Lastarmen kann außerdem ein Flaschenzugsystem befestigt werden, um beispielsweise Muffen anzuheben und ergonomisch zu installieren (Spez. 1.8). Da das Tunnelfahrzeug spurgeführt und somit nicht frei im Raum beweglich ist, empfiehlt sich eine dynamischere Variante. Ein höhenverstellbarer, teleskopierbarer Kranarm oder ein Lastarm mit einer Neigung von 25° ist denkbar. Dies ermöglicht es auch an höher gelegenen Bereichen des Tunnels, Ersatzleitungen und Muffen ergonomisch und präzise zu installieren. Um zu klären, wie die mitgeführten Kabel und Muffen jedoch (Abschnitt 6.5.2 Installationen und Verschiebepattform) an den Kranarm eingehängt werden können, liegt bisher kein schlüssiges Konzept vor. Demzufolge empfiehlt es sich, das Konzept für die Installation der Ersatzleitung und Muffen mittels Tunnelfahrzeug insgesamt zu überarbeiten und zu konkretisieren.

Der Anhänger wird an den Seiten durch Lamellenrollläden eingehaust. Da diese keinen wirksamen Schutz vor Rauch bieten, sind ebenfalls FSR für Begleitperson und Patient vorgesehen. Eine offene Bauweise ist, wie bei der Personenkabine, denkbar. Patienten sind grundsätzlich an der Rettungstrage vor Herausfallen gesichert. Es muss bei einer offenen Bauweise jedoch zusätzlich sichergestellt werden, dass ein unwillkürliches Herausgreifen aus dem Kabinenraum wirksam verhindert wird, um sekundär Verletzungen zu vermeiden. Erste-Hilfe-Maßnahmen durch die Begleitperson könnten so ebenfalls erschwert oder verhindert werden, da diese stets angeschnallt sein müssten.

Um die Anforderung an die Kommunikation zu erfüllen, benötigt der Anhänger ebenfalls eine Sprechereinrichtung. Sie dient zum einen der Kommunikation innerhalb der Tunnelbesatzung sowie zur Leitwarte, um eine kontinuierliche Lageentwicklung zu erhalten. Darüber hinaus können Rettungskräfte direkt Anweisungen an die Begleitperson geben, beispielsweise bei einer angeleiteten Reanimation. Diese Praxis wird im regulären Rettungsdienst bereits erfolgreich eingesetzt und sollte auch aufgrund der längeren Transportwege ermöglicht werden.

7.5 Konstruktionstechnische Besonderheiten

Unter konstruktiven Besonderheiten versteht man alle spezifischen Bauteile zusammengefasst: Antrieb, Batterie und Leistungsdaten (Abschnitt 6.5.1), Installationen und Verschiebeplattform (Abschnitt 6.5.2), Datenübertragung (Abschnitt 6.5.3), Video und Messtechnik (Abschnitt 6.5.4) Bedienung und Fahrt (Abschnitt 6.5.5), Flucht- und Rettungsmittel (Abschnitt 6.5.6) und Löschmittel und Feuerwiderstand (Abschnitt 6.5.7).

7.5.1 Antrieb, Batterie und Leistungsdaten

Angetrieben wird das Tunnelfahrzeug durch jeweils zwei Antriebsräder pro Kabine. Diese ermöglichen eine Vorwärts- und Rückwärtsfahrt in gleicher Geschwindigkeit. Die Antriebsräder sind zentrisch hintereinander angeordnet. Eine gleichmäßige Gewichtsverteilung liegt vor. Die Elektromotoren werden über leistungsstarke Lithium-Antriebsbatterien betrieben. Diese sind modular und jederzeit wechselbar. Beim Ausfall einer Batterie kann durch die Verwendung mehrerer parallel geschalteter Einzelbatterien das Fahrzeug weiterhin betrieben werden. Damit erfüllen sich die Anforderungen bzgl. eines emissionsfreien Antriebs (Spez. 3.6) und einer unabhängigen Energieversorgung (Spez. 3.7). Bisher ist nicht sichergestellt, dass wie nach Spezifikation 3.7 gefordert ein ausreichender Puffer vorgehalten ist. Sollte die Batterie unter ein definiertes Energieniveau fallen,

müsste das Tunnelpersonal alarmiert und automatisch eine Meldung an die Leitwarte gesendet werden. Dabei sollte ein großzügiger Puffer eingeräumt werden, um sicherheitsrelevante Restarbeiten abschließen zu können und die Ladeplattform im Schachtbauwerk erreichen zu können.

Durch den leistungsstarken Antrieb des Fahrzeugs erreicht dieses eine Geschwindigkeit von bis zu 25 km/h. Eine Durchfahrt des gesamten 4,63 km langen Tunnels ist somit in unter 12 min bei voller Beladung möglich (NOWILAN GmbH 2020). Dies stellt in Relation zu den in Spezifikation 3.7 geforderten 20 km/h eine Verbesserung dar. Die maximale Geschwindigkeit sollte jedoch aus Gründen der Fahrqualität im Regelbetrieb nicht ausgereizt werden. So kann durch die schmale Tunnelröhre bei zu hoher Geschwindigkeit ein Unwohlsein bei den Fahrgästen entstehen. Eine sinnvolle Geschwindigkeitsbegrenzung im Regelbetrieb sollte während einer Testfahrt in der Praxis ermittelt werden. Im Falle eines Notfalls überwiegt jedoch die Notwendigkeit eines schnellen Erreichens des Tunnelausgangs.

NOWILAN plant in dem Tunnelfahrzeug spezielle Antriebs- bzw. Hochvoltbatterien, welche gegenüber stationären Batterien höhere Sicherheitsanforderungen (Spez. 3.5) aufweisen (Sagawe 2010). Die Batterien im geplanten Tunnelfahrzeug befinden sich abgekapselt, mittig unter der Personenkabine. Die Löschung von Lithium-Batterie ist im Vergleich zu ABC-Bränden komplizierter. Eine Löschung mit Wasser oder speziellen Löschmittel wie Sand oder Gas ist aufgrund der chemischen Reaktion nicht möglich, da sich ein Lithiumbrand selbst mit Sauerstoff versorgt. In der Feuerwehrpraxis hat es sich bewährt, Lithium-Batterien unter hohem Wassereinsatz zu kühlen und so ein „thermisches Durchgehen“ zu verhindern und ausbrennen zu lassen (Kunkelmann 2018). Eine Lösungsversuch durch das Tunnelpersonal mit eigenen Löschmittel ist daher nicht zielführend und muss unterbleiben. Der Akkubrand stellt damit zwar die größte Gefahr im Tunnel dar, kommt nach Aussage des Institut für Schadenverhütung und Schadenforschung jedoch sehr selten vor – demnach ist die Lithiumbatterie bei sachgerechten Gebrauch anwendungstauglich (Schmiedberg o. D.). Das Restrisiko ist nach Berücksichtigung in der Gefährdungsbeurteilung vertretbar. Alle wichtigen Leistungsdaten bei voller Zuladung sind in Tabelle 6 gelistet.

Tabelle 3: Leistungsdaten bei voller Zuladung (NOWILAN GmbH 2020)

Antriebsleistung	4 x 12,5 kW = 50 kW
Erforderliche Antriebsleistung	Ca. 40 kW
Kapazität Batterie	2 x 15 kWh = 30 kWh
Energieverbrauch für Durchfahrt	überschlägig 7 kWh
Geschwindigkeit:	ca. 7 m/s \approx 25 km/h
Fahrzeit für Tunneldurchfahrt:	ca. 12 min (11 min 10 sec)
Beschleunigungszeit mit $a=1,0$ m/s²:	ca. 7,0 s
Beschleunigungsweg:	ca. 49 m
Bremszeit aus 7m/s mit $-a=1,5$ m/s²:	ca. 4,7 s
Bremsweg:	ca. 22 m

7.5.2 Installationen und Verschiebeplattform

Das Tunnelfahrzeug läuft über eine in der Sohle eingelassene Führungsschiene und einer Oberschiene, die das Fahrzeug auf fixer Bahn halten. Dadurch wird eine Entgleisung sowie das Kollidieren mit Tunneleinbauten verhindert. Die Sohlen- und Oberschienen sind so dimensioniert, dass eine Lasteinwirkung auch bei Nutzung der Lastarme die Schienen nicht beschädigt.

Der Materialtransport von schweren Ersatzkabeln und Muffen wird ebenfalls über die Oberschienen realisiert. Dazu können Tragkatzen in die Schiene gehangen werden und mittels Kettzug die Kabel und Muffen angehoben werden. Eine Kuppelstange verbindet die Tragkatzen mit dem Tunnelfahrzeug, welche die Ersatzteile zum Einsatzort bringen kann. Diese Variante ermöglicht zum einen ergonomisches Arbeiten für die Tunnelbesatzung, zum anderen kann man so auf einen weiteren Anhänger zum Transport von Ersatzteilen verzichten. Dies kommt der begrenzten Stellfläche zu Gute. Eine Installation der Kabel und Muffen ist über die Tragkatzen jedoch nicht möglich.

Da lediglich eine Sohlen- und Oberschiene vorhanden ist, ist ein Rangieren innerhalb des Tunnels nicht möglich. Dies ist nur auf der Verschiebeplattform innerhalb des Schachtbauwerks möglich. Dort können zwei Fahrzeug nebeneinander abgestellt und rangiert werden. Begrenzt wird der Platz im Schachtgebäude für die Fahrzeug durch die aus dem Muffenbauwerk herabführenden Kabel. Diese besitzen einen definierten Biegeradius und verlaufen mittig durch das Schachtgebäude in den Tunnel hinein (Abb. 10). Eine abschließende Gestaltung der Verschiebeplattform liegt noch nicht vor. In der aktuellen Version seitens NOWILAN liegt diese direkt vor dem Schleusentor,

welche ins Treppenhaus führt und blockiert so den Flucht- und Rettungsweg. Bei der Gestaltung der Verschiebeplattform ist darauf zu achten, dass zum einen der Flucht- und Rettungsweg nicht beeinträchtigt wird und zum anderen ein reibungsloses Beladen und Aufsitzen des Fahrzeuges durch das Tunnelpersonal möglich ist. Des Weiteren soll es möglich sein, beide Fahrzeuge unabhängig von ihrer Rangierposition in den Tunnel hineinzufahren.

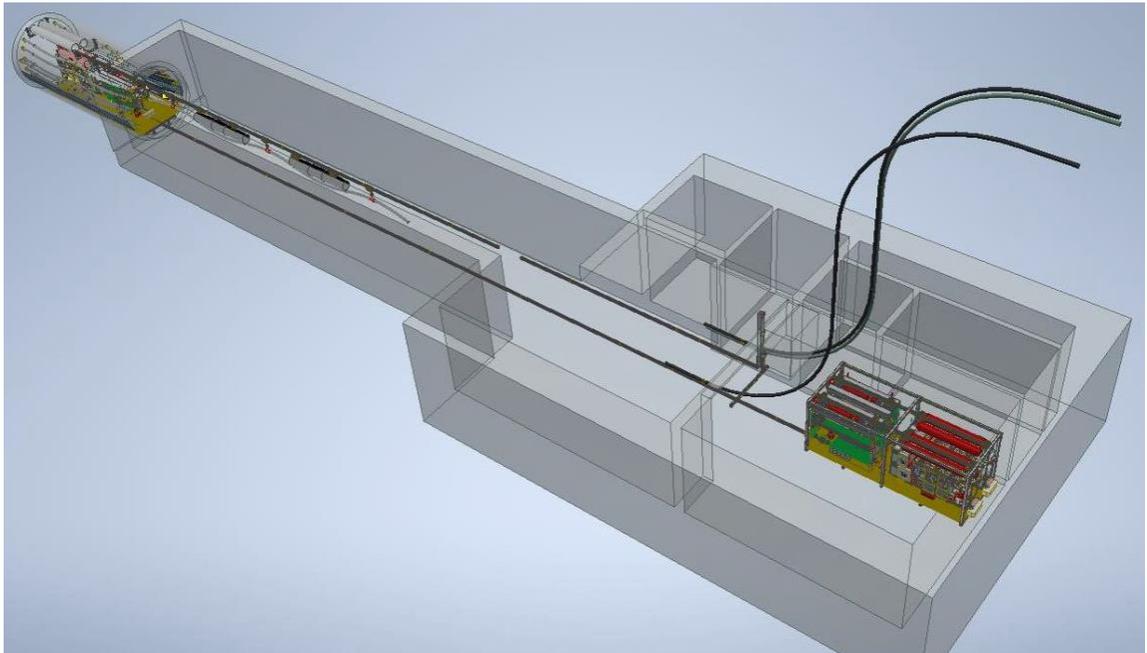


Abbildung 11 3D-Modell der Kabelführung aus dem Muffenbauwerk über das Schachtbauwerk hinein in den Tunnel mit einer vorläufigen Variante der Verschiebeplattform mit Tunnelfahrzeug. (NOWILAN GmbH 2020)

7.5.3 Datenübertragung

Die Datenübertragung zum und vom Tunnelfahrzeug zur Leitwarte wird über eine WLAN-Verbindung gewährleistet. Um eine ausreichende Kapazität bereitzustellen, benötigt es ca. alle 100 m Access Points. Access Points dienen der Weiterleitung des Signales und sorgen so für eine Abdeckung im gesamten Tunnel.

7.5.4 Video- und Messtechnik

An die Front- und Heckseite des jeweiligen Waggon ist jeweils eine Kamera installiert. Sie sind schwenkbar und verfügen über eine hochauflösende Zoomfunktion, um einen möglichst großen Bereich des Tunnels und der Kabel einsehen zu können. Damit das Fahrzeug auch zur Ferninspektion und im Brandereignis eingesetzt werden kann, besitzen die Kameras ebenfalls eine Wärmebildfunktion. Diese Lösung ermöglicht es der Leitwarte mithilfe der Wärmebildkameras gefahrlos einer Meldung der Brandmeldeanlage nachgehen zu können. Eine Ferninspektion sollte, nach Einschätzung des Autors, jedoch eine durch Fachpersonal durchgeführte Inspektion im Tunnel nicht vollständig ersetzen. Denn schlecht einsehbare Bereiche wie zum Beispiel die Rückseite der Hochspannungsleitungen können durch eine am Fahrzeug befestigte Kamera bei einer Ferninspektion nicht ausreichend eingesehen werden. Ein Toter Winkel der Kamera kann so nicht vermieden werden. Fachpersonal vor Ort hingegeben ist es möglich auch schwierige einsehbare Stellen betrachten zu können.

NOWILAN macht keine genaueren Angaben darüber, an welchen Orten und welche Gase durch das Tunnelfahrzeug gemessen werden. Dies soll durch den Auftraggeber weiter spezifiziert werden. Da die Tunnelanlage dauerhaft mit 4 m/s mit Umgebungsluft belüftet werden muss, darf davon ausgegangen werden, dass die Luftqualität zu jedem Zeitpunkt ausreichend hoch ist. Sollte eine Überwachung der Luftqualität gewünscht sein, ist ein klassisches Gaswarngerät ausreichend. Das Gerät sollte nach DGUV-R 103-003 mindestens Kohlenstoffdioxid, Kohlenstoffmonoxid, Sauerstoff, Schwefelwasserstoff sowie Methan messen können. Die Messeinrichtung sollte zwischen der Personenkabinen und dem Anhänger installiert werden. An dieser Stelle ist durch den Windschatten die Windgeschwindigkeit, ausgelöst durch die Ventilatoren, am geringsten und verfälscht so das Messergebnis nicht. Die Messeinrichtung sollte sich auf der durchschnittlichen Arbeitshöhe (Einatmung) von 1,70 m ab Fuß-bodenoberkante im Tunnel befinden (Rönnfeldt et al., 2010, S. 33-34).

7.5.5 Bedienung und Fahrt

Bedienen lässt sich das Tunnelfahrzeug sowohl aus dem Fahrercockpit als auch aus der Leitwarte heraus. Dabei kann die Leitwarte das Fahrzeug bewegen, ohne dass Personen den Tunnel betreten müssen, und kann die Kontrolle über das Fahrzeug im bemannten Betrieb übernehmen. Dies ist vor allem in Notfallsituationen sinnvoll.

Damit Personen auf der Verkehrsfläche des Fahrzeugs nicht an- oder überfahren werden können, verfügt das Fahrzeug über eine Personenerkennung. NOWILAN stellt die Möglichkeit vor (Planungsbesprechung Tunnelfahrzeug ElbX, interne Kommunikation, 16.01.2020), dass Personen über einen im Helm integrierten Sensor verfügen, auf den das Fahrzeug reagiert. Generell empfiehlt es sich jedoch, dass das Fahrzeug sämtliche Hindernisse erkennt und rechtzeitig die Geschwindigkeit reduziert und stoppt. Das Fahrzeug muss außerdem in der Lage sein, im Notfall Hindernisse wie zurückgelassenes Werkzeug beiseiteschieben zu können. Ebenfalls darf das Fahrzeug im Brandfall Rauch nicht als Hindernis erkennen und dadurch zum Stehen gebracht werden.

Dazu muss das Fahrzeug über einen Notfallmodus verfügen, in dem die automatische Hinderniserkennung deaktiviert ist, aber Personen nach wie vor erkannt werden. Eine Notbremsung ist durch die bedienende Person möglich.

7.5.6 Flucht- und Rettungsmittel

Das Tunnelfahrzeug als Flucht- und Rettungsmittel enthält Rettungsmittel für die Erste Hilfe sowie zur Selbstrettung. Dabei dient eine Schleifkorbtrage dem Transport von verletzten oder erkrankten Personen. Als zentrales Werkzeug der Personenrettung muss ein einfaches Herausnehmen und Einbauen der Trage möglich sein. Dem Tunnelpersonal muss darüber hinaus der Umgang vertraut sein, um auch im Notfall sicher und fehlerfrei mit ihr arbeiten zu können.

Über den Umfang des Erste-Hilfe-Sets hat NOWILAN keine Angaben gemacht. Spezielle Anforderungen sind dabei auch nicht vorhanden. Lediglich ein automatisierter externer Defibrillator für die Anwendungen durch Laien ist notwendig. Dies ergibt sich durch die verzögerte Eintreffzeit der Rettungskräfte am Patienten. Ebenfalls zu den Flucht- und Rettungsmitteln gehören die für die Tunnelbesatzung bereitstehenden Filterselbstretter sowie Feuerlöscher zum Löschen von Entstehungsbränden.

7.5.7 Löschmittel und Feuerwiderstand

Das Tunnelfahrzeug verfügt über eine Schaumlöschanlage, um Entstehungsbrände und kleine Brände löschen zu können. Die Löschanlage besteht aus drei Komponenten, wobei die Fahrzeugkabine zwei Löschwassertanks à 300 Liter trägt und der Anhänger ein Schaumreservoir mit 30 Liter Konzentrat sowie einen Mischer mit 5 kW Pumpleistung vorhält. Im jetzigen Vorschlag verfügt das Fahrzeug lediglich am Heck des Anhängers über einen starren Monitor mit einer Austragsmenge von 150 L/min. Um effektiv Löschen zu können, empfiehlt es sich ebenfalls, an der Frontseite der Personenkabine einen weiteren Monitor anzuschließen und diesen schwenkbar auszuführen.

Tabelle 4: Personenkabinenspezifikation (NOWILAN GmbH 2020)

Fahrzeugrahmen:	Selbsttragende Karosserie		
	Front- und Seitenfenster		
	Schiebetüren beidseitig, nahezu Rauchdicht		
Abmessung:	Breite	Höhe	Länge
	1000 cm	2500 cm	3500 cm
Gewicht:	Gewicht inkl. Zuladung	4000 kg	
	Leergewicht	3500 kg	
	Personengewicht	510 kg	
	Lastgewicht	490 kg	
Antrieb:	Art	Radantrieb	
	Anzahl	Zwei	
	Anordnung	Zentrisch angeordnet	
	Leistung	Je	12,5 kW
	Belastbarkeit	Je	3000 kg
		Insg.	6000 kg
Platz:	6 Personen		
Konstruktive Besonderheiten:	Installation	Anordnung	
	Batterie	Mittig im Unterbau seitlich eingeschoben	
	Löschwassertank	Zwei Wasserbehälter 600 L, auf Dach montiert	
	Löschmonitor	Frontseite, über Frontscheibe	
	Fern- und Umgebungsbeleuchtung	Front- und Längsseite	
	Kamerasystem	An der Stirnseite der Karosserie	
	Messeinrichtung	Heckseite, Höhe 1,70 m FFBO	
	Steuerelement/Joystick	Fahrerplatz an der Frontscheibe	
	Sprecheinrichtung	Am Steuerelement	
	Räumschild/Kollisionsüberwachung	Front	
	Staukästen	Im Heckbereich, von außen zugänglich	
	Abschleppvorrichtung	Front	
Ausrüstung:	Art	Lagerplatz	
	Selbstretter	Unter jedem Sitzplatz	
	Handfeuerlöscher	Staukasten	
	Erste-Hilfe und Defibrillator	Staukasten	

Tabelle 5: Anhänger spezifikation (NOWILAN GmbH 2020)

Fahrzeugrahmen:	Selbsttragende Karosserie			
	Lammellenverschluss mit Blickfenster beidseitig, nicht Rauchdicht			
Abmessung:	Breite	Höhe	Länge	
	1000 cm	2500 cm	3000 cm	
Gewicht:	Gewicht inkl. Zuladung		4000 kg	
	Leergewicht		3000 kg	
	Personengewicht		170 kg	
	Lastgewicht		830 kg	
Antrieb:	Art	Radantrieb		
	Anzahl	Zwei		
	Anordnung	Zentrisch angeordnet		
	Leistung	Je	12,5 kW	
	Belastbarkeit	Je	3000 kg	Insg. 6000 kg
Platz:	1 Begleitperson sitzend, 1 Person liegend			
Konstruktive Besonderheiten:	Installation	Anordnung		
	Wassertank für Kondenswasser mit Tauchpumpe	Mittig im Unterbau, seitlich eingeschoben		
	Kragarm mit Handkettenzug	Längsseite, beidseitig		
	Förderpumpe mit 30 L Schaumtank	auf Dach montiert		
	Löschmonitor	Über Heckluke		
	Fern- und Umgebungsbeleuchtung	Heck- und Längsseiten		
	Kamerasystem	An der Heckseite der Karosserie		
	Nottoilette	Als Begleitsitzplatz		
	Sprecheinrichtung	An Rückwand bei Begleitsitzplatz		
	Räumschild/Kollisionsüberwachung	Heck		
	Schleifkorbtrage	Nicht abschließend		
	Abschleppvorrichtung	Heck		
Ausrüstung:	Art	Lagerplatz		
	Selbstretter	Neben Begleitsitzplatz, 2x		
	Feuerlöscher	Neben Begleitsitzplatz		

7.6 Einsatz des Tunnelfahrzeuges

Da das entwickelte Tunnelfahrzeug integraler Bestandteil des Sicherheits- und Rettungskonzepts sein soll, kommt neben seinen intrinsischen Spezifikationen auch dem Konzept zu seinem Einsatz eine Schlüsselrolle zu. Dieser wird auch im Regelbetrieb durch die zu erwartenden Gefahren im Tunnel bestimmt. Dabei gilt es, durch den vorausschauenden, risikobewussten Blick das Konzept so zu gestalten, dass das Fahrzeug im Ernstfall optimal genutzt werden kann.

Dies beginnt bereits bei der Planung eines Einsatzes im Tunnel mit der Wahl des Eintritt- und Austrittsseite. Aus betrieblichen und logistischen Gründen ist der Eintritts- sowie die Austrittsschacht in der Regel identisch, da die Arbeitstrupps mit den gleichen Fahrzeugen an- und wieder abreisen werden und benötigtes Arbeitsmaterial ebenfalls an einen Ort geliefert wird. Bei der Planung und Auswahl des Schachtes sollte darauf geachtet werden, dass der Einsatzort im Tunnel am nächsten zum Eintritt- und Austrittsschacht liegt, um eine möglichst kurze An- und Abfahrt innerhalb des Tunnels zu gewährleisten.

Als weiterer Schritt in der Planung sollte die Einstellung der Ventilationsrichtung sein. Das Umstellen der Ventilationseinrichtung kann sofort erfolgen. Die Etablierung eines suffizienten Luftstromes folgt darauf nach einer kurzen Umstellungszeit. Die Belüftung sollte dabei von der Schachtseite erfolgen, aus der heraus der Tunnel auch betreten wird. Dies hat das Ziel, dass der kürzeste Weg, welcher in der Regel zu Zugangsseite des Arbeitstrupps ist, durch die Ventilation im Falle eines Feuers rauch- und hitzearm gehalten wird und so eine möglichst sichere Flucht aus dem Tunnel mit dem Fahrzeug gewährleistet ist. Das primäre Tunnelfahrzeug sollte dabei zum Schachtbauwerk hingewandt abgestellt werden und die Arbeiten vom primären Tunnelfahrzeug aus betrachtet ins Tunnelinnere erfolgen, um eine Flucht gegen die Lüftungsrichtung und somit gegen die Rauchausbreitung zu ermöglichen. Dies folgt der Annahme, dass ein Brandereignis am direkten Ort der Arbeit, z.B. beim Installieren einer Muffe im Tunnel am wahrscheinlichsten ist. Ein Abschalten der Lüftung im Brandfall sollte nach Brauner u. a. vermieden und stattdessen der Luftstrom stabil gehalten werden (Brauner u. a. 2014:98). Sollte bei fortlaufenden Tätigkeiten wie zum Beispiels Inspektion der Leitungen der Mittelpunkt des Tunnels überschritten werden und das ursprüngliche Zielschachtbauwerk entgegen der Lüftrichtung nun entfernter liegen, so sollte dennoch eine Flucht entgegengesetzt der Windrichtung in Richtung Eintrittsschacht erfolgen. Im Falle des ElbX wird jedoch die Lüftung sofort ausgeschaltet. Bei diesem Verfahren muss der nächst

verfügbarem Ausgang angefahren werden. Sollte jedoch der Weg zum Primärfahrzeug durch Feuer versperrt sein oder das Fahrzeug selbst die Brandursache sein, muss mittels Sekundärfahrzeug, welches vom Ort der Arbeit gesehen in Richtung der Tunnelmitte abgestellt ist, in den gegenüber liegenden, weiter entfernt gelegenen Tunnelschacht geflüchtet werden.

Der Löschversuch eines Entstehungsbrands oder eines vollentwickelten Brands durch das Sekundärfahrzeug sollte ausschließlich ferngesteuert durch die Leitwarte durchgeführt werden. Dies sollte immer dann versucht werden, wenn das Tunnelpersonal einen Löschversuch mittels Feuerlöscher nicht unmittelbar durchführen kann oder dieser erfolglos geblieben ist. Das Primärfahrzeug sollte in diesem Fall nicht zum Löschen, sondern ausschließlich zur sofortigen Flucht der Tunnelbesatzung genutzt werden.

Bei einem Unfall ist das primäre Ziel, die verletzte Person schnellstmöglich zum Schachtbauwerk zu befördern. Dies geschieht mit dem Tunnelfahrzeug, welches sich am nächsten zum Zielschacht befindet. Sollte allerdings der Patient nicht transportfähig sein und auf Hilfe von Einsatzkräften angewiesen sein, fährt das Primärfahrzeug leer, gesteuert durch die Leitwarte, zurück zum Zielschacht, nimmt dort die Einsatzkräfte auf und befördert sie zur Unfallstelle. Sollte in dieser Phase die Evakuierung des Tunnels notwendig werden, so steht das Sekundärfahrzeug zur Flucht des Tunnelpersonals weiterhin zur Verfügung.

Im Falle einer Betriebsstörung oder eines kritischen Ereignisses, ausgelöst durch höhere Gewalt, entstehen grundsätzlich keine besonderen Verfahrensweisen bezüglich des Tunnelfahrzeuges. In diesem Fall muss der Tunnel nach Maßgabe der Leitwarte geordnet geräumt werden. Während eines kritischen Ereignisses, ausgelöst durch Menschen, muss aufgrund der Komplexität individuell entschieden werden.

Die Betrachtung der unterschiedlichen Notfallszenarien hat gezeigt, dass die Belüftung des Tunnels eine wesentliche Rolle für den Einsatz des Tunnelfahrzeug spielen kann. Dieses könnte auch im Brandfall einen raucharmen Bereich, welcher zur Flucht genutzt werden könnte, ermöglichen. Dies würde bereits in der Planung eines Einsatzes und während der Durchführung ein koordiniertes Vorgehen erfordern. Ein taktischer Einsatz der Belüftungsanlage ist jedoch seitens der Planungsgemeinschaft nicht vorgesehen.

8 Diskussion

Die Auswertung der Ergebnisse belegt, dass das erarbeitete Konzept des Tunnelfahrzeuges als integraler Bestandteil des Sicherheits- und Rettungskonzeptes die sichere Flucht und Rettung der Tunnelbesatzung aus dem Querungsbauwerk ElbX im Kern ermöglicht und die Sicherheit der Mitarbeitenden während des Betriebes erhöhen kann. Dieses Ergebnis deckt sich mit den Erkenntnissen aus in Teilen vergleichbaren Projekten wie dem spanisch-französischen Hochspannungsleitungstunnel in den Pyrenäen sowie der 380-kV-Diagonalverbindung in Berlin, die beide erfolgreich ein Tunnelfahrzeug zu diesem Zweck einsetzen (vgl. 5.3 Vergleichsprojekte). Mit diesem Konzept kann ergänzend zu den bestehenden Fahrzeugen die Praxistauglichkeit eines Tunnelfahrzeuges in Versorgungstunneln untermauert werden.

Es muss jedoch berücksichtigt werden, dass sich das Bauvorhaben ElbX zum Zeitpunkt der Ausarbeitung nicht im finalen Projektstand befunden hat. Für diese Arbeit wurde der Analysebereich eingegrenzt, um das Projektvolumen in einen angemessenen Rahmen zu halten. Es wurde der Projektzwischenstand zum Zeitpunkt der Projektvorstellung gegenüber der RKiSH am 24.01.2020 als finaler Bearbeitungsstand gewählt. Der Zeitpunkt ist insofern sinnvoll, da der überwiegende Teil der Projektbeteiligten befragt worden ist und ein erstes Modell seitens NOWILAN zur Evaluation zur Verfügung stand.

Die Evaluation dieses Modells zeigte, dass die ermittelten Fahrzeugspezifikationen im Großen und Ganzen erfüllt wurden, jedoch gerade im Bereich der Arbeitsergonomie Defizite vorhanden sind. Dies scheint insgesamt beim ersten Entwurf des Fahrzeugs nicht ausreichend Beachtung gefunden zu haben. So konnte nicht schlüssig dargelegt werden, wie die Ersatzkabel und -muffen durch Unterstützung des Tunnelfahrzeugs installiert werden können. Letztlich wurde während der Analyse des erstens Entwurfs seitens der beauftragten Firma mögliche Schwächen im Bereich der Ergonomie angemerkt und Lösungsvorschläge erarbeitet. Eine Überarbeitung, die seitens der konstruierenden Ingenieurinnen und Ingenieure zu erfolgen hat, kann auf Basis dieser Auswertung erfolgen.

Ein weiteres Verbesserungspotential liegt in der fehlenden Erfahrung und technische Ausrüstung der umliegenden und zuständigen Feuerwehren mit Versorgungstunneln dieser Art, die einen Einsatz innerhalb des Tunnels in dieser Betrachtung ausschließt. Um auf einen Brand im Tunnel rea-

gieren zu können, soll das Fahrzeug über eine Löscheinrichtung verfügen. Für den reinen Personenschutz ist das jetzige Fahrzeugkonzept gut ausgelegt. Da die Anlage für die Energieversorgung in Deutschland bedeutsam ist, ist ein kontrolliertes Ausbrennen auszuschließen. Die Frage, ob der Anlagenschutz oder lediglich der Personenschutz berücksichtigt werden soll, war zum Zeitpunkt der Recherche jedoch noch nicht abschließend geklärt. Ein effektives Löschkonzept auch für den Anlagenschutz ist nach Auffassung des Autors jedoch sinnvoll. Ob die Löscheinrichtung des Tunnelfahrzeugs dafür geeignet ist, müsste explizit überprüft werden. Hier sind allerdings auch andere Lösungen wie ein Löschroboter oder eine Wassernebel-Löschanlage denkbar. Eine Studie über die Effektivität verschiedener Löschverfahren ist sicherlich interessant, jedoch nicht Bestandteil dieser Untersuchung.

Auf Seiten der Anlagentechnik stellt die Belüftungsanlage für den Einsatz des Tunnelfahrzeugs den entscheidenden Faktor dar. So ist neben der Betriebsstörung, dem Unfall und einem kritischen Ereignis der Brandfall und konkret der entstehende Rauch für die Tunnelbesatzung die schwerwiegendste Gefahr. Die Belüftungsanlage lenkt den Rauch des Feuers so in eine Richtung, dass entgegengesetzt der Strömungsrichtung ein raucharmer Bereich innerhalb des Tunnels entsteht. Nach den recherchierten Quellen kann dieser Bereich für die Flucht und Rettung im Brandfall genutzt werden. Das Sicherheitskonzept des ElbX sieht jedoch vor, die Belüftungsanlage abzuschalten, um einen weiteren Sauerstoffeintrag und eine zu starke Rauchausbreitung zu vermeiden. Aufgrund des großen Volumens des Tunnels ist der zusätzliche Sauerstoffeintrag jedoch möglicherweise nicht maßgeblich für die Entwicklung des Feuers während der Flucht- und Rettungsphase. Um zu beurteilen, ob ein Verrauchen durch Abschalten der Belüftung adäquat zu verhindern ist, empfiehlt sich eine Berechnung zur Rauchausbreitung oder eine empirische Untersuchung bei Fertigstellung.

Als Gesamtergebnis lässt sich festhalten, dass sich das Tunnelfahrzeug des ElbX gut in das Sicherheits- und Rettungskonzept integrieren lässt. Das Konzept ist zum jetzigen Projektstand vielversprechend und erfüllt einen Großteil der herausgearbeiteten Bedingungen. Die ausstehenden Bedingungen sind durch Optimierungen erfüllbar und müssen im Rahmen der kontinuierlichen Qualitätssicherung durch weitere Überarbeitungen des modulierten Erstentwurfs seitens NOWILAN erfolgen, während zugleich die Fahrzeugspezifikationen zu überprüfen und ergänzen sind.

9 Fazit

Das Ziel dieser Bachelorarbeit war die konzeptionelle Entwicklung eines Tunnelfahrzeuges als integraler Bestandteil des Sicherheits- und Rettungskonzeptes ElbX. Die Arbeit untersucht mittels Anforderungsanalyse die Bedingungen, unter denen das Tunnelfahrzeug agieren muss, und leitet daraus Fahrzeugspezifikationen für die weitere Modellierung des Fahrzeugs ab. Die angewandte Methode der Anforderungsanalyse ermöglichte ein strukturiertes und methodisches Vorgehen, an dessen Ende ein in weiten Teilen überzeugendes Fahrzeugkonzept steht. Die Evaluation eines ersten Modells anhand der Fahrzeugspezifikationen zeigte, dass im Groben die Anforderungen erfüllt wurden, aber im Detail überarbeitet werden müssen:

Mit dem vorhandenen Tunnelfahrzeugkonzept ist das Tunnelpersonal in der Lage, wirkungsvoll unterschiedliche Notfallszenarien zu bewältigen. So steht dem Personal bei einer Verletzung oder einer Erkrankung ausreichend Erste-Hilfe-Material sowie für den Transport eine Krankentrage zur Verfügung. Feuerlöscher und eine Feuerlöschleinrichtung am Fahrzeug ermöglichen eine Bekämpfung von Entstehungsbränden. Zur effektiven Brandbekämpfung und zum Anlagenschutz sind darüber hinaus andere Varianten unabhängig vom Tunnelfahrzeug denkbar. Im Brandfall schützen Filterselbstretter die Besatzung vor der toxischen Wirkung des Rauches. Der Einsatz des Fahrzeugs ist in das Sicherheits- und Rettungskonzept integriert. Da ein Brandereignis die größte Gefahr für Personen im Tunnel darstellt, ist während der Integration ein besonderes Augenmerk darauf gelegt. Ein maßgeblicher Faktor spielt die Belüftungsanlage. Zum einen kühlt die einströmende Luft der Belüftungsanlage den Bereich vor einem Brand und behindert die Rauchausbreitung. Zum anderen führt der Luftstrom Hitze und Rauch auf der abströmenden Seite ab. Dies ermöglicht einen rauch- und wärmearmen Fluchtbereich. Demnach ist eine Flucht entgegengesetzt der Strömungsrichtung grundsätzlich anzustreben und sollte bereits während der Planung eines Einsatzes im Tunnel berücksichtigt werden. Im Bereich der Arbeitsergonomie sind Verbesserungen und eine Überarbeitung des ersten Entwurfs notwendig und mit der Firma besprochen. Dabei wurden auch Anregungen für eine ergonomischere Gestaltung innerhalb der ersten Analyse erörtert.

Insgesamt stellt sich das bisherige Fahrzeugkonzept und die Integration in das Sicherheits- und Rettungskonzept des ElbX als überaus schlüssig dar. Gerade in Anbetracht des frühen Stadiums der konzeptionellen Arbeit sind die gewonnenen Ergebnisse und das vorhandene Konzept ein Erfolg.

Nach gängiger Praxis sollten nun auf Grundlage dieser Arbeit weitere Evaluationszyklen des Konzeptes bis zum fertigen Abschluss folgen. Durch die besonderen baulichen, anlagentechnischen und lagebezogenen Gegebenheiten des Querungsbauwerks ElbX sowie die Anforderungen der Projektbeteiligten ist die Vergleichbarkeit mit anderen Projekten im Detail zwar insgesamt gering, jedoch unterstreicht diese Arbeit die Machbarkeit und Praxistauglichkeit von Tunnelfahrzeugen als Sicherheitskomponente.

Der innovative Lösungsansatz, ein Tunnelfahrzeug als Bestandteil des Sicherheits- und Rettungskonzeptes für den Versorgungstunnel zu nutzen, kann damit empfohlen und als Referenz für Folgeprojekte herangezogen werden.

Literaturverzeichnis

- 50 Hertz Transmission GmbH o. D. Die 380-kV-Diagonalverbindung Informationen zum Projekt. <https://www.50hertz.com/Portals/1/Dokumente/Netz/Kabeldiagonale%20Berlin/380-kV-Diagonalverbindung.pdf?ver=2014-11-14-134510-070> [2.6.2020].
- ARÉVALO, J 2016. Development of a Robot for Maintenance Work in the Spanish-French Electrical Interconnection Tunnel.
- Bargon, Pedro & Scholl, Holger 2007. Spezielle Rettungstechniken. Themenschwerpunkt. Ede- wecht: Stumpf und Kossendey.
- Brauner, Christian u. a. 2014. Brandeinsätze in Strassentunneln: Taktik - Technik - Hintergrund. Interventionen in unterirdischen Verkehrsanlagen Bd. 1. Saulheim: Kehsler.
- Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe o. D. Kritische Infrastrukturen. https://www.bbk.bund.de/DE/AufgabenundAusstattung/KritischeInfrastrukturen/kritisch-einfrastrukturen_node.html [4.3.2020].
- Bundesnetzagentur 2019. BBPIG, Vorhaben 3: Brunsbüttel – Großgartach (SuedLink). https://www.netzausbau.de/leitungsvorhaben/bbplg/03/de.html?cms_vhTab=1 [20.12.2019].
- Dr. med. Paschen, Hans-Richard o. D. Erste-Hilfe kompakt: Notfallstichwort: Rauchgasintoxika- tion.
- DRK-Kreisverband Steinburg e.V. 2020. Kreisverband Steinburg e.V. - Über uns. <https://www.drk-kv-steinburg.de/ueber-uns.html> [9.3.2020].
- ElbX Planungsgemeinschaft 2019a. Anlagenkonzept. Intranet: WTM Engineers GmbH [intern].
- ElbX Planungsgemeinschaft 2020. geografische Einordnung: Trassenkorridor 13. Intranet: WTM Engineers GmbH [intern].
- ElbX Planungsgemeinschaft o. D. Sicherheitskonzept für die Betriebsphase Vorabzug LPH 3. In- tranet: WTM Engineers GmbH [intern].
- ElbX Planungsgemeinschaft 2019b. Tunnelquerschnitt. Intranet: WTM Engineers GmbH [intern].
- Endres, Cornelia o. D. Leitfadeninterview für die Bachelorarbeit - Beispiele & Ablauf. <https://www.bachelorprint.de/forschung/leitfadeninterview/> [4.7.2020].
- Gewerbeaufsichtsamt Göttingen 2020. Gewerbeaufsicht heute. <https://www.gewerbeaufsicht.nie- dersachsen.de/startseite/> [9.3.2020].
- Hermülheim, Walter & Bresser, Georg 2007. Handbuch für das Grubenrettungswesen im Stein- kohlenbergbau. Essen: VGE, Verl.

In Anlehnung an: ElbX Planungsgemeinschaft 2019a. Bauwerkquerschnitt [intern]. Intranet: WTM Engnieers GmbH [intern].

In Anlehnung an: ElbX Planungsgemeinschaft 2019b. Grundriss OG 05 [intern]. Intranet: WTM Engnieers GmbH [intern].

Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung 2015. Bewertung physischer Belastungen gemäß DGUV- Information 208-033.

Kluge, Roland ⁴2018. Die kleine RE-Fibel. Nürnberg: SOPHIST GmbH.

Kluge, Roland ³2016. Schablonen für alle Fälle. Nürnberg: SOPHIST GmbH.

Kunkelmann, Jürgen 2018. Brandbekämpfung: Wie Lithium Ionen Akkus löschen? FeuerTRUTZ Mag. Aug. 22018 2.2018. //www.feuertrutz.de/forschung-brandbekaempfung-von-lithium-ionen-batterien/150/60110/ [8.5.2020].

Mai, Jochen 2020. Brainstorming: Regeln, Methoden, Tipps für mehr Ideen. karrierebibel.de. <https://karrierebibel.de/brainstorming/> [4.7.2020].

Müller, Klaus 2009. Handbuch Evakuierung: Maßnahmen im Brand- und Katastrophenfall. Berlin: Schmidt-Verl.

Netzentwicklungsplan 2020. Das Übertragungsnetz für die Energiewende | Netzentwicklungsplan. <https://www.energiewende-stromnetz.de/de> [24.5.2020].

NOWILAN GmbH 2020. Übersicht Beschreibung Tunnelfahrzeug ElbX. Intranet: WTM Engnieers GmbH [intern]: NOWILAN GmbH.

Rettungsdienst-Kooperation in Schleswig-Holstein 2020. Startseite. <https://www.rkish.de/> [9.3.2020].

Sagawe, Tassilo 2010. Sicherheit der Hochvolttechnik bei Elektro- und Hybridfahrzeugen 4. Sachverständigentag / 01. und 02. März 2010 in Berlin Dipl.-Ing. (FH) Tassilo Sagawe / DEKRA Automobil Test Center (DATC). https://www.vdtuev.de/svt-archiv/svt2010/downloads/6_Sagawe.pdf [8.5.2020].

Schmiedberg, Ina o. D. Lithium-Ionen-Akkus. <https://www.ifs-ev.org/schadenverhuetung/feuerschaeden/lithium-akkus/> [8.5.2020].

TenneT TSO GmbH 2020. Projektportrait SuedLink. <https://www.tennet.eu/de/unsere-netz/ons-hore-projekte-deutschland/suedlink/ueber-suedlink/projektportrait/> [2.1.2020].

TenneT TSO GmbH 2019. Unsere Safety-Zielsetzungen. <https://www.tennet.eu/de/unternehmen/safety-bei-tennet/unsere-safety-zielsetzungen/> [31.5.2020].

The International Independent Aftermarket Association 2020. Karosserie | Mein Autolexikon. <https://www.mein-autolexikon.de/autolexikon/produkt/karosserie.html> [18.3.2020].

Unfallkasse Nord 2020. Unsere Aufgaben. <https://www.uk-nord.de/staatliche-arbeitsschutzbehörde-bei-der-unfallkasse-nord/unsere-aufgaben/> [9.3.2020].

Zürcher, Christoph & Frank, Thomas 2018. Bauphysik: Bau und Energie. Bau und Energie. Zürich: vdf Hochschulverlag.

Eidesstattliche Erklärung

Ich versichere, dass ich die vorliegende Arbeit ohne fremde Hilfe selbständig verfasst und nur die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen sind unter Angabe der Quelle kenntlich gemacht.

Ich erkläre mich damit einverstanden, dass ein Exemplar meiner Bachelor-Thesis in die Bibliothek des Fachbereichs aufgenommen wird; Rechte Dritter werden dadurch nicht verletzt.

Hamburg, den