



**School of
Engineering**

IDP Institut für Datenanalyse
und Prozessdesign

Bachelorarbeit Verkehrssysteme

Investitionsprojekte systematisch und
digitalisiert bündeln – Für einen
zukunftsgerichteten Substanzerhalt der
Eisenbahninfrastruktur

Autor

Livio Andina

Hauptbetreuung

Thomas Herrmann

Industriepartner

Schweizerische Südostbahn AG

Datum

07.06.2024

Erklärung betreffend das selbstständige Verfassen einer Bachelorarbeit an der School of Engineering

Mit der Abgabe dieser Bachelorarbeit versichert der/die Studierende, dass er/sie die Arbeit selbständig und ohne fremde Hilfe verfasst hat. (Bei Gruppenarbeiten gelten die Leistungen der übrigen Gruppenmitglieder nicht als fremde Hilfe.)

Der/die unterzeichnende Studierende erklärt, dass alle zitierten Quellen (auch Internetseiten) im Text oder Anhang korrekt nachgewiesen sind, d.h. dass die Bachelorarbeit keine Plagiate enthält, also keine Teile, die teilweise oder vollständig aus einem fremden Text oder einer fremden Arbeit unter Vorgabe der eigenen Urheberschaft bzw. ohne Quellenangabe übernommen worden sind.

Bei Verfehlungen aller Art treten die Paragraphen 39 und 40 (Unredlichkeit und Verfahren bei Unredlichkeit) der ZHAW Prüfungsordnung sowie die Bestimmungen der Disziplinarmaßnahmen der Hochschulordnung in Kraft.

Ort, Datum:

Wollerau, 7. Juni 2024

Name Studierender:

Livio Andina

Zusammenfassung

Der Schienenverkehr in der Schweiz verfügt über ein dichtes Netz aus komplexen Eisenbahninfrastrukturanlagen. Der Substanzerhalt der Eisenbahninfrastruktur umfasst neben dem periodischen Unterhalt die Instandsetzung und die Erneuerung von Bahnanlagen, welche das Ende ihrer Nutzungsdauer erreicht haben. Um die stetige Betriebsfähigkeit der Eisenbahninfrastruktur zu gewährleisten, sind die Infrastrukturbetreiberinnen beauftragt, den Substanzerhalt ihrer Anlagen frühzeitig und umfassend einzuplanen. Aufgrund des Ausbaus der Eisenbahninfrastruktur mit der Fertigstellung der neuen Eisenbahn-Alpentransversale und weiteren Ausbauten innerhalb der Ausbauschritte 2025 und 2035 steigt der zukünftige Bedarf an Substanzerhalt. Zugleich verlängern sich die Betriebszeiten, was zu kürzeren Zeitfenstern für den Substanzerhalt führt. Ein höherer Bedarf an Unterhalt und Instandsetzungen sowie kürzere Betriebspausen stellen den Substanzerhalt mit den heutigen Methoden vor grosse Herausforderungen.

Die Bündelung von Investitionsprojekten stellt einen vielversprechenden Ansatz dar, um diese Herausforderungen zu bewältigen. Durch die Bündelung können Synergieeffekte erzielt werden, welche die Effizienz und Ressourcenschonung erhöhen. Dabei spielt die Synchronisierung der Anlagenlebenszyklen eine zentrale Rolle. Mit der Synchronisierung werden verschiedene Anlagen zu einem Zeitpunkt erneuert, sodass ihre Lebenszyklen aufeinander abgestimmt werden.

Die Bündelung von Investitionsprojekten ist eine moderne Methodik im Substanzerhalt der Eisenbahninfrastruktur. Sie wurde in den letzten Jahren hauptsächlich im Zusammenhang mit dem Abbau des substanziellen Nachholbedarfs angewendet, weshalb in der Praxis dazu bisher nur wenige Grundlagen existieren. Das grosse Potenzial, welches die Bündelung von Investitionsprojekten für den Substanzerhalt bietet, wird mit dem heutigen manuellen Vorgehen nicht ausgeschöpft. Intelligente computerbasierte Anwendungen für die Planung sowie die Realisierung von gebündelten Substanzerhaltungsmassnahmen sind für die Praxis bisher nicht vorhanden.

Um den heutigen manuellen Prozess zu unterstützen, wurde in dieser Arbeit mit der Programmiersprache Python ein Tool zur digitalen Bündelung von Investitionsprojekten (TDBI) entwickelt. Das TDBI basiert auf den Investitions- und Anlagendaten der Schweizerischen Südostbahn AG. Es berechnet die relevanten Kennzahlen für die Synchronisierung der Anlagenlebenszyklen, stellt die positiven und negativen Auswirkungen einer Bündelung einander quantitativ gegenüber und bietet so eine fundierte Entscheidungsgrundlage für oder gegen eine Bündelung. Die Outputs des TDBI umfassen detaillierte Informationen zu den Investitionsprojekten und den betroffenen Anlagen, die zeitliche Planung der Erneuerungen und eine abschliessende Empfehlung zur Bündelung der Projekte.

Das TDBI bietet einige Vorteile, darunter eine wesentliche Zeiteinsparung für die Prüfung einer Bündelung von Projekten. Es ermöglicht eine datenbasierte Entscheidungsfindung und reduziert die Risiken ineffizienter Bündelungen. Zudem stellt das TDBI einen wichtigen Schritt zur Digitalisierung des Substanzerhalts dar. Mit durchgeführten Tests und Validierungen wurde erfolgreich erwiesen, dass das TDBI in der Praxis anwendbar ist.

Zukünftig wird der Substanzerhalt der Eisenbahninfrastruktur weiterentwickelt werden müssen, um den steigenden Anforderungen gerecht zu werden. Eine verbesserte Datenqualität und Datenvollständigkeit werden entscheidend sein, um die Effizienz digitaler Anwendungen zu gewährleisten. Ein wichtiger Aspekt ist zudem, dass Investitions- und Anlagendaten sowie einzelne Substanzerhaltungsmassnahmen miteinander verknüpft werden. So können physische Abhängigkeiten von Anlagen abgebildet und die Rahmenbedingungen zum Unterhalt eines ganzen Systems digitalisiert festgelegt werden.

Abstract

Rail transport in Switzerland has a dense network of complex railway infrastructure facilities. The maintenance of railway infrastructure includes not only periodic maintenance but also the repair and renewal of railway installations that have reached the end of their life cycle. To ensure the continuous operability of the railway infrastructure, infrastructure operators are tasked with planning the maintenance of their facilities early and comprehensively. Due to the expansion of the railway infrastructure, with the completion of the new railway Alpine transversal and further expansions in the development steps of 2025 and 2035, the future demand for maintenance is increasing. Simultaneously, operating times are extending, leading to shorter time slots for maintenance. Higher maintenance and repair needs, along with shorter operation pauses, pose significant challenges for maintenance using current methods.

Bundling of investment projects presents a promising approach to overcoming these challenges. By bundling, synergy effects can be achieved that increase efficiency and resource conservation. Synchronizing the life cycles of the facilities plays a central role in the bundling of investment projects. Synchronization renews various facilities at the same time, so their life cycles are aligned.

Bundling investment projects is a modern methodology in the maintenance of railway infrastructure. In recent years, it has been primarily applied in addressing substantial backlogs, which is why there are only a few foundational principles in practice so far. The great potential offered by bundling investment projects for maintenance is not being fully exploited with current manual methods. Intelligent computer-based applications for planning and implementing bundled maintenance measures are currently not available in practice.

To support the current manual process, in this work a tool for the digital bundling of investment projects (TDBI) was developed using the Python programming language. The TDBI is based on the investment and facility data of the Schweizerische Südostbahn AG. It calculates the relevant key figures for synchronizing facility life cycles, quantitatively compares the positive and negative impacts of bundling, and thus provides a sound basis for deciding for or against bundling. The outputs of the TDBI include detailed information on the investment projects and the affected facilities, the timing of renewals, and a final recommendation on project bundling.

The TDBI offers many advantages, including significant time savings in evaluating the bundling of projects. It enables data-based decision-making and reduces the risks of inefficient bundling. Additionally, the TDBI represents an important step towards the digitization of maintenance. Tests and validations have successfully demonstrated that the TDBI is applicable in practice.

In the future, the maintenance of railway infrastructure will need further development to meet increasing demands. Improved data quality and completeness will be crucial to ensuring the efficiency of digital applications. An important aspect is also the linking of investment data with facility data and further the linking of individual maintenance measures. This way, physical dependencies of facilities can be mapped and the conditions for maintaining an entire system can be digitally defined.

Vorwort

Aus einem ausgeprägten Interesse an der Effizienz und Nachhaltigkeit der Eisenbahninfrastruktur entschied ich mich, meine Bachelorarbeit im Bereich des Substanzerhalts der Bahninfrastruktur zu schreiben. Meine alltägliche Arbeit bei der Schweizerischen Südostbahn AG als Anlagen- und Projektportfoliomanager zeigt mir die vielfältigen Herausforderungen auf, die mit der Planung und Durchführung von Investitionsprojekten verbunden sind. Regelmässig initiiere ich in meiner Arbeit Investitionsprojekte und überprüfe dabei, ob diese im Sinne der Nachhaltigkeit mit anderen geplanten Projekten gebündelt werden können.

Einer der herausforderndsten Aspekte meiner Arbeit ist die noch nicht vorhandene Verknüpfung zwischen den einzelnen Anlagendaten sowie zwischen den Investitions- und Anlagendaten. Bisher existiert kein digitales Tool, welches den Prozess der Bündelung von Investitionsprojekten unterstützt. Diese Herausforderungen motivierten mich, ein digitales Werkzeug zur Unterstützung bei der Bündelung von Investitionsprojekten zu entwickeln, das nicht nur den Substanzerhalt effizienter gestaltet, sondern auch zu einer nachhaltigen Nutzung der Ressourcen beiträgt.

Mit dieser Arbeit möchte ich einen Beitrag dazu leisten, die Prozesse im Substanzerhalt der Eisenbahninfrastruktur zu verbessern und die Grundlage für zukünftige Entwicklungen in diesem Bereich zu schaffen.

Livio Andina

Wollerau, 7. Juni 2024

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	8
1.1	Substanzerhalt in der Bahninfrastruktur	8
1.2	Bündelung von Investitionsprojekten	9
1.2.1	Einführung.....	9
1.2.2	Chancen: Synergieeffekt.....	9
1.2.3	Synchronisierung von Anlagenlebenszyklen	10
1.2.4	Problemstellung	11
1.3	Ziel und Mehrwert der Arbeit.....	11
2	Grundlagen	12
2.1	Projektarbeit	12
2.1.1	Einordnung des TDBI in das systematische Vorgehensschema.....	17
2.2	Auswirkungen der Synchronisierung von Anlagenlebenszyklen.....	19
2.2.1	Vorzeitige Erneuerung einer Anlage.....	20
2.2.2	Nachzeitige Erneuerung einer Anlage	20
3	Vorgehen und Methodik	21
3.1	V-Modell Entwicklungsprozess	21
3.1.1	Systemanforderungen.....	22
3.1.2	Systementwurf	22
3.1.3	Entwurf der Einheiten.....	23
3.1.4	Testen der Einheiten	24
3.1.5	Integrationstest	24
3.1.6	Validierung des Systems.....	24
3.2	Methodik.....	24
4	Das TDBI	25
4.1	Beschreibung der Anwendung.....	25
4.1.1	Aktive Handlung der anwendenden ISB	25
4.1.2	Outputs und Empfehlung.....	27
4.2	Trade-Off in der Synchronisierung der Anlagenlebenszyklen.....	32
4.2.1	Berechnung der negativen Auswirkung vorzeitiger Erneuerungen	33
4.2.2	Berechnung der negativen Auswirkung nachzeitiger Erneuerungen.....	33
4.2.3	Berechnung der positiven Auswirkung des Synergieeffekts	36
4.3	Entwicklung	40
4.3.1	Einheit 1	40
4.3.2	Einheit 2.....	42
4.3.3	Einheit 3.....	45
4.3.4	Einheit 4.....	46
4.4	Integrationstest.....	48
5	Proof of Concept: Validierung des TDBI	50

5.1	Instandsetzung «Wasserfluchtunnel» und Viadukt «alte Strasse»	50
5.2	Erneuerung Bahnstromanlagen und Fahrbahn	51
5.3	Ersatz unterbrechungsfreie Stromversorgung und Erneuerung Fahrbahn	52
5.4	Ersatz unterbrechungsfreie Stromversorgung und Stationsprojekt.....	52
6	Beobachtungen in den Resultaten.....	53
6.1	Zeitliche Differenz bei der Bündelung von Investitionsprojekten.....	53
6.2	Häufige Empfehlung des späteren Zeitpunkts.....	54
6.3	Anlagen-Mehrkosten ohne Bündelung	54
6.4	Anstieg der Mehrkosten bei mehr betroffenen Anlagen	54
7	Diskussion und Ausblick.....	55
7.1	Diskussion	55
7.1.1	Das TDBI ist ein unterstützendes Tool	55
7.1.2	Relevanz der Datenqualität und -vollständigkeit.....	55
7.2	Ausblick	56
7.2.1	Teilbereiche des Vorgehensschemas in das TDBI implementieren	56
7.2.2	Allgemeine Weiterentwicklungen des TDBI.....	57
7.3	Datenstruktur zur Steigerung der Intelligenz des TDBI	58
8	Verzeichnisse.....	59
8.1	Quellenverzeichnis	59
8.2	Abbildungsverzeichnis	61
8.3	Tabellenverzeichnis	62
9	Anhang.....	63
A.	Ordner «Tool»	63
a)	TDBI.py.....	63
b)	Ordner «Hauptliste»	63
c)	Ordner «Hilfslisten»	63
B.	Ordner «Quellen»	63
C.	Dokumentation der Validierung des TDBI.pdf	63
D.	Nutzungsanleitung für das TDBI.pdf	63
E.	Bewertungssystem des Synergieeffekts.xlsx	63

1 Einleitung

1.1 Substanzerhalt in der Bahninfrastruktur

Der Schienenverkehr in der Schweiz verfügt über ein dichtes Netz aus komplexen Bahninfrastrukturanlagen. Die Infrastrukturbetreiberinnen (ISB) tragen die Verantwortung dafür, dass sich diese Infrastrukturanlagen in einem stets betriebsfähigen Zustand befinden. Dazu führen sie, nebst Unterhaltsarbeiten, Substanzerhaltungsmassnahmen wie Instandsetzungen, Erneuerungen und Anpassungen an den neusten Stand der Technik durch. Die geplanten ungedeckten Kosten für den Betrieb und den Substanzerhalt der Bahninfrastruktur werden durch den Bund finanziert. Dafür schliessen alle ISB mit dem Bundesamt für Verkehr (BAV) eine Leistungsvereinbarung (LV) über eine Periode von vier Jahren ab [1]. Vor Abschluss der LV reichen die ISB im BAV eine Offerte ein, in der sie die finanziellen Bedürfnisse für geplante Projekte der nächsten LV-Periode darlegen. Die ISB führen einen Investitionsplan, der die geplanten Substanzerhaltungsprojekte enthält. Die Inhalte des Angebots für die LV werden aus dem Investitionsplan abgeleitet. Projekte, die im Investitionsplan enthalten sind, werden als Investitionsprojekte bezeichnet.

Die Eisenbahninfrastruktur wird unterteilt in die Anlagengattungen Gebäude und Grundstücke, Kunstbauten, Fahrbahn, Bahnstromanlagen, Sicherungsanlagen, Niederspannungs- und Telekommunikationsanlagen, Publikumsanlagen und Fahrzeuge Infrastruktur [2]. Alle diese Anlagen müssen periodisch instandgehalten werden und benötigen eine Instandsetzung oder eine Erneuerung, sobald sie das Ende ihrer Nutzungsdauer erreichen oder sie sich nicht mehr im vorgesehenen Zustand befinden. Die genannten Instandsetzungen oder Erneuerungen werden in Form von Investitionsprojekten ausgeführt. Da Instandsetzungen und Erneuerungen laufend anfallen, ergibt sich, je nach Grösse des Anlagenportfolios der ISB und je nach Zeitpunkt, ein Projektportfolio, das mehrere Tausend Investitionsprojekte beinhalten kann. Somit gilt es, diese Projekte sorgfältig und mit genügend Vorlaufzeit einzuplanen.

Nebst Substanzerhaltungsmassnahmen plant und begleitet das BAV diverse Ausbauprogramme der Eisenbahninfrastruktur. So wurden die neue Eisenbahn-Alpentransversale (NEAT) mit dem Lötschberg-Basistunnel, dem Gotthard-Basistunnel und dem Ceneri-Basistunnel sowie das Programm Bahn 2000 mit einer Neubaustrecke zwischen Mattstetten und Rothrist bereits umgesetzt [3] [4]. Weitere Programme, wie die Ausbauschritte 2025 und 2035 sowie die zukünftige Entwicklung der Bahninfrastruktur (ZEB) werden zurzeit und bis in das Jahr 2035 ausgeführt [5].

Mit dem Ausbau der Infrastruktur steigt der Bedarf an Substanzerhaltungsmassnahmen. Pro Jahr werden in der Schweiz rund 3.5 Milliarden Franken in den Substanzerhalt der Bahninfrastruktur investiert [1]. Im Jahr 2023 lagen die Ausgaben für den Schienenverkehr und den öffentlichen Verkehr bei 7.1 Milliarden Franken. Somit betrug der Anteil der aufgewendeten Mittel für den Substanzerhalt der Bahninfrastruktur 49% der Gesamtausgaben für den Schienenverkehr und den öffentlichen Verkehr [6]. Für die Zukunft ist davon auszugehen, dass dieser Anteil deutlich ansteigen wird, da aufgrund der Ausbauprogramme mehr Anlagen vorhanden sein werden [7].

Mit einem höheren Stellenwert des Substanzerhalts steigen die Herausforderungen, diesen zu bewältigen. Einerseits finden mehr Instandsetzungen gleichzeitig statt, was zu mehr Einschränkungen des Eisenbahnverkehrs sowie zu einem höheren Ressourcenbedarf führt. Andererseits werden die Betriebspausen des Eisenbahnverkehrs immer kürzer, was zu ineffizienterem Arbeiten und somit zu länger andauernden Baustellen führt. Der Substanzerhalt der Zukunft wird kaum mehr allein mit den herkömmlichen Projektausführungen zu bewältigen sein. Deshalb sollen neue Methoden, wie die Bündelung von Investitionsprojekten, in Anwendung gebracht werden.

1.2 Bündelung von Investitionsprojekten

1.2.1 Einführung

Die Bündelung, oder auch «Clustering» genannt, von Investitionsprojekten gilt als vielversprechender Ansatz, um die zukünftigen Herausforderungen im Substanzerhalt der Eisenbahninfrastruktur zu bewältigen. Bei der Bündelung von Investitionsprojekten werden zwei oder mehr Investitionsprojekte gemeinsam projektiert und ausgeführt. Dabei wird zwischen zwei Varianten unterschieden [8]:

- **Zeitliche Bündelung:** Der Ausführungszeitraum der betroffenen Investitionsprojekte ist der ausschlaggebende Faktor dieser Variante. Projekte an unterschiedlichen Orten und mit unterschiedlichen Arbeiten können gleichzeitig oder mindestens zeitlich überschneidend ausgeführt werden. Die Projekte liegen auf der Zeitachse nahe beieinander, wie in der Abbildung 1 veranschaulicht wird.
- **Räumliche Bündelung:** Die räumlichen Gegebenheiten und die auszuführenden Arbeiten sind die ausschlaggebenden Faktoren dieser Variante. Projekte mit unterschiedlichen Ausführungszeitpunkten können nahe beieinanderliegend und mit denselben oder mit ähnlichen Massnahmen ausgeführt werden. Die Projekte liegen auf der räumlichen Achse nahe beieinander, wie ebenfalls in der Abbildung 1 veranschaulicht wird.

Wenn zwei Projekte weder zeitlich noch räumlich nahe beieinander liegen, wird in der Regel von einer Bündelung der Projekte abgesehen.

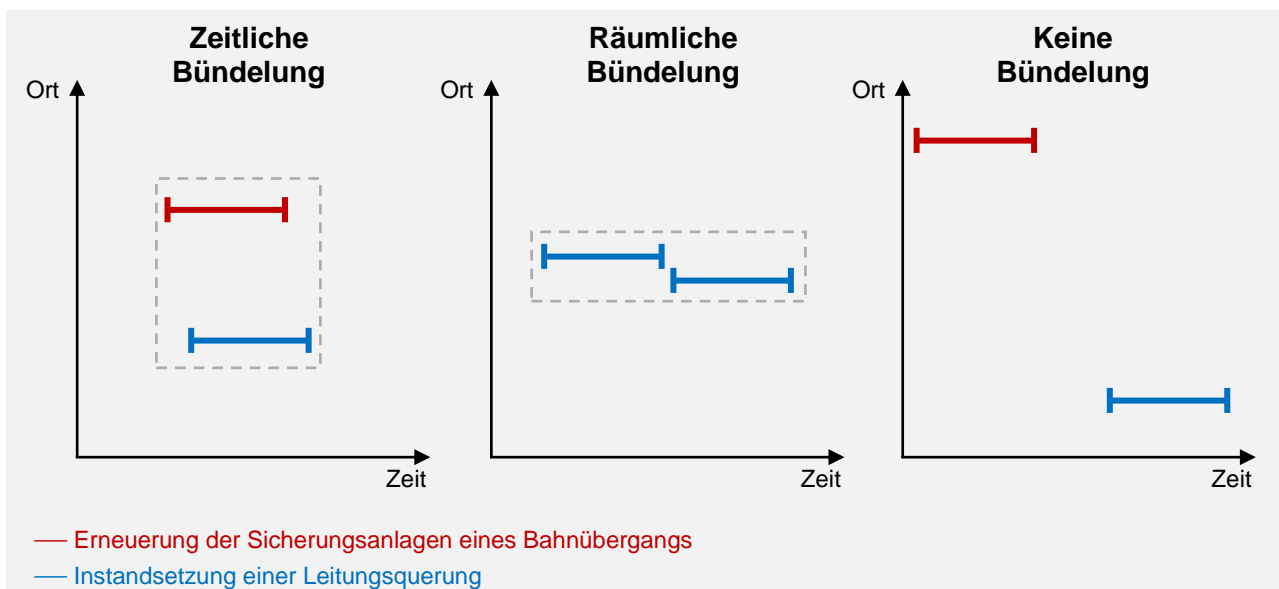


Abbildung 1: Veranschaulichung der zwei Varianten von Bündelung von Investitionsprojekten. Liegen zwei Projekte zeitlich nahe beieinander, ist gegebenenfalls Potenzial für eine zeitliche Bündelung vorhanden. Liegen zwei Projekte räumlich nahe beieinander und benötigen sie ähnliche oder dieselben Massnahmen, ist gegebenenfalls Potenzial für eine räumliche Bündelung vorhanden. Liegen zwei Projekte weder zeitlich noch räumlich beieinander und unterscheiden sich die auszuführenden Arbeiten, kommt keine Bündelung zustande.

1.2.2 Chancen: Synergieeffekt

Die Bündelung von Investitionsprojekten hat grosses Potenzial um den Substanzerhalt der Bahninfrastruktur effizient und ressourcenschonend zu gestalten. Mit der Bündelung von Investitionsprojekten entsteht ein Synergieeffekt in der Projektierung wie auch in der Ausführung der gebündelten Projekte. Der Synergieeffekt unterscheidet sich in den zwei Varianten der Bündelung [8]:

- Für Projekte, welche für ihre Ausführungsphase eine Streckensperrung erfordern, bietet die zeitliche Bündelung einen Vorteil gegenüber der Einzelausführung der Projekte. Eine Streckensperrung kann räumlich oder zeitlich ausgeweitet und für die gebündelten Projekte gemeinsam ausgenutzt werden. Der Synergieeffekt äussert sich in der Tatsache, dass auf einer Strecke nur eine Sperrung erforderlich ist anstatt zwei aufeinanderfolgende. Situativ kann eine Streckensperrung sogar ohne zeitliche oder räumliche Ausweitung ausgenutzt werden.

- Für Projekte mit denselben oder ähnlichen Massnahmen bietet die räumliche Bündelung einen Vorteil gegenüber der Einzelausführung der Projekte. Der Synergieeffekt äussert sich in der Tatsache, dass der Aufwand für Vorbereitungs- sowie Nachbearbeitungsarbeiten einer Baustelle gesenkt wird, da dasselbe Fachpersonal sowie dieselben Werkzeuge, Maschinen und Materialien eingesetzt werden können und Installationsplätze nur einmal auf- und abgebaut werden müssen.

Durch den Synergieeffekt bei der zeitlichen Bündelung entstehen weniger Ausfälle im Erlös der Trassenverkäufe für die ISB. Mit dem Synergieeffekt bei der räumlichen Bündelung werden die Ausgaben für eine Baustelle gesenkt. Die ISB profitiert somit vom Synergieeffekt in der Form von Projektkosteneinsparungen. Mit der Bündelung von Investitionsprojekten können Projektkosteneinsparungen im zweistelligen Prozentbereich erreicht werden [9].

Idealerweise profitieren sämtliche Stakeholder von der Bündelung von Investitionsprojekten. Aufgrund seltener vorkommenden Streckensperrungen ist der Eisenbahnbetrieb weniger häufig eingeschränkt. Fahrgäste profitieren von der Bündelung von Investitionsprojekten, indem das Angebot für sie häufiger uneingeschränkt verfügbar ist. Des Weiteren werden negative Auswirkungen einer Baustelle auf ihre Umwelt gesenkt, da Baustellen an einem Ort durch die Bündelung von Investitionsprojekten seltener vorkommen [8].

Zusammenfassend wird der Substanzerhalt mit der Bündelung von Investitionsprojekten effizienter ausgestaltet, indem an einem Ort über mehrere Jahre weniger Baustellen stattfinden. Dies ermöglicht eine wirksame Bewältigung der zukünftigen Herausforderungen des Substanzerhalts in der Eisenbahninfrastruktur. Ferner bietet die Bündelung von Investitionsprojekten Vorteile für die Stakeholder, einschliesslich der ISB, der Fahrgäste sowie der Umwelt.

1.2.3 Synchronisierung von Anlagenlebenszyklen

In der Bündelung von Investitionsprojekten spielt die Synchronisierung von Anlagenlebenszyklen eine wesentliche Rolle. Werden zwei Erneuerungs- oder Instandsetzungsprojekte gleichzeitig oder direkt nacheinander ausgeführt, beginnt für alle in den Projekten involvierten Anlagen ein neuer Lebenszyklus zu derselben Zeit. Da die involvierten Anlagen bei der Bündelung von Investitionsprojekten nicht in jedem Fall zum genauen Zeitpunkt des Erreichens ihrer Nutzungsdauer erneuert werden können, ist es möglich, dass einzelne Anlagen vorzeitig beziehungsweise nachzeitig erneuert werden. Die Synchronisierung von Anlagenlebenszyklen mit den negativen Auswirkungen der vorzeitigen und nachzeitigen Erneuerung ist in der Abbildung 2 beispielhaft dargestellt.

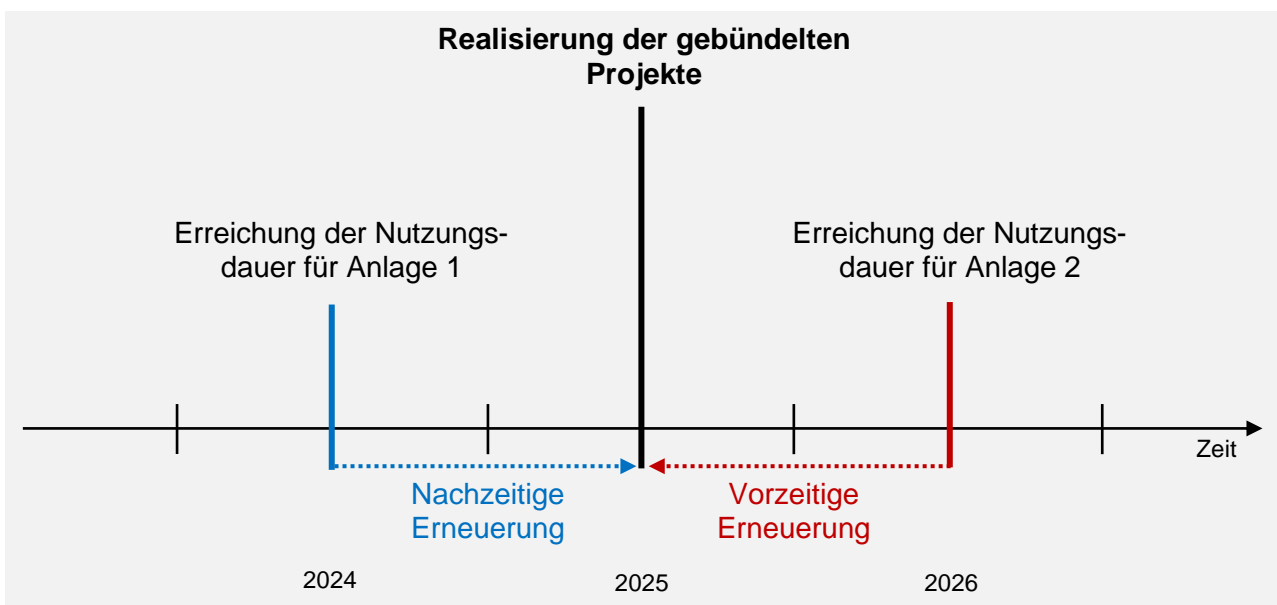


Abbildung 2: Beispiel von vorzeitiger und nachzeitiger Erneuerung von Anlagen. Diese Effekte können bei der Synchronisierung der Anlagenlebenszyklen für eine Bündelung von Investitionsprojekten auftauchen.

Vorzeitige beziehungsweise nachzeitige Erneuerungen wirken sich auf die ISB negativ aus. Bei der Bündelung von Investitionsprojekten entsteht ein Trade-Off zwischen dem im vorherigen Kapitel beschriebenen Synergieeffekt und den negativen Folgen von vorzeitigen beziehungsweise nachzeitigen Erneuerungen (siehe Kapitel 2.2). Diesen Trade-Off gilt es situationsspezifisch zu überprüfen und die Durchführbarkeit einer Bündelung der Investitionsprojekte hinsichtlich der Synchronisierung der Anlagenlebenszyklen zu entscheiden. Wie der Trade-Off zwischen Synergieeffekt und negativen Folgen der Synchronisierung der Anlagenlebenszyklen überprüft und abgewogen wird, ist unter dem Kapitel 4.2 beschrieben.

1.2.4 Problemstellung

Die Bündelung von Investitionsprojekten ist eine moderne Methode im Substanzerhalt der Eisenbahninfrastruktur. Sie wurde in den letzten Jahren hauptsächlich im Zusammenhang mit dem Abbau des substanzialen Nachholbedarfs angewendet [10]. Obwohl diese Methode als vielversprechender Lösungsansatz im Umgang mit den zukünftigen Herausforderungen des Substanzerhalts gilt, existieren in der Praxis bisher nur wenige Grundlagen. Bündelungen von Investitionsprojekten werden bisher manuell unter Einbezug der vorhandenen «Best Practice» und Expertenmeinungen vorgenommen [11]. Dabei bestehen die Risiken, dass effizienzsteigernde Bündelungsmöglichkeiten aufgrund von Ad hoc Entscheidungen übersehen werden und dass effizienzmindernde Bündelungen vorgenommen werden.

Abklärungen, welche in Bezug auf den Trade-Off im Bereich der Synchronisierung der Anlagenlebenszyklen ohne moderne Hilfsmittel durchgeführt werden müssen, nehmen in der Praxis viel Zeit in Anspruch. Das Vorgehen für die Bündelung von Investitionsprojekten, wie es heute in der Praxis angewendet wird, ist also nicht nur anfällig auf qualitative Einschränkungen, sondern schöpft auch nicht die zeitlichen Vorteile aus, die mit heutigen Hilfsmitteln erzielt werden könnten. Das grosse Potenzial, welches die Bündelung von Investitionsprojekten für den Substanzerhalt der Zukunft bietet, wird mit der heutigen Anwendung nicht ausgeschöpft. Intelligente computerbasierte Programme für die Planung sowie für die Ausführung von Substanzerhaltungsmassnahmen werden im Hinblick auf die steigenden Anforderungen in Zukunft unverzichtbar. Solche Programme sind für die Praxis bisher jedoch noch nicht vorhanden.

1.3 Ziel und Mehrwert der Arbeit

Ziel dieser Arbeit ist es, heute zur Verfügung stehende Technologien zu nutzen, damit das grosse Potenzial der Bündelung von Investitionsprojekten ausgeschöpft werden kann. Dazu wird ein Tool zur digitalen Bündelung von Investitionsprojekten (TDBI) entwickelt, welches auf der Basis der vorhandenen Investitions- sowie Anlagendaten einer ISB den Prozess der Bündelung von Investitionsprojekten im Bereich Synchronisierung von Anlagenlebenszyklen unterstützt. Die Daten werden für diese Arbeit durch die Schweizerische Südostbahn AG (SOB) zur Verfügung gestellt. Aus den vorhandenen Daten berechnet das TDBI die quantitativen Kenngrössen der vorzeitigen und der nachzeitigen Erneuerung sowie die des Synergieeffekts. Die Kenngrössen werden einander gemäss dem entstehenden Trade-Off gegenübergestellt. Aus der Gegenüberstellung wird ein Fazit gezogen und der ISB eine Empfehlung abgegeben, ob eine Bündelung in Bezug auf die Synchronisierung der Anlagenlebenszyklen durchgeführt werden soll oder nicht. Dieser Prozess funktioniert digital und wird durch das TDBI gesteuert.

Das TDBI gibt eine Empfehlung über die Durchführung einer Bündelung basierend auf den zur Verfügung stehenden Daten innerhalb von wenigen Sekunden ab. Mit dem TDBI wird somit nicht nur eine qualitative Steigerung, sondern auch eine wesentliche Zeiteinsparung erzielt.

Des Weiteren stellt das TDBI einen wichtigen Schritt im Hinblick auf die voranzutreibende Digitalisierung im Bereich des Substanzerhalts in der Bahninfrastruktur dar. Im Bereich der Bündelung von Substanzerhaltungsmassnahmen bildet dieses TDBI den Grundstein für eine flächendeckende Digitalisierung.

2 Grundlagen

2.1 Projektarbeit

In der Projektarbeit «Systematisches Clustering von Investitionsprojekten der Bahninfrastruktur» [8] wurden die Herausforderungen im Substanzerhalt der Eisenbahninfrastruktur aufgegriffen. In der Arbeit wurde zusammen mit Experten und mit Hilfe von Literatur untersucht, welche Faktoren in der Praxis in die Entscheidung über eine Bündelung von Investitionsprojekten einfließen. Für die Ermittlung der Faktoren wurde der Fokus auf die Stakeholder ISB, Drittfirmen (hauptsächlich Baufirmen) und Kundschaft (Eisenbahnverkehrsunternehmen (EVU) wie auch Fahrgäste) gelegt. Die relevanten Faktoren wurden in eine schematische Darstellung («Vorgehensschema») gebracht, geordnet nach der Grösse ihres Einflusses auf die Entscheidung über eine Bündelung.

Hinsichtlich einer bis dahin fehlenden Systematik in der Bündelung von Investitionsprojekten wurde ein Vorgehensschema entwickelt, um ein einheitliches Vorgehen in der Praxis zu ermöglichen. Das Vorgehensschema dient einer ISB als Subprozess innerhalb des Prozesses der Projektinitialisierung. Das bedeutet, dass eine ISB bei der Initialisierung eines Investitionsprojekts mit Hilfe des Vorgehensschemas nach Möglichkeiten der Bündelung mit anderen Investitionsprojekten suchen und gefundene Möglichkeiten überprüfen kann. Das Vorgehensschema ist in der Abbildung 4 dargestellt.

Dem Vorgehensschema kann entnommen werden, dass folgende zehn Faktoren für eine Entscheidung über eine Bündelung von Investitionsprojekten relevant sind:

- 1. Bündelungsmöglichkeiten im Investitionsplan:** Bei der Initialisierung eines Investitionsprojekts wird der Investitionsplan nach Projekten überprüft, die für eine Bündelung mit dem zu initialisierenden Projekt in Erwägung gezogen werden. Dabei wird ein mögliches Projekt zur Bündelung anhand des Zeitpunkts (potenzielle zeitliche Bündelung), des Ortes und der Massnahmen des Projekts (potenzielle räumliche Bündelung) ausfindig gemacht. Sind im Investitionsplan keine Projekte vorhanden, die für eine Bündelung in Frage kommen, wird das zu initialisierende Projekt einzeln ausgeführt. Sind im Investitionsplan aber Projekte vorhanden, die für eine Bündelung mit dem zu initialisierenden Projekt in Erwägung gezogen werden, wird die Eignung einer Bündelung mit den folgenden Faktoren überprüft.
- 2. Physische Abhängigkeiten von Anlagen:** Physische Abhängigkeiten der durch ein Projekt betroffenen Anlagen zu anderen Anlagen werden bei der Initialisierung eines Investitionsprojekts überprüft. Gibt es physische Abhängigkeiten, die nicht Teil des ursprünglichen Projekts sind, erfolgt eine Erweiterung des Mengengerüsts des Projekts. Eine Erweiterung des Mengengerüsts kann als eine Art von Bündelung angesehen werden. Ein simples Beispiel: Ein Viadukt der Eisenbahn wird im Rahmen eines Investitionsprojekts erneuert. Die sich auf dem Viadukt befindenden Fahrbahn-, Signal- sowie Fahrstromanlagen müssen durch den Eingriff ebenfalls ab- und wieder aufgebaut werden.
- 3. Synchronisierung der Anlagenlebenszyklen:** Beschreibung siehe Kapitel 1.2.3
- 4. Verfügbarkeit finanzieller Mittel:** Die Verfügbarkeit benötigter finanzieller Mittel für eine Bündelung von Investitionsprojekten wird überprüft. Bei der Einzelausführung von mehreren Investitionsprojekten liegen die Zeitpunkte der Ausführung und so auch die Ausgaben für die einzelnen Projekte situativ einige Jahre auseinander. Im Gegensatz dazu erhöhen sich bei einer Bündelung von Projekten die Ausgaben, die zu demselben Zeitpunkt getätigt werden müssen. Daher muss sorgfältig überprüft werden, ob die finanziellen Mittel für die kurzfristig höheren Ausgaben vorhanden sind oder nicht.

5. **Veränderung der Baudauer:** Die Veränderung der Baudauer stellt einen wesentlichen Faktor in der Entscheidung über eine Bündelung von Investitionsprojekten dar. Die Baudauer des zu initialisierenden Projekts wird als Basis vorausgesetzt. Dann wird überprüft, inwiefern sich die Baudauer bei einer Bündelung es Projekts mit einem anderen Projekt verändern würde. Dabei können drei Szenarien entstehen, die in der Abbildung 3 dargestellt sind.

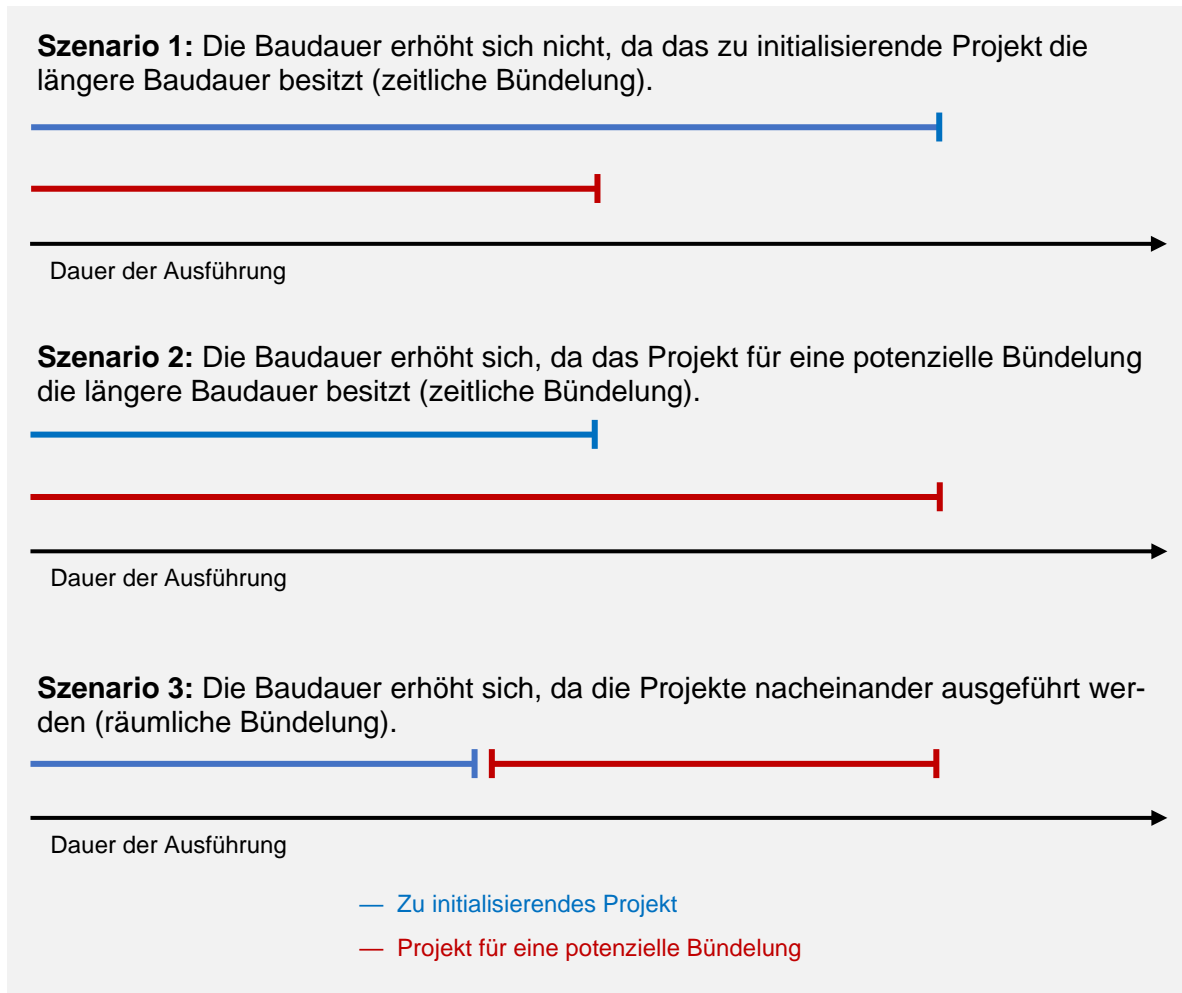


Abbildung 3: Darstellung der drei Szenarien zu der Veränderung der Baudauer bei einer Bündelung von Investitionsprojekten gegenüber der Einzelausführung des zu initialisierenden Projekts.

Die drei Szenarien erhalten ihre Relevanz, wenn es darum geht, ob die Projekte in ihrer Einzelausführung Streckensperrungen zur Folge hätten und wie die Streckensperrungen bei einer Bündelung der Projekte gemeinsam koordiniert werden könnten. Wird davon ausgegangen, dass beide Projekte eine Streckensperrung zur Folge hätten, verlängern sich die Streckensperrungen bei einer Bündelung in den Szenarien 2 und 3. Abgesehen davon dehnt sich eine Streckensperrung bei einer Bündelung von Projekten in allen Szenarien, wobei in der Regel bei der zeitlichen Bündelung (Szenarien 1 und 2) mehr als bei der räumlichen Bündelung (Szenario 3), räumlich aus.

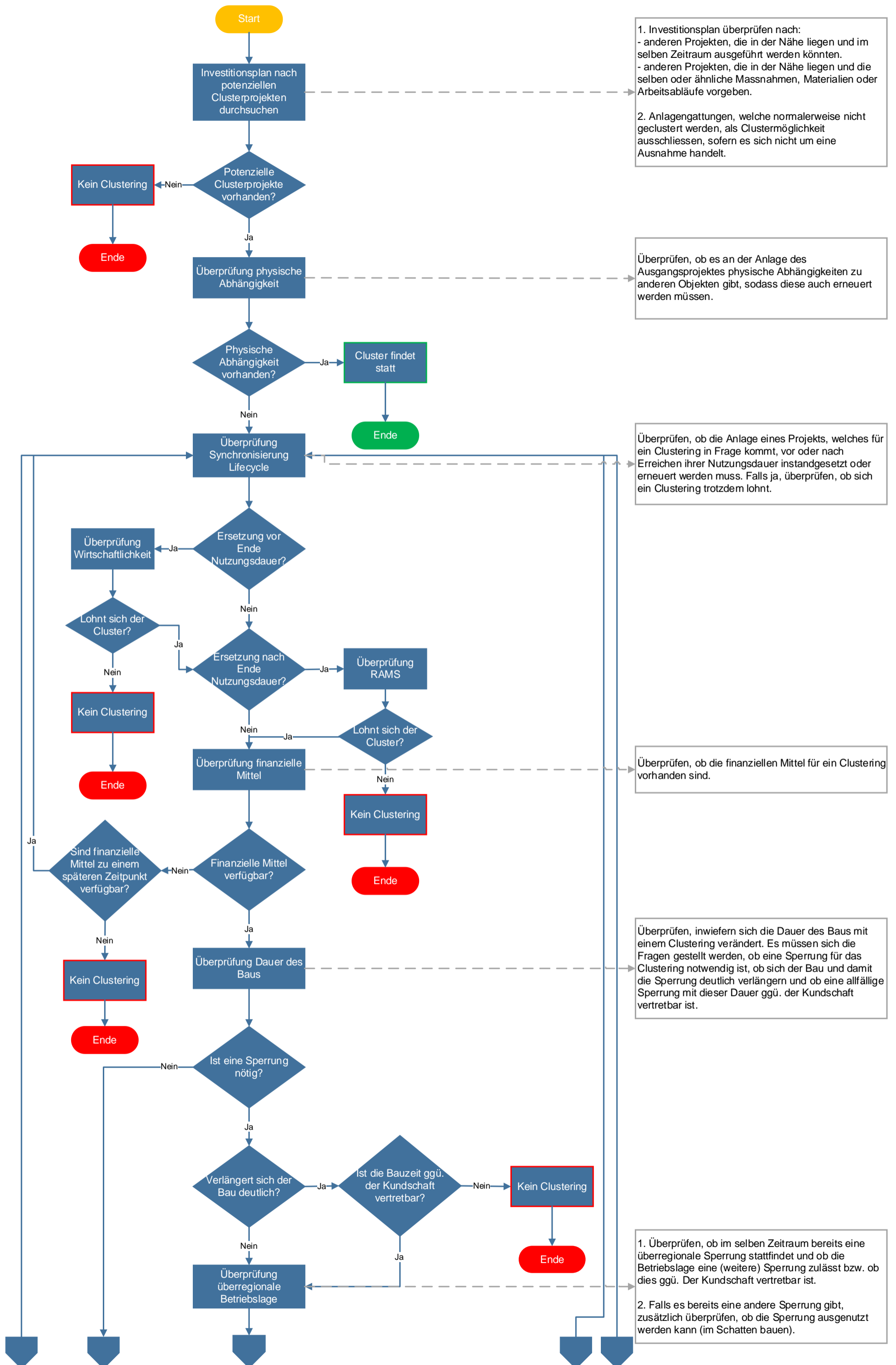
Da eine Streckensperrung, sofern sie während den Eisenbahn-Betriebszeiten stattfindet, einen direkten negativen Einfluss auf den Bahnbetrieb und somit auf das Angebot für Fahrgäste hat, muss eine zeitliche, wie auch eine räumliche Ausdehnung einer Streckensperrung gut überlegt sein. Um die Einschränkungen auf das Angebot in einem angemessenen Ausmass zu halten, hat die SOB intern definiert, dass eine totale Streckensperrung mit Bahnersatzangeboten nicht länger als fünf Wochen am Stück andauern darf, sowie die Distanz für ein einzelnes Bahnersatzangebot zu bewältigen sein muss. Ein totaler Unterbruch einer Strecke findet idealerweise in den Sommerferien statt, um den Pendlerverkehr möglichst wenig einzuschränken.

Eine zeitliche und/oder räumliche Ausdehnung einer Streckensperrung aufgrund einer Bündelung von Investitionsprojekten bietet den Stakeholdern jedoch nicht nur Nachteile, sondern auch Vorteile. Während eine gebündelte Streckensperrung zwar eine längere und grössere Einschränkung des Angebots für Fahrgäste bedeutet, finden im Gegensatz dazu bei einer Einzelausführung der Projekte mehrere Sperrungen innerhalb eines kurzen Zeitraumes auf einer Strecke statt. Somit ist dieser Faktor ein Abwägen zwischen der Dauer sowie der Grösse einer Einschränkung und der Häufigkeit von regelmässigen kleineren Einschränkungen auf einer Strecke.

- 6. Überregionale Betriebslage:** Bei Einschränkungen auf den Bahnbetrieb für die Ausführung von Investitionsprojekten ist die überregionale Betriebslage zu berücksichtigen. Hat eine Bündelung von Projekten eine Streckensperrung zur Folge, die den Bahnbetrieb unmittelbar einschränkt, können die gebündelten Projekte nur ausgeführt werden, wenn dies die überregionale Betriebslage zulässt. Sind zum Zeitpunkt der Ausführung gebündelter Projekte bereits andere Einschränkungen in einer Region vorhanden, müssen die Eingriffe gemeinsam koordiniert oder zeitlich versetzt durchgeführt werden.

Jedoch können gebündelte Projekte auch von bereits vorgesehenen Einschränkungen in demselben Zeitraum in einer Region profitieren. So wurde im Sommer des Jahres 2023 die Strecke der Schweizerischen Bundesbahnen AG (SBB) zwischen Uznach und Rapperswil für den Bau eines Doppelspur-Abschnitts für fünf Wochen gesperrt. In derselben Zeit baute die SOB auf ihrer Infrastruktur zwischen Biberbrugg und Arth-Goldau drei Bahnhöfe um, was eine totale Streckensperrung von drei Wochen zur Folge hatte. Für die Linie des Voralpen-Express, welcher auf beiden gesperrten Streckenabschnitten verkehrt, wurden Schnellbusse als Bahnersatz zwischen Uznach und Arth-Goldau angeboten [12]. Wären die beiden totalen Streckensperrungen nicht gleichzeitig durchgeführt worden, hätten in dieser Region zeitlich versetzt zwei totale Streckensperrungen von insgesamt acht Wochen stattgefunden, was von den beiden involvierten ISB als schwerwiegendere Einschränkung eingestuft wurde.

- 7. Logistische Anforderungen:** Durch die Bündelung von Investitionsprojekten steigen die Anforderungen an die Baustellenlogistik. Bei einer zeitlichen Bündelung steigt insbesondere die Grösse des Platzbedarfs, da unterschiedliche Maschinen und Materialien zu derselben Zeit bereitstehen müssen. Bei einer räumlichen Bündelung steigt insbesondere die Dauer des Platzbedarfs, da Massnahmen mit denselben Maschinen und Materialien nacheinander durchgeführt werden. Bei diesem Faktor wird überprüft, ob die Anforderungen an die Logistik erfüllt werden können oder nicht.
- 8. Ressourcenbedarf in der Projektierung:** Eine Bündelung von Investitionsprojekten erhöht den kurz- oder mittelfristigen Ressourcenbedarf in der Projektierung, da der Projektumfang gegenüber der Einzelausführung des zu initialisierenden Projekts vergrössert wird. Nebst den herkömmlichen Planungsarbeiten müssen die Projekte gemeinsam koordiniert werden. Bei diesem Faktor wird daher überprüft, ob der erhöhte Ressourcenbedarf für die Projektierung gedeckt werden kann oder nicht.
- 9. Ressourcenbedarf in der Ausführung:** Auch in der Ausführung steigt der Ressourcenbedarf bei einer Bündelung von Investitionsprojekten. Entweder sind in der Ausführung mehr Maschinen, Materialien oder Arbeitskräfte eingesetzt (bei der zeitlichen Bündelung) oder die Dauer der eingesetzten Ressourcen verlängert sich (bei der räumlichen Bündelung).
- 10. Präsenz in der Öffentlichkeit:** Grosse Projekte mit Einschränkungen auf den Bahnbetrieb finden in der Öffentlichkeit eine grössere Präsenz als kleine Projekte mit kaum Einschränkungen auf den Bahnbetrieb. Bei der Bündelung von Investitionsprojekten erhöht sich die Wahrscheinlichkeit, dass die Öffentlichkeit auf die Projekte aufmerksam wird. Daher ist wichtig, dass die Öffentlichkeit durch die ISB frühzeitig, transparent und vollständig informiert wird. Dieser Faktor löst im Prozess der Bündelung von Investitionsprojekten keine Entscheidung aus. Dennoch ist er zu beachten und seine Folgen abzuschätzen und einzuplanen.



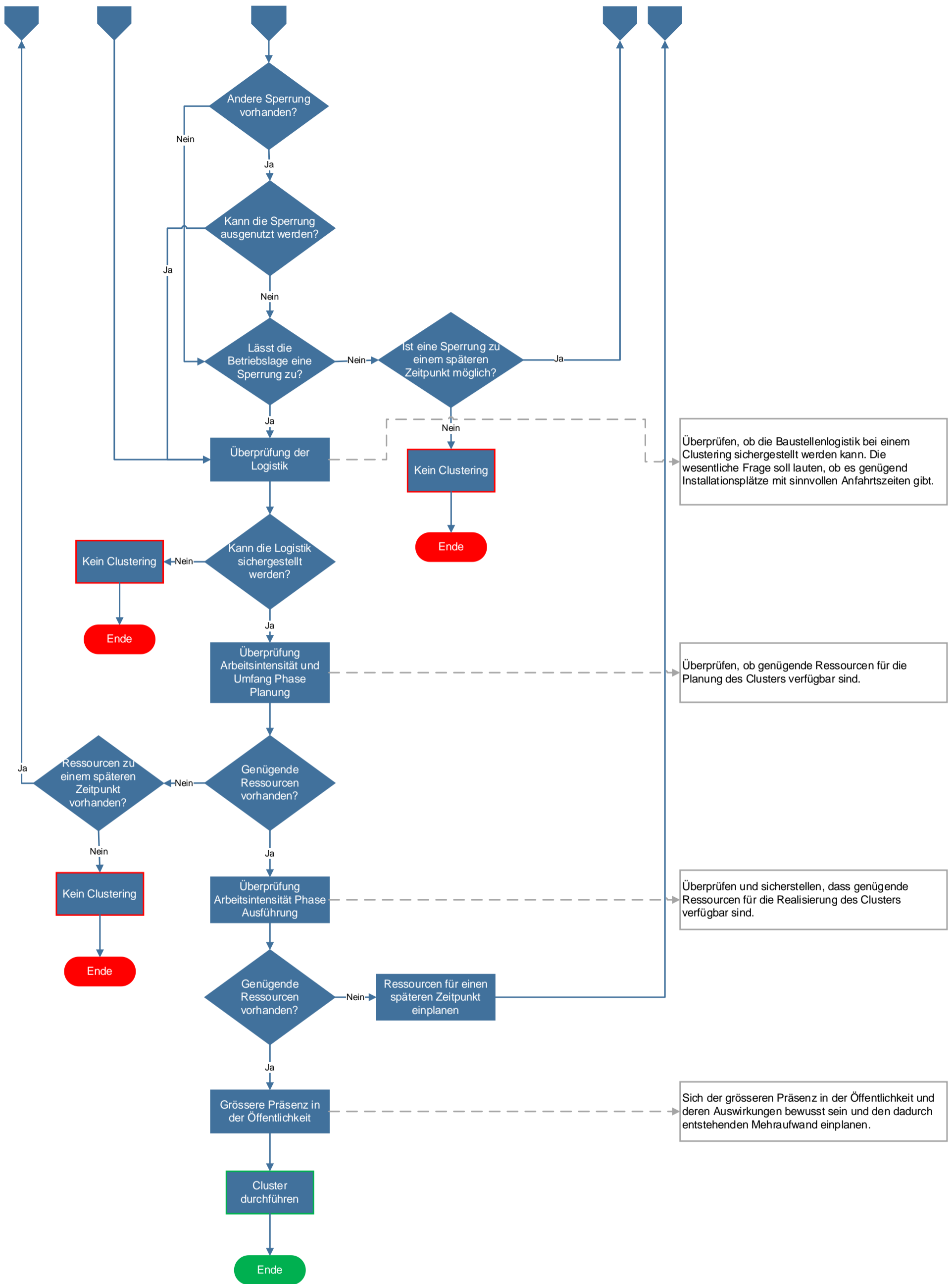


Abbildung 4: Das in der Projektarbeit "Systematisches Clustering von Investitionsprojekten der Bahninfrastruktur" entwickelte Vorgehensschema. In den grau umrandeten Texten sind die für eine Entscheidung über die Bündelung von Investitionsprojekten relevanten Faktoren beschrieben [8].

2.1.1 Einordnung des TDBI in das systematische Vorgehensschema

Gemäss der Zielsetzung dieser Arbeit wird das TDBI in Bezug auf die Synchronisierung der Anlagenlebenszyklen entwickelt. Die Arbeit ist also dem in der Abbildung 5 rot markierten Bereich zuzuordnen.

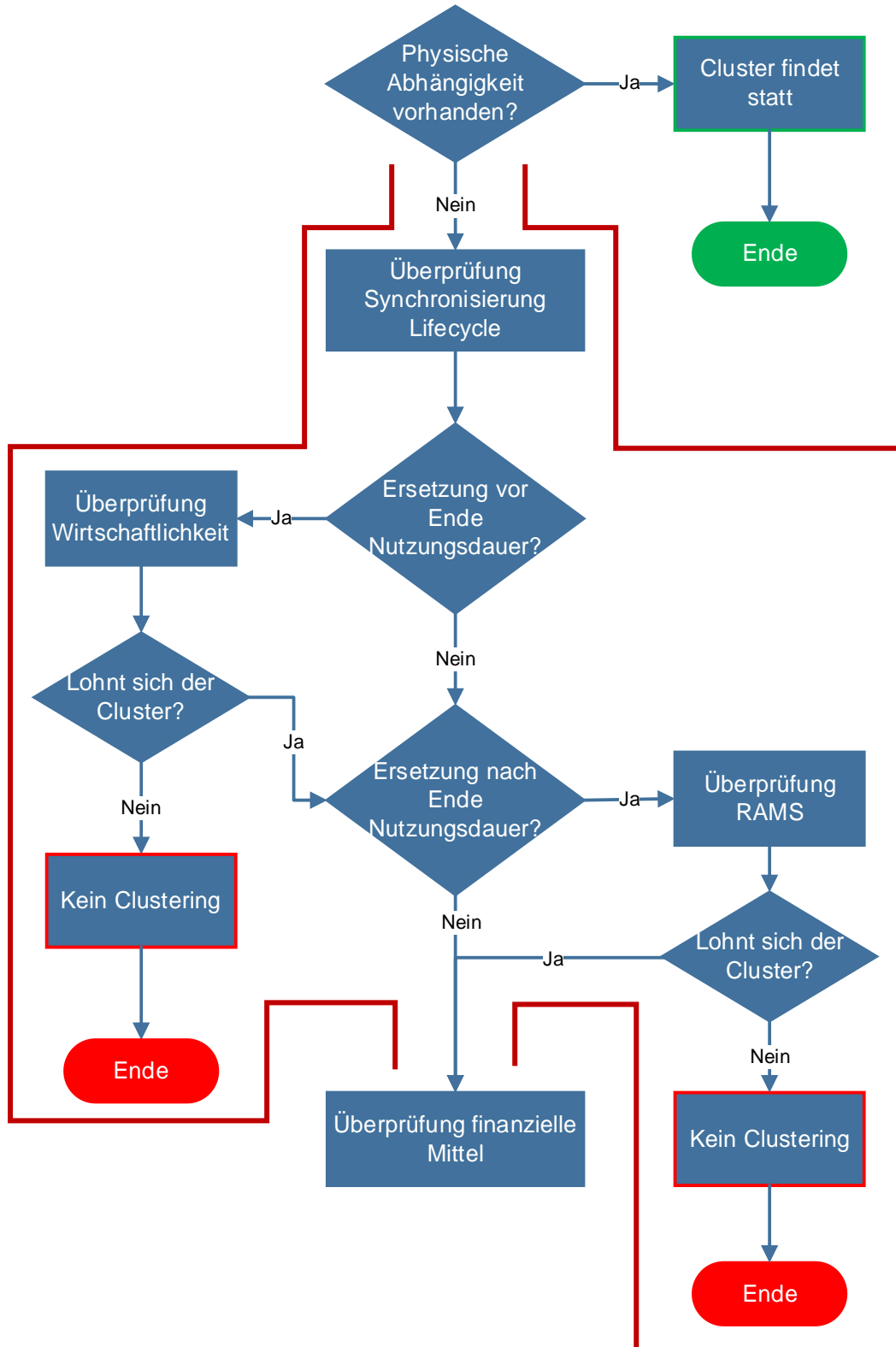


Abbildung 5: Einordnung des TDBI in das im Rahmen der Projektarbeit entwickelte Vorgehensschema. Das in dieser Arbeit zu entwickelnde TDBI wird im rot markierten Bereich tätig sein.

2.1.1.1 Ausgangslage für das TDBI

In den vorhergehenden Schritten des Vorgehensschemas (vor dem rot markierten Bereich in der Abbildung 5) werden durch die ISB manuell folgende zwei Elemente bestimmt:

- Ein zu initialisierendes Projekt, welches im weiteren Verlauf der Arbeit als «Ausgangsprojekt» bezeichnet wird.
- Ein Projekt für eine potenzielle Bündelung mit dem Ausgangsprojekt. Dieses Projekt wird im weiteren Verlauf der Arbeit als «Clusterprojekt» bezeichnet.

Jedes Investitionsprojekt besitzt eine individuelle Projektnummer. Das TDBI erhält somit als Input die beiden Projektnummern des Ausgangsprojekts sowie des ausfindig gemachten Clusterprojekts. Anhand dieser Projektnummern überprüft das TDBI anschliessend die Eignung einer Bündelung zwischen Ausgangs- und Clusterprojekt aus Sicht der Synchronisierung der Anlagenlebenszyklen.

Existieren im Investitionsplan mehrere Clusterprojekte, deren Eignung zur Bündelung überprüft werden sollen, ergeben sich daraus mehrere Clustermöglichkeiten. Diese werden in einer ersten Phase, wie in der Abbildung 6 dargestellt, alle einzeln mit Hilfe des Vorgehensschemas überprüft. Erst wenn alle Clustermöglichkeiten überprüft wurden, kann die Bündelung mehrerer Clustermöglichkeiten in einer zweiten Phase überprüft werden. Daher nimmt das TDBI als Input immer zwei Projektnummern gleichzeitig auf.

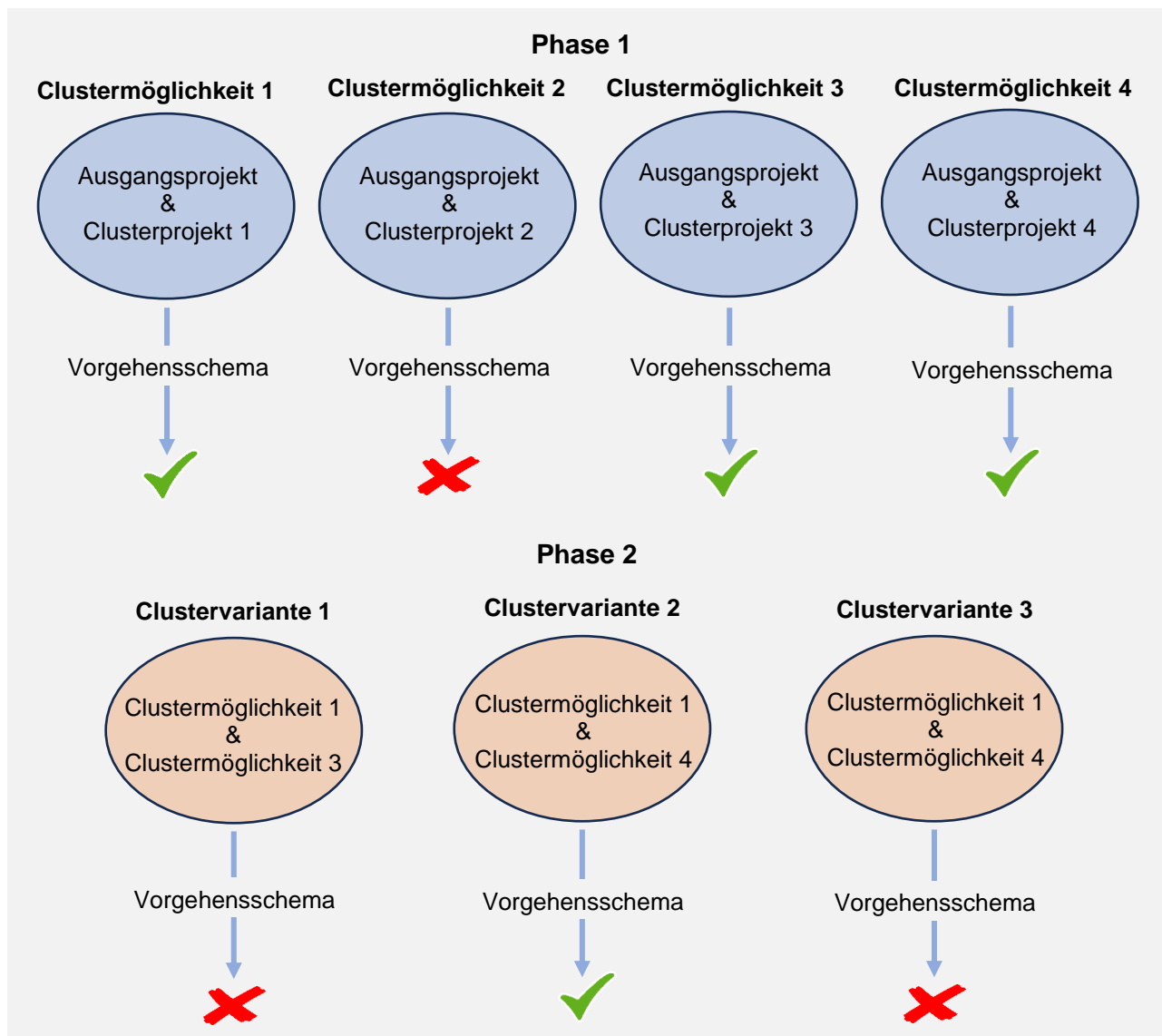


Abbildung 6: Beispielhaftes Vorgehen, wenn im Investitionsplan mehrere mögliche Clusterprojekte existieren [8].

2.1.1.2 Weiteres Vorgehen anhand der Empfehlung des TDBI

Das TDBI gibt der anwendenden ISB eine Empfehlung aus, ob die Bündelung zwischen Ausgangsprojekt und Clusterprojekt aus Sicht der Synchronisierung der Anlagenlebenszyklen durchgeführt werden soll oder nicht. Anhand der Empfehlung fährt die ISB, wie im Vorgehensschema abgebildet, weiter.

2.2 Auswirkungen der Synchronisierung von Anlagenlebenszyklen

Eine ISB baut ihre Instandsetzungsstrategie auf den Anlagenlebenszyklen (LCC) auf. Für die einzelnen Anlagen werden optimale Lebenszyklen gewählt und die Substanzerhaltungsmassnahmen anhand des Anlagenzustands bestimmt [13]. Bei einer Bündelung von Substanzerhaltungsmassnahmen ist es aber in vielen Fällen nicht möglich, Anlagen an das Ende ihres Lebenszyklus zu betreiben und dann rechtzeitig zu erneuern. Situativ werden Anlagen erneuert, bevor oder nachdem sie das Ende ihres Lebenszyklus erreicht haben. Dennoch lohnt sich eine Bündelung von Substanzerhaltungsmassnahmen. Dies nicht nur aufgrund des unter Kapitel 1.2.2 erläuterten Synergieeffekts, der für mehrere Projekte ausgenutzt werden kann. Sie lohnt sich auch, da die Anlagen in der Zukunft aufeinander abgestimmte Lebenszyklen besitzen und bei einer nächsten Instandsetzung zum richtigen Zeitpunkt erneuert werden können, wie die Abbildung 7 anhand eines Beispiels für die Anlagengattung Fahrbahn zeigt.

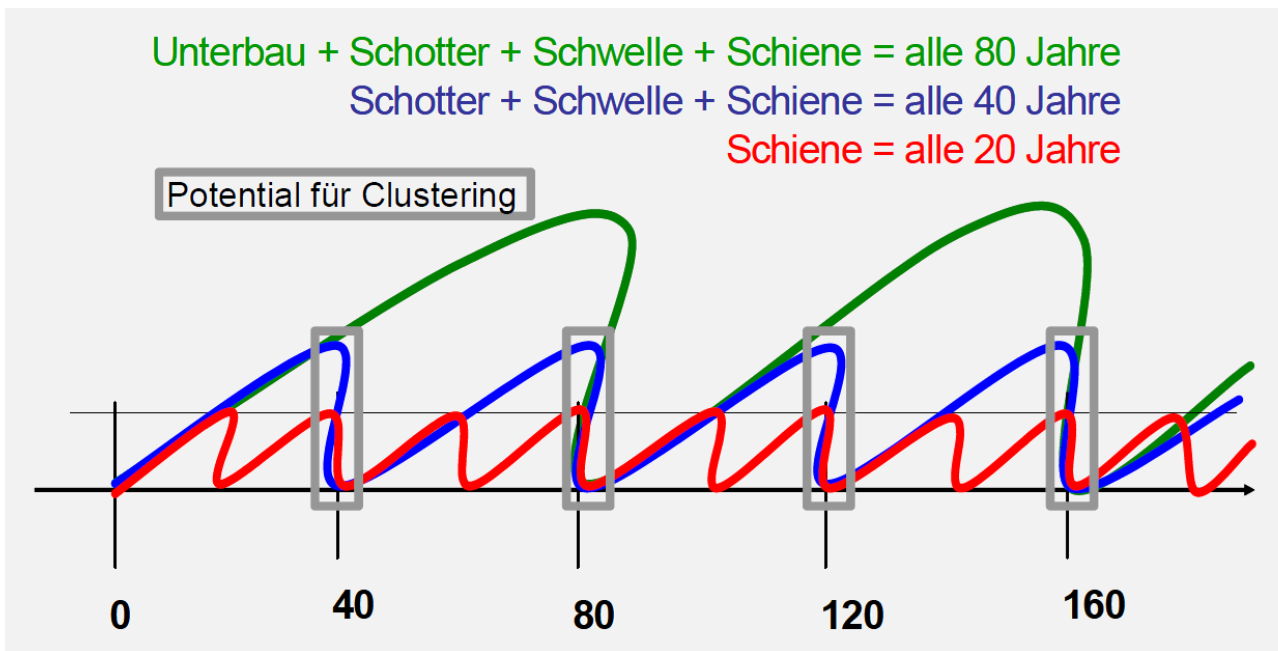


Abbildung 7: Darstellung eines beispielhaften Resultats der Synchronisierung von Anlagenlebenszyklen. Das Beispiel wurde anhand der Anlagengattung Fahrbahn erstellt [9].

Um die zukunftsgerichtete Synchronisierung von Anlagenlebenszyklen zu realisieren, bedarf es einer technisch-wirtschaftlichen Optimierung. Eine rein technische Optimierung greift zu kurz, eine ausschliessliche wirtschaftliche Optimierung läuft Gefahr, den Realitätsbezug zu verlieren. Eine ISB ersetzt dabei keineswegs die Optimierung der einzelnen Instandsetzungsmassnahmen, vielmehr geht es darüber hinaus und setzt eine permanente Optimierung der Einzelmassnahmen (wie im Beispiel der Synchronisierung der Fahrbahnanlagen aus der Abbildung 7) voraus [13]. Mit dem Bestreben der permanenten Optimierung der Einzelmassnahmen ist die SOB bereit, vorzeitige oder nachzeitige Erneuerungen von einzelnen Anlagen in Kauf zu nehmen. Solche Entscheidungen sind aber sorgfältig zu treffen, da ein Trade-Off zwischen synchronisierten Anlagen und der rechtzeitigen Instandsetzung von Einzelanlagen besteht. Die negativen Auswirkungen von vorzeitigen und nachzeitigen Erneuerungen sind in den nächsten zwei Unterkapiteln beschrieben.

2.2.1 Vorzeitige Erneuerung einer Anlage

Wird eine Anlage nicht bis an das Ende ihrer Nutzungsdauer betrieben, sondern vorher erneuert, wird von einer vorzeitigen Erneuerung einer Anlage gesprochen. Eine vorzeitige Erneuerung einer Anlage wirkt sich negativ auf eine ISB aus. In der Praxis wird dafür bei der Eisenbahn- wie auch bei der Strasseninfrastruktur der Begriff «Restwertvernichtung» verwendet [14].

Die Kosten einer Anlage werden durch die ISB zum Zeitpunkt der Beschaffung bezahlt – unabhängig davon, ob die Anlage bis an das Ende ihrer theoretischen Nutzungsdauer betrieben wird oder nicht. Aus finanzieller Sicht kann daher keine Vernichtung eines Restwertes existieren. Aus einer buchhalterischen Sicht jedoch besitzt eine Anlage, die ihre theoretische Nutzungsdauer noch nicht erreicht hat, einen Wert, der nicht abgeschrieben wurde. Das bedeutet, dass eine Anlage, welche nicht vollständig abgeschrieben ist, ohne weitere finanzielle Aufwendungen länger betrieben werden könnte.

Aus Sicht der Nachhaltigkeit bringt eine vorzeitige Erneuerung wirtschaftliche sowie ökologische Einbussen mit sich. Einerseits wird bei der vorzeitigen Erneuerung eine Anlage erneuert, die mit bereits getätigten Ausgaben länger hätte betrieben werden können. Andererseits werden in vielen Fällen Materialien oder Systeme vernichtet, die weiterhin betriebsfähig gewesen wären. Diese Nachhaltigkeitsaspekte sowie die buchhalterische Sicht auf die vorzeitige Erneuerung befürworten die Berücksichtigung einer Restwertvernichtung bei vorzeitiger Erneuerung als negative Auswirkung einer Bündelung von Investitionsprojekten.

Von einem TDBI müssen in Bezug auf die vorzeitige Erneuerung von Anlagen folgende Fragen beantwortet werden können:

- Ist eine vorzeitige Erneuerung erforderlich?
- Um wie viele Jahre der vorzeitigen Erneuerung handelt es sich?
- Wie viel kostet eine vorzeitige Erneuerung in absoluten Zahlen? Sprich, wie viel Restwert wird vernichtet?
- Lohnt sich eine Bündelung von Investitionsprojekten trotz vorzeitiger Erneuerung?

2.2.2 Nachzeitige Erneuerung einer Anlage

Im Gegensatz zu einer vorzeitigen Erneuerung wird eine Anlage bei einer nachzeitigen Erneuerung bis an das Ende ihrer Nutzungsdauer und darüber hinaus betrieben. Durch die ISB werden die Lebenszyklen ihrer Anlagen so definiert, dass diese mit regulären Instandhaltungsmassnahmen ohne Einschränkungen der RAMS-Werte (Reliability = Zuverlässigkeit, Availability = Verfügbarkeit, Maintainability = Instandhaltbarkeit und Safety = Sicherheit) bis an das Ende ihrer Nutzungsdauer betrieben werden können [15].

Werden Anlagen über ihre theoretische Nutzungsdauer hinaus betrieben, besteht das Risiko, dass sie in ihrer Zuverlässigkeit, Verfügbarkeit, Instandhaltbarkeit oder Sicherheit abnehmen. Da die Anlagen ihre RAMS-Vorgaben aber stets erfüllen müssen, erhöhen sich in ihrer Betriebsphase nach der Erreichung der Nutzungsdauer die Aufwände für vermehrte Inspektionen und Instandhaltungsmassnahmen zur Einhaltung der RAMS-Vorgaben. Als negative Auswirkung bei nachzeitiger Erneuerung fallen somit nach der Erreichung der Nutzungsdauer höhere Instandhaltungskosten an als vor der Erreichung der Nutzungsdauer. Die Instandhaltungskosten erhöhen sich dabei jährlich.

Von einem TDBI müssen in Bezug auf die nachzeitige Erneuerung von Anlagen folgende Fragen beantwortet werden können:

- Ist eine nachzeitige Erneuerung erforderlich?
- Um wie viele Jahre der nachzeitigen Erneuerung handelt es sich?
- Wie viel kostet eine nachzeitige Erneuerung in absoluten Zahlen? Sprich, wie gross ist die Differenz zwischen den erhöhten Instandhaltungskosten und den regulären Instandhaltungskosten?
- Lohnt sich eine Bündelung von Investitionsprojekten trotz nachzeitiger Erneuerung?

3 Vorgehen und Methodik

3.1 V-Modell Entwicklungsprozess

Um das Ziel dieser Arbeit, ein TDBI zur Unterstützung bei der Bündelung von Investitionsprojekten zu entwickeln, erfüllen zu können, wird zu Beginn vorgegeben, welche Funktionen ein solches TDBI aufweisen soll. Aus diesem Grund werden in diesem Kapitel die Anforderungen an das TDBI sowie die Spezifikationen des zu entwickelnden TDBI definiert und die Entwicklung anhand des V-Modell Entwicklungsprozesses konzipiert.

Das V-Modell ist ein flexibles Vorgehensmodell, das bei Systementwicklungsprojekten zur Anwendung kommt. Es ist ein etablierter und weit verbreiteter Standard. So wird das Modell für Systementwicklungsprojekte in der öffentlichen Verwaltung in Deutschland eingesetzt und vom Bundesrechnungshof eingefordert [16]. Der Name V-Modell wurde dem Modell aufgrund seiner Form, die wie der Buchstabe V aussieht, gegeben.

In Systementwicklungsprozessen gelangt die ausführende Organisation immer wieder an Entscheidungspunkte. Diese Entscheidungspunkte sind in der Abbildung 8 in der Form des V-Modells dargestellt. Im V-Modell wird zwischen den Ansichten des Auftraggebers und des Auftragnehmers unterschieden. Da das V-Modell in dieser Arbeit lediglich für die Entwicklung eines TDBI verwendet wird und nicht für die Durchführung des gesamten Projektes, werden nur die rot markierten Entscheidungspunkte des V-Modells angewendet. Abgesehen davon werden die beiden Entscheidungspunkte *Gesamtsystem entworfen* und *System entworfen* zu einem Entscheidungspunkt zusammengefasst [17].

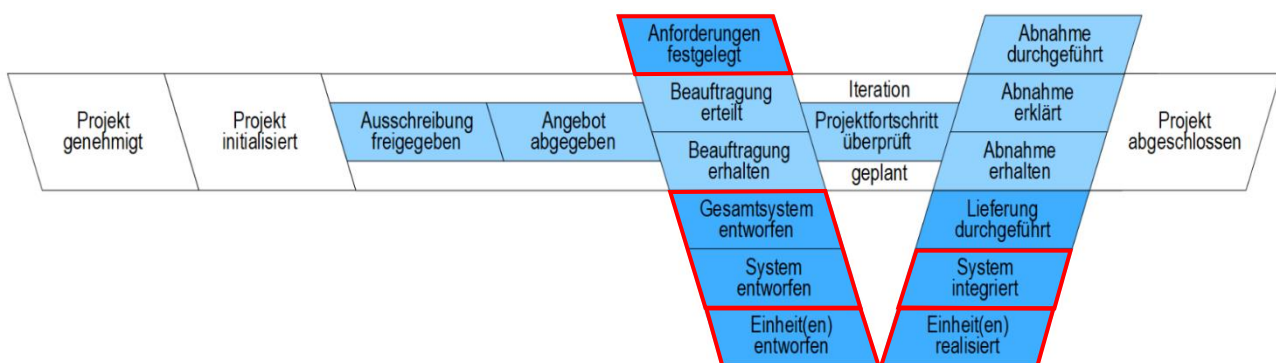


Abbildung 8: Entscheidungspunkte des V-Modell Entwicklungsprozesses. Die rot markierten Entscheidungspunkte sind diejenigen, die für die Entwicklung des TDBI in dieser Arbeit angewendet werden [12].

Im Modell wird das Endprodukt auf der linken Seite spezifiziert und entworfen. Je tiefer die Ebene, desto höher ist der Detaillierungsgrad. Im ersten Schritt werden die Anforderungen an das gesamte System definiert. Im zweiten Schritt wird das gesamte System entworfen. Im dritten Schritt werden einzelne Einheiten entworfen. Demzufolge wird das gesamte System in mehrere Einheiten unterteilt, welche einzeln entworfen werden.

Auf der rechten Seite des Modells wird die Verifikation beziehungsweise die Validierung dargestellt. Bevor das gesamte System getestet werden kann, müssen die einzelnen Einheiten in sich und miteinander funktionieren. Sofern das gesamte System verifiziert ist, es also den definierten Anforderungen gerecht wird, wird es validiert, also auf seine Tauglichkeit in der Praxis überprüft. In den nächsten sechs Unterkapiteln werden die einzelnen Schritte des V-Modells auf das zu entwickelnde TDBI in dieser Arbeit angewendet und das Vorgehen beschrieben.

3.1.1 Systemanforderungen

Nachfolgend werden die Anforderungen, die das TDBI erfüllen soll, aufgelistet:

- Das TDBI soll in seiner vorgesehenen Umgebung funktionieren können. Es soll die zu Verfügung stehenden Investitions- und Anlagendaten der SOB korrekt aufnehmen und verarbeiten.
- Mit den vorhandenen Daten und den Informationen zu den Investitionsprojekten, deren Bündelung überprüft werden soll, soll das TDBI in der Lage sein, eine fundierte Empfehlung über eine Bündelung der Investitionsprojekte abzugeben.
- Die Empfehlung, die das TDBI abgibt, soll nachvollziehbar und transparent sein.
- Auf Fehleingaben oder auf fehlende beziehungsweise falsche Daten soll das TDBI angemessen reagieren können.

3.1.2 Systementwurf

Im Systementwurf wird festgelegt, mit welchen Rahmenbedingungen das TDBI funktionieren muss. Konkret wird beschrieben, mit welchen Inputs das TDBI Outputs generieren soll, die die definierten Anforderungen erfüllen. In der Abbildung 9 ist der Systementwurf des TDBI dargestellt.

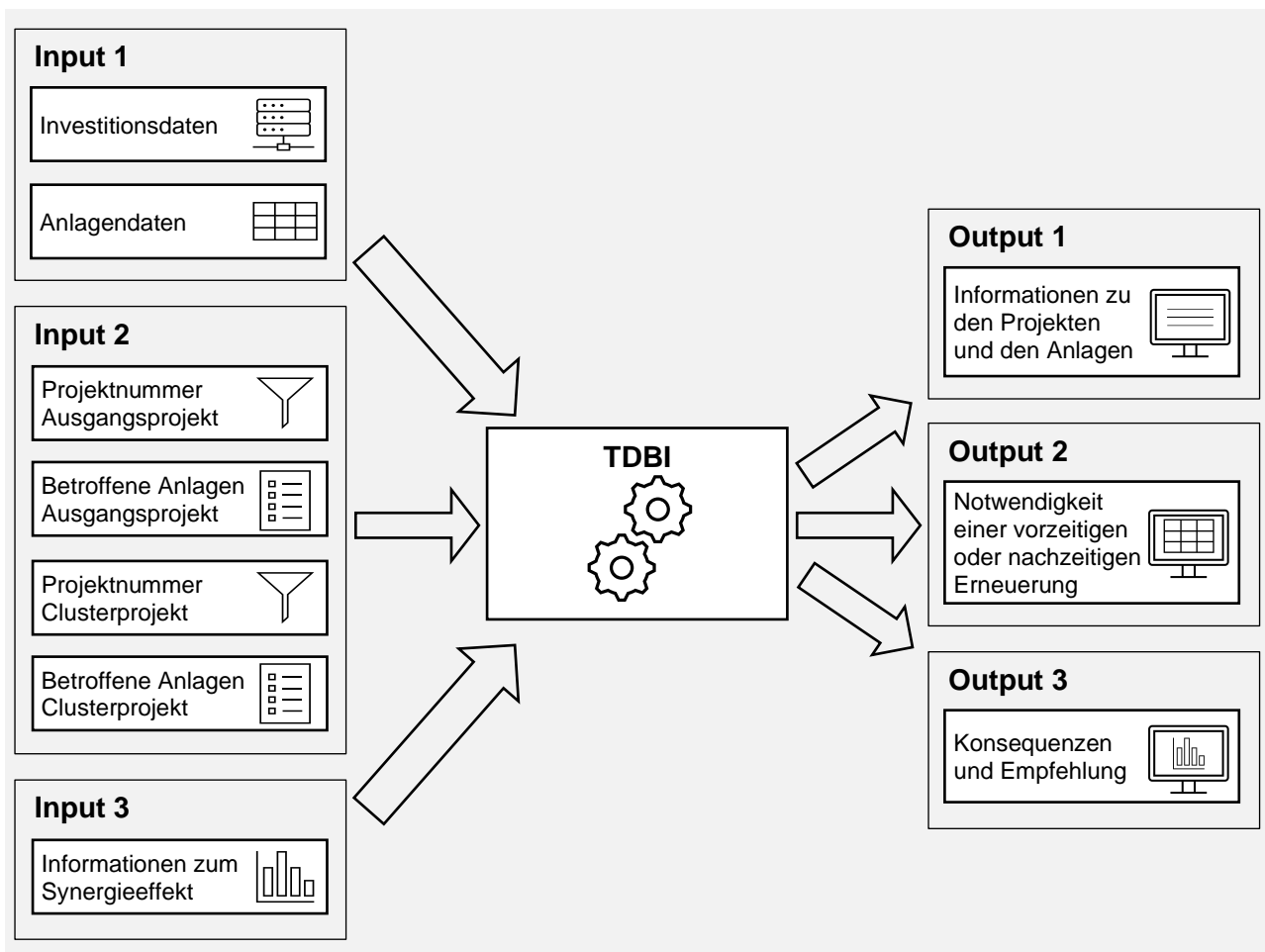


Abbildung 9: Systementwurf des TDBI. Im Systementwurf ist festgelegt, mit welchen Inputs das Tool Outputs generieren soll, die den definierten Anforderungen entsprechen.

3.1.2.1 Inputs

Die Inputs für das TDBI entstehen in drei unterschiedlichen Bereichen. Im ersten Bereich befinden sich die Investitions- und Anlagendaten, welche in das TDBI eingespeist werden. Die Investitionsdaten stammen von Exporten des Investitionsplans aus der Schnittstelle zwischen dem BAV und den ISB «Webinterface Daten Infrastruktur» (WDI) sowie aus dem ERP-System der SOB. Die

Anlagendaten stammen von einem Export aus dem ERP-System der SOB sowie von Anlagendatenbanken der einzelnen Anlagengattungen.

Im zweiten Bereich befinden sich die Projekte, deren Bündelung überprüft werden soll. Wie in dem Kapitel 2.1.1 erläutert, ist die Ausgangslage für die Anwendung des TDBI so, dass in den vorherigen Schritten des beschriebenen Vorgehensschemas zu einem Ausgangsprojekt ein potenzielles Clusterprojekt ausfindig gemacht wurde. Die Projektnummern der beiden Projekte werden durch die anwendende ISB manuell in das TDBI eingespeist. Ebenso werden durch die Anwendende ISB sämtliche Anlagen bestimmt, die durch die beiden Projekte betroffen sind.

Im dritten Bereich befinden sich die Informationen zum Synergieeffekt, der bei der Bündelung der beiden Projekte entsteht. Diese Informationen bilden die Grundlage dafür, welche positiven Auswirkungen eine Bündelung der Investitionsprojekte mit sich zieht.

3.1.2.2 *Outputs*

Das TDBI generiert drei Outputs für die anwendende ISB. Im ersten Output werden Informationen zu den beiden Investitionsprojekten sowie zu den betroffenen Anlagen dargestellt. Dabei werden Informationen mit rein informativem Charakter, wie auch für die weiteren Outputs relevante Informationen ausgegeben.

Im zweiten Output wird vermittelt, ob für eine Bündelung vorzeitige oder nachzeitige Erneuerungen nötig sind. Ebenfalls werden die Zeitpunkte einer möglichen Bündelung dargestellt.

Im Anschluss an die Datenverarbeitung zeigt das TDBI im dritten Output die Konsequenzen einer Bündelung der Investitionsprojekte in Form von Balkendiagrammen und Zahlen. Dabei gibt das TDBI der anwendenden ISB als Text eine Empfehlung ab, ob eine Bündelung hinsichtlich der Synchronisierung der Lebenszyklen der betroffenen Anlagen durchgeführt werden soll oder nicht. Bei der Empfehlung einer Bündelung von Projekten wird ausserdem dargelegt, welcher der beiden Zeitpunkte optimal ist.

3.1.3 **Entwurf der Einheiten**

Mit der Festlegung der Anforderungen an das TDBI sowie der Rahmenbedingungen, mit welchen das TDBI funktionieren muss, kann die Entwicklung des TDBI geplant werden. Die Entwicklung wird in vier Einheiten aufgeteilt, welche für die Planung und die Erarbeitung zentral sind:

- **Einheit 1:** In der ersten Einheit werden sämtliche Investitions- und Anlagendaten, die für ein funktionierendes TDBI benötigt werden, beschafft, analysiert, nach Bedarf aufbereitet und die aufbereiteten Daten in das TDBI importiert.
- **Einheit 2:** In der zweiten Einheit werden die Funktionen des TDBI programmiert, damit es innerhalb der importierten Investitions- und Anlagendaten sämtliche benötigten Informationen zu den vorgegebenen Investitionsprojekten und zu den betroffenen Anlagen sammeln und die gesammelten Informationen in einem ersten Output darstellen kann.
- **Einheit 3:** In der dritten Einheit werden die Funktionen des TDBI programmiert, damit es die Notwendigkeit von vorzeitiger und nachzeitiger Erneuerung ermitteln und in einem zweiten Output darstellen kann.
- **Einheit 4:** In der vierten Einheit werden die Funktionen des TDBI programmiert, damit es die Auswirkungen der Synchronisierung der Anlagenlebenszyklen berechnen und den Trade-Off in der Synchronisierung der Anlagenlebenszyklen herbeiführen kann. Aus dem Trade-Off soll das TDBI ein Fazit ziehen und eine Empfehlung in einem dritten Output ausgeben können.

3.1.4 Testen der Einheiten

Die einzelnen Einheiten werden bei der Entwicklung laufend getestet. Sobald die erste Einheit funktionstüchtig ist, wird die zweite Einheit entwickelt und laufend zusammen mit der ersten Einheit getestet. Dies wird so fortgeführt, bis schlussendlich alle vier Einheiten korrekt miteinander funktionieren. Die Tests werden mit realen und künstlich generierten Projekten durchgeführt.

3.1.5 Integrationstest

Um die erfolgreiche Integration des TDBI zu testen, werden mehrere im Investitionsplan der SOB existierende Projekte mit unterschiedlichen Merkmalen im TDBI verwendet und beobachtet, ob das TDBI mit den realen Daten wunschgemäss umgehen kann und ob es sich in allen Fällen korrekt verhält. Der Integrationstest ist bestanden, wenn das TDBI für acht verschiedene Kombinationen von Investitionsprojekten mit unterschiedlichen Merkmalen korrekt funktioniert.

3.1.6 Validierung des Systems

Die Validierung des TDBI, also die Überprüfung, ob das TDBI in der Praxis anwendbar ist, wird mittels eines Proof of Concept durchgeführt. Dieser Proof of Concept ist in Kapitel 5 beschrieben.

3.2 Methodik

Mit dem V-Modell wurden die Anforderungen an das TDBI festgelegt und die Entwicklung des TDBI geplant. In diesem Unterkapitel ist beschrieben, welche methodischen Ansätze für diese Arbeit verfolgt und im TDBI verarbeitet wurden.

Damit das TDBI entsprechend entwickelt werden konnte, wurden für diese Arbeit existierende literarische Grundlagen zum Thema Bündelung oder Clustering von Investitionsprojekten berücksichtigt. Insbesondere die zentrale Fragestellung wie mit dem Trade-Off in der Synchronisierung der Anlagenlebenszyklen korrekt umgegangen werden soll, wurde mittels Literaturrecherche eruiert.

Nebst der Aneignung von Grundlagen wurden die benötigten Investitions- und Anlagendaten von der SOB beschafft und analysiert. Die Datenanalyse zeigte, dass die Qualität und die Vollständigkeit der Daten zu verfälschten Ergebnissen führen würden. Daher wurden die Daten situationsgerecht aufbereitet. Der Investitionsplan, welcher aus dem WDI exportiert wurde, sowie die Investitions- und Anlagendatenexporte aus dem ERP-System der SOB wurden dabei aber nicht verändert, um die Möglichkeit der Aktualisierung der Daten zu gewährleisten.

Im Anschluss an die Datenbeschaffung, -analyse und -aufbereitung wurde das TDBI gemäss dem beschriebenen V-Modell Entwicklungsprozess in den vier einzelnen Einheiten entwickelt und getestet. Letztlich wurden mit Experten Gespräche geführt, um eine realistische Parametereinstellung zu ermitteln. Die Parametereinstellung beeinflusst die negativen Auswirkungen bei einer nachzeitigen Erneuerung und die positiven Auswirkungen des Synergieeffekts.

Das Resultat sowie die einzelnen Arbeitsschritte (Entwicklung und Testen der vier Einheiten) sind im nächsten Kapitel beschrieben.

4 Das TDBI

4.1 Beschreibung der Anwendung

Das TDBI wurde mit der Programmiersprache Python benutzerfreundlich und effizient entwickelt. Es besteht aus sieben Schritten: In den ersten vier Schritten wird die anwendende ISB zu einer aktiven Handlung aufgefordert. Hierbei handelt es sich um Inputs des Input-Bereichs 2 (siehe Systementwurf in Abbildung 9), die das TDBI für seine Berechnungen benötigt. In den letzten drei Schritten berechnet das TDBI die drei Outputs, die der ISB zur Verfügung gestellt werden, damit aus der Sicht der Synchronisierung der Anlagenlebenszyklen über eine sinnvolle Bündelung von Investitionsprojekten entschieden werden kann.

Für die erfolgreiche und gewinnbringende Nutzung des TDBI wurde eine vollständige und detaillierte Nutzungsanleitung erstellt. Die Nutzungsanleitung ist im Anhang D dieser Arbeit zu finden.

4.1.1 Aktive Handlung der anwendenden ISB

Sofern das TDBI mit den notwendigen Investitions- und Anlagendaten ausgestattet ist (siehe Kapitel 4.3.1) und das Programm aktiviert wurde, wird mit einer ersten aktiven Handlung durch die anwendende ISB die Projektnummer des Ausgangsprojekts im TDBI eingegeben. Die Eingabe der Projektnummer geschieht über ein sich öffnendes Fenster, wie in der Abbildung 10 dargestellt.

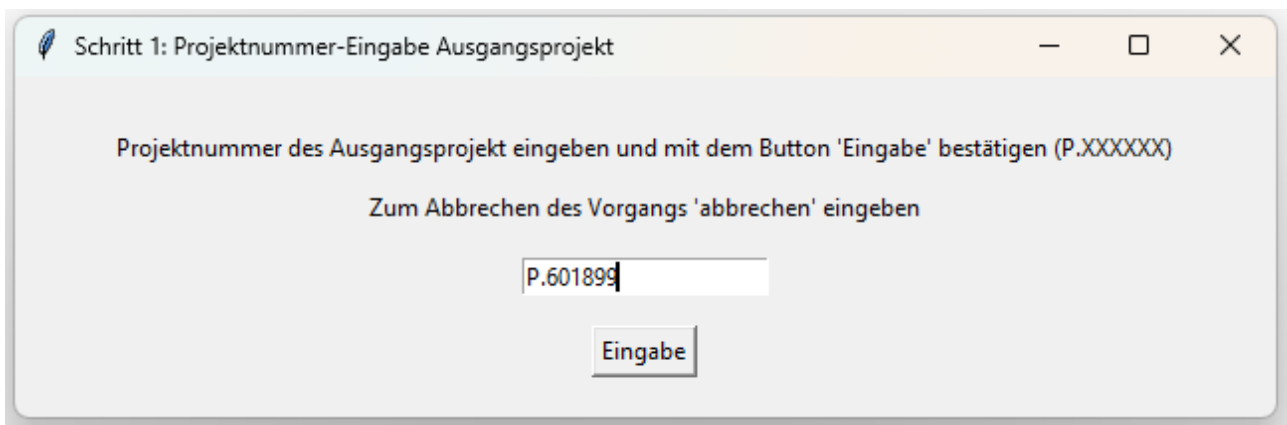


Abbildung 10: Eingabefenster für die Eingabe der Projektnummer des Ausgangsprojekts (Schritt 1 in der Anwendung des TDBI).

Mit der eingegebenen Projektnummer des Ausgangsprojekts sucht das TDBI anschliessend in den Investitionsdaten alle Informationen über das Projekt, die für den weiteren Verlauf des Prozesses benötigt werden. Gleichzeitig macht das TDBI in den Anlagendaten alle Anlagen ausfindig, die von dem Ausgangsprojekt betroffen sein könnten. Dafür berücksichtigt das TDBI diejenigen Anlagengattungen, die im Rahmen des Ausgangsprojekts erneuert oder instandgesetzt werden sollen.

In der zweiten aktiven Handlung wird die anwendende ISB aufgefordert, aus den möglicherweise betroffenen Anlagen diejenigen auszuwählen, die tatsächlich durch das Ausgangsprojekt betroffen sein werden. Die Auswahl der betroffenen Anlagen geschieht über ein sich öffnendes Fenster, welches zu jeder Anlagengattung generiert wird, wie in der Abbildung 11 dargestellt. Sind im Projekt Anlagen unterschiedlicher Anlagengattungen betroffen, werden für jede Anlagengattung die betroffenen Anlagen separat ausgewählt. In diesem Fall öffnen sich mehrere Fenster für die Auswahl der Anlagen nacheinander.

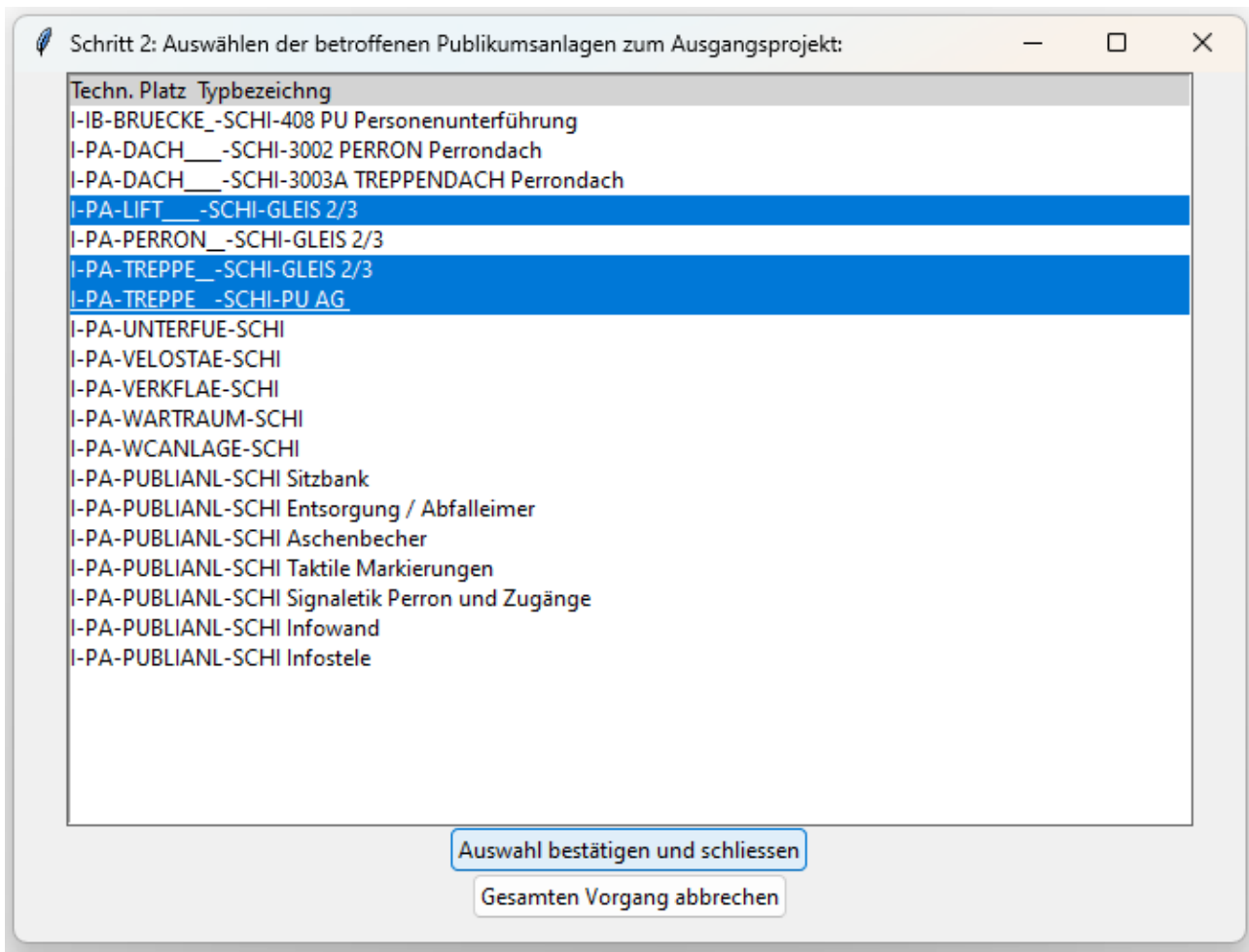


Abbildung 11: Auswahlfenster für die Auswahl der durch das Ausgangsprojekt betroffenen Anlagen (Schritt 2 in der Anwendung des TDBI).

Mit der Auswahl, der durch das Ausgangsprojekt betroffenen Anlagen, sind dem TDBI alle Informationen über das Ausgangsprojekt bekannt, die es für eine Empfehlung benötigt. Anschliessend werden die benötigten Informationen über das Clusterprojekt gesammelt. Dafür wird die Projektnummer des Clusterprojekts, als dritte aktive Handlung durch die anwendende ISB, in einem sich öffnenden Fenster eingegeben. In der Abbildung 12 ist zu erkennen, dass die Eingabe der Projektnummer des Clusterprojekts simultan zu der Eingabe der Projektnummer des Ausgangsprojekts (Schritt 1) funktioniert.

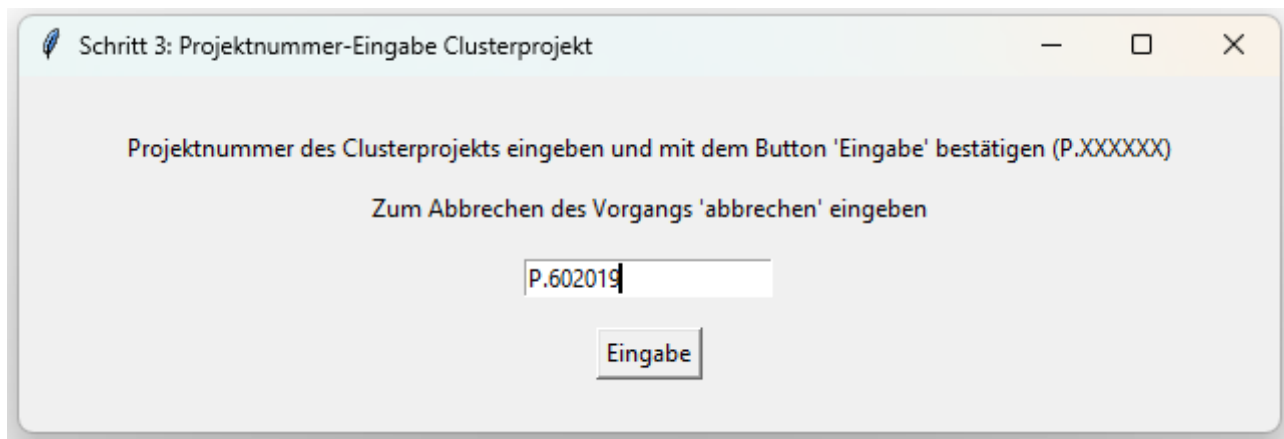


Abbildung 12: Eingabefenster für die Eingabe der Projektnummer des Clusterprojekts (Schritt 3 in der Anwendung des TDBI).

Schliesslich werden in der vierten aktiven Handlung der anwendenden ISB die durch das Clusterprojekt betroffenen Anlagen ausgewählt. Wie in der Abbildung 13 zu erkennen ist, funktioniert dieser Schritt simultan zu Schritt zwei, in dem die durch das Ausgangsprojekt betroffenen Anlagen ausgewählt wurden.

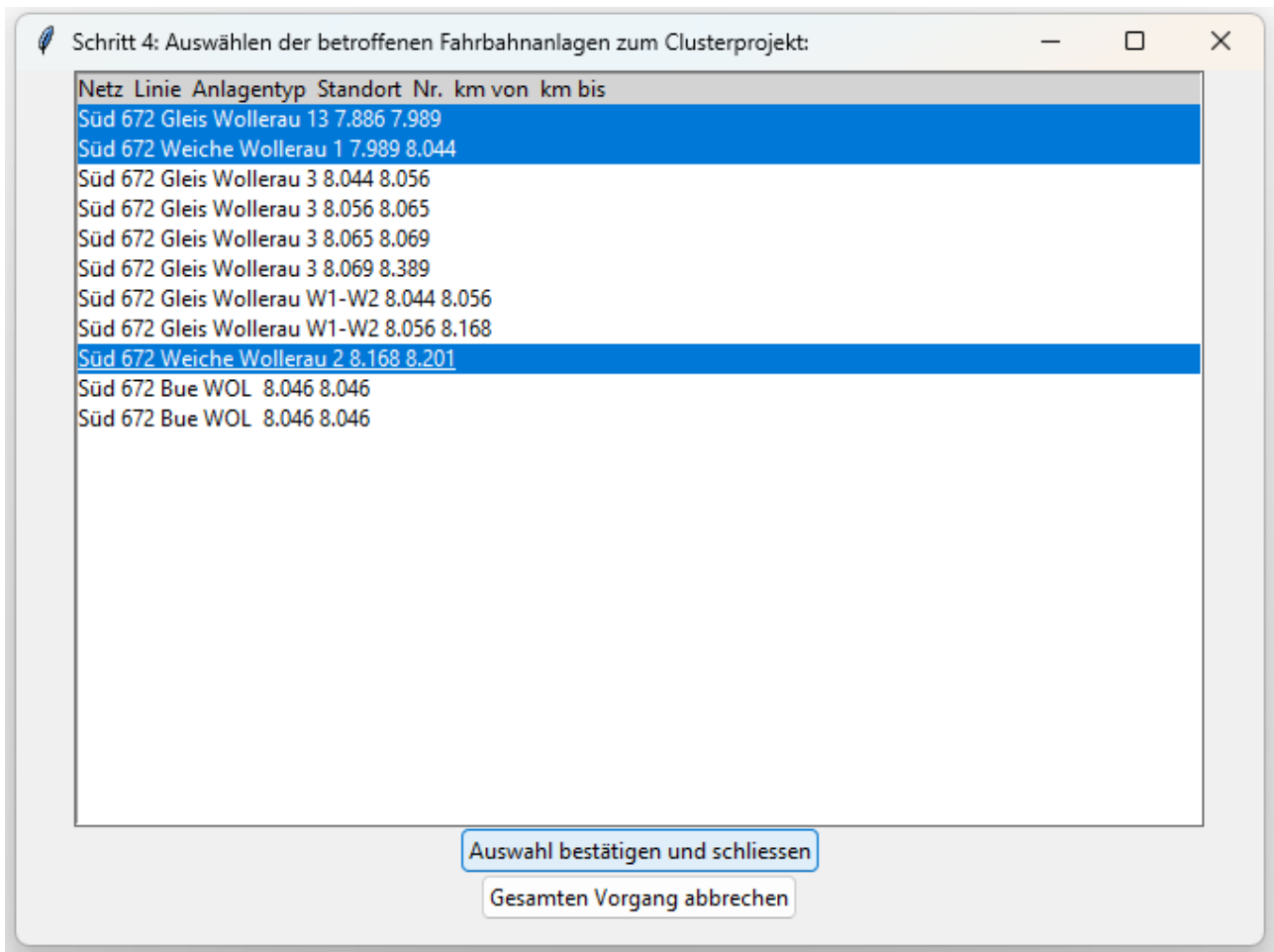


Abbildung 13: Auswahlfenster für die Auswahl der durch das Clusterprojekt betroffenen Anlagen (Schritt 4 in der Anwendung des TDBI).

Mit den beschriebenen vier aktiven Handlungen durch die anwendende ISB stehen dem TDBI alle benötigten Informationen zu den beiden Projekten und zu den betroffenen Anlagen zur Verfügung, die es braucht, um die drei Outputs zu generieren und eine Empfehlung zu der Bündelung der beiden Investitionsprojekte abzugeben.

4.1.2 Outputs und Empfehlung

Die drei Outputs, die durch das TDBI generiert werden, sind auf den nächsten drei Seiten in Abbildung 14 bis Abbildung 16 dargestellt. Die Erläuterungen zu den Abbildungen sind auf der darauffolgenden Seite zu finden.

Output 1: Übersicht über die beiden Projekte und die betroffenen Anlagen

P.601899 Schindellegi, Übergangsmassnahmen P.602019 Wollerau, FB

Ausgangsprojekt Strecke Samstagern - Biberbrugg Ausgangsprojekt Strecke Pfäffikon - Samstagern

Ausgangsprojekt Standort: SCHI Clusterprojekt Standort: WOL

Ausgangsprojekt km von: 0.0 Ausgangsprojekt km bis: 0.0 Clusterprojekt km von: 7.95 Clusterprojekt km bis: 8.2

Ausgangsprojekt Sperre: Keine Sperre Clusterprojekt Sperre: Keine Sperre

Ausgangsprojekt Anlagengattung: Übr. Kunstbauten 50
Publikumsanlagen 50 Clusterprojekt Anlagengattung: Fahrbahn 100

Anlage	Baujahr	ND	ZK heute	WBW
I-PA-LIFT -SCHI-G...	1991	20	4	300000
I-PA-TREPPE -SCHI-G...	1993	80	2	30000
I-PA-TREPPE -SCHI-P...	1993	80	2	30000

Anlage	Baujahr	ND	ZK heute	WBW
Wollerau Gleis 13	2017	44	1	206000
PSS	2017	88	1	133900
EW IV - 500 - ü - 1:...	2001	28	4	390000
EW IV - 185c B - 1:8...	2001	28	4	330000
PSS	2001	56	2	90000
PSS	2001	56	2	60000

Weiter > Output schliessen

Abbildung 14: Darstellung des ersten durch das TDBI generierten Outputs. Der erste Output fasst Informationen zu den beiden ausgewählten Projekten sowie zu den durch die Projekte betroffenen Anlagen zusammen. Im oberen linken Bereich sind die Informationen zum Ausgangsprojekt angegeben und in der Tabelle unterhalb die durch das Ausgangsprojekt betroffenen Anlagen. Auf der rechten Seite sind im oberen Bereich die Informationen zum Clusterprojekt dargestellt und in der Tabelle unterhalb die durch das Clusterprojekt betroffenen Anlagen.

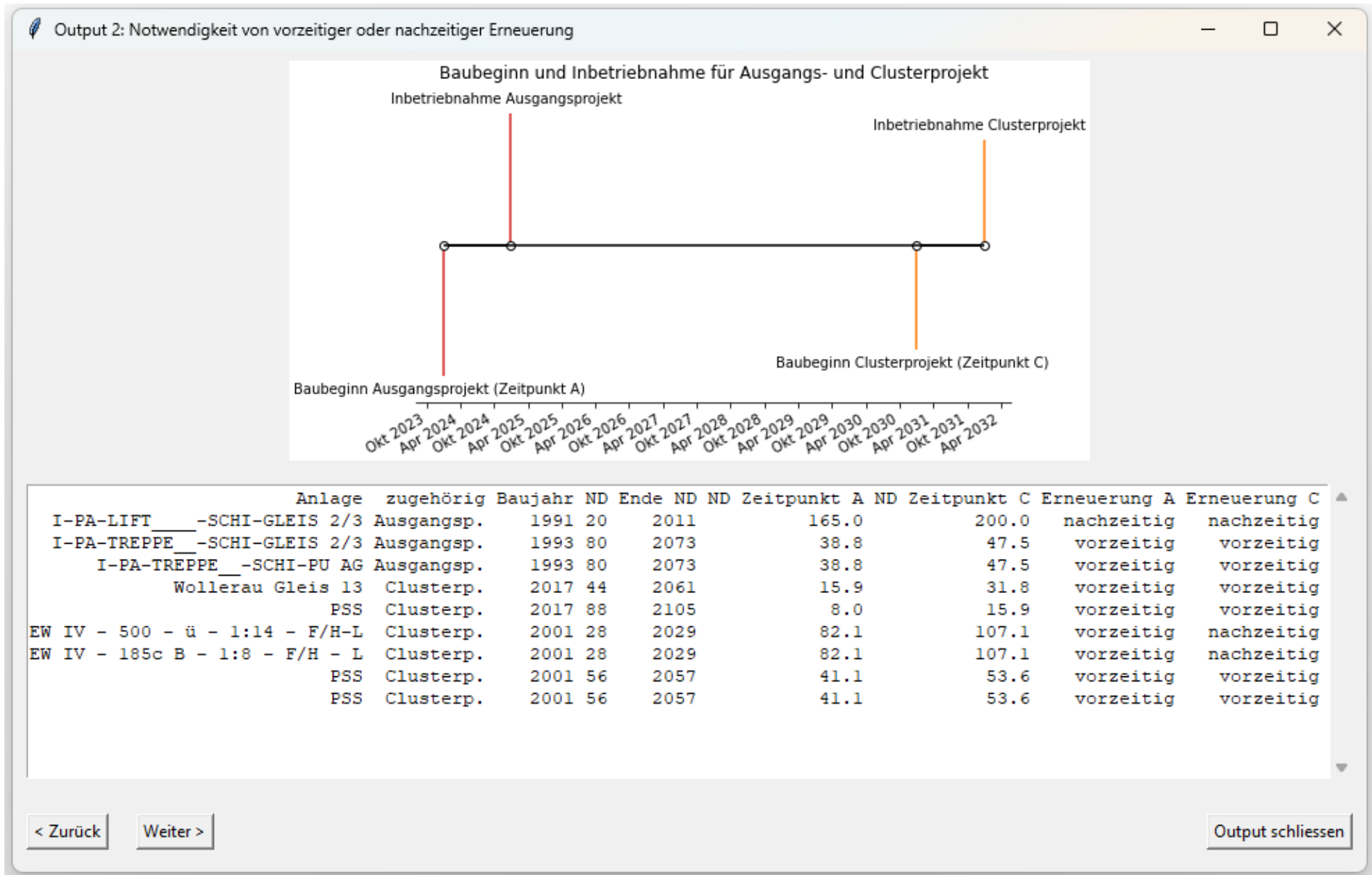
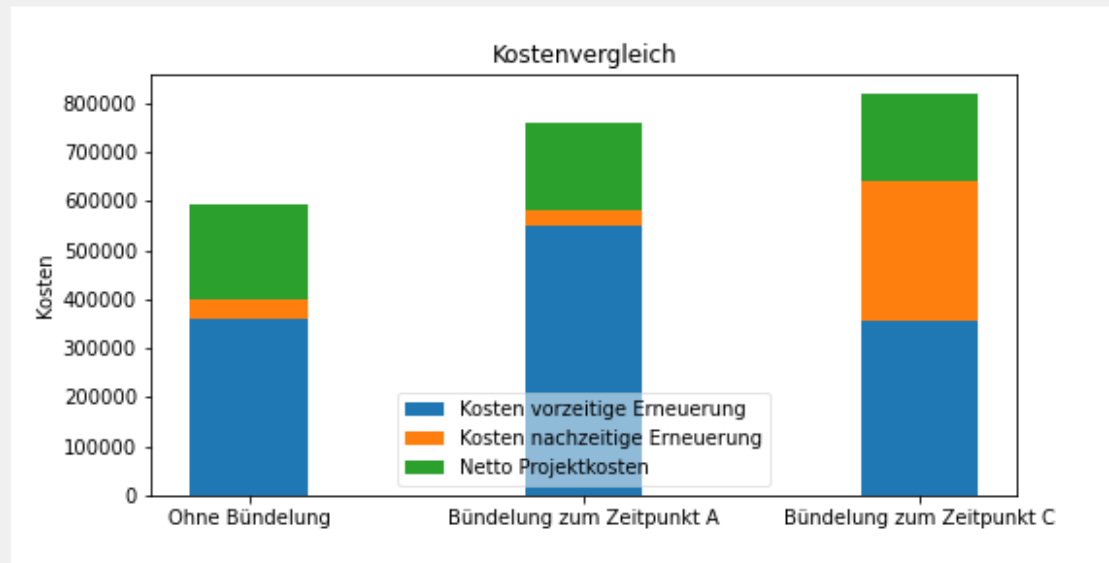


Abbildung 15: Darstellung des zweiten durch das TDBI generierten Outputs. Der zweite Output stellt die beiden Projekte auf einem Zeitstrahl dar und gibt Auskunft darüber, ob bei einer Bündelung der Projekte zu den Zeitpunkten A und C vorzeitige oder nachzeitige Erneuerungen stattfinden würden.



Kostenart	Kosten ohne Bündelung	Kosten Bündelung zum Zeitpunkt A	Kosten Bündelung zum Zeitpunkt C
Kosten vorz. Erneuerung	359 445	550 190	354 195
Kosten nachz. Erneuerung	40 418	31 312	285 494
Total Mehrkosten Anlagen	399 863	581 502	639 689
Brutto Projektkosten	195 000	195 000	195 000
Synergieeffekt	0	-15 288	-15 288
Netto Projektkosten	195 000	179 712	179 712
Total	594 863	761 214	819 401

Eine Bündelung der Projekte P.601899 und P.602019 ist aus Sicht der Synchronisierung der Anlagenlebenszyklen weder zum Zeitpunkt A noch zum Zeitpunkt C zu empfehlen

< Zurück

Output schliessen

Abbildung 16: Darstellung des dritten durch das TDBI generierten Outputs. Der dritte Output zeigt die negativen sowie positiven Auswirkungen einer Bündelung quantitativ auf. Schliesslich gibt das TDBI im dritten Output eine Empfehlung über eine Bündelung der Projekte ab.

Der erste Output, der durch das TDBI generiert wird, besitzt einen informativen und zusammenfassenden Charakter. Der anwendenden ISB wird mit dem ersten Output eine Übersicht über die beiden ausgewählten Investitionsprojekte sowie über die betroffenen Anlagen gegeben. Dazu ermittelt das TDBI Informationen aus den Investitions- und Anlagendaten anhand der durch die anwendende ISB eingegebenen Inputs. Das TDBI filtert die Investitionsdaten nach den beiden eingegebenen Projektnummern und gewinnt aus den Spalten die Informationen zu den beiden Projekten, unter anderem die geografischen Merkmale (Strecke, Standort und Kilometrierung) der Projekte, die betroffenen Anlagengattungen sowie allfällig notwendige Streckensperrungen. Anhand der geografischen Merkmale und der betroffenen Anlagengattung findet das TDBI in den Anlagendaten diejenigen Anlagen, die im Rahmen der beiden Projekte betroffen sein könnten und zeigt der anwendenden ISB diese Möglichkeiten an. Mit der Auswahl der tatsächlich betroffenen Anlagen erhält das TDBI die richtigen Zeilen in den Anlagendaten, um wiederum aus diesen Spalten die benötigten Informationen, wie das Baujahr, die Nutzungsdauer (ND), die aktuelle Zustandsklasse (ZK) sowie der Wiederbeschaffungswert (WBW) zu ermitteln. Das TDBI stellt so eine in der SOB neuartige digitale Verknüpfung zwischen Investitionsprojekten und betroffenen Anlagen her.

Während die geografischen Merkmale der Projekte dazu dienen, die richtigen Anlagen zu ermitteln, wirken sich die Informationen über die Sperrung sowie über die Anlagengattung zusammen mit den im ersten Output aufgeführten Anlageninformationen unmittelbar auf den Trade-Off in der Synchronisierung von Anlagenlebenszyklen und somit auf die durch das TDBI abgegebene Empfehlung aus. Einzig die Zustandsklasse besitzt von allen aufgeführten Anlageninformationen einen rein informativen Charakter.

Auf dem zweiten Output ist eine Grafik ersichtlich, die vier Zeitpunkte auf einem Zeitstrahl abbildet. Der Baubeginn und die Inbetriebnahme der beiden Investitionsprojekte stellen für die Eignungsprüfung einer Bündelung der Projekte wichtige Zeitpunkte dar. Diese entnimmt das TDBI aus den entsprechenden Spalten der Investitionsdaten. Anhand der Grafik ist zu erkennen, wie lange die beiden Projekte in ihrer Bauzeit dauern und wie nahe sie auf der Zeitachse beieinander liegen. Mögliche Zeitpunkte für eine Bündelung der Investitionsprojekte werden zu den beiden Zeitpunkten des Baubeginns überprüft. Der Baubeginn des Ausgangsprojekts wird für das TDBI und auch für die Empfehlung als Zeitpunkt A bezeichnet. Der Baubeginn des Clusterprojekts wird als Zeitpunkt C bezeichnet.

Zusätzlich zu der Grafik ist auf dem zweiten Output eine Tabelle ersichtlich, in der alle betroffenen Anlagen dargestellt sind. Für jede betroffene Anlage wird anhand des Baujahrs und der ND prognostiziert, in welchem Jahr die Anlage das Ende ihrer ND erreicht. Anschliessend wird berechnet, zu welchem Prozentsatz die Anlage ihre ND zu den beiden Zeitpunkten A und C erreicht haben wird. Findet die Erneuerung oder Instandsetzung einer Anlage im selben Jahr statt, in dem die Anlage das Ende ihrer ND erreicht (prognostizierte ND-Erreichung liegt bei 100%), rechnet das TDBI mit einer rechtzeitigen Erneuerung. Eine rechtzeitige Erneuerung ergibt für die Durchführung der Investitionsprojekte keine Mehrkosten, da der Zeitpunkt der Durchführung theoretisch optimal ist. Findet die Erneuerung oder Instandsetzung einer Anlage aber in den Jahren vor (prognostizierte ND-Erreichung liegt bei unter 100%) oder nach (prognostizierte ND-Erreichung liegt bei über 100%) der Erreichung ihrer ND statt, wird mit einer vorzeitigen beziehungsweise nachzeitigen Erneuerung gerechnet. Vor- oder nachzeitige Erneuerungen ergeben für die ISB Mehrkosten, welche von dem TDBI berücksichtigt werden. In der Tabelle des zweiten Outputs wird demnach dargelegt, ob die betroffenen Anlagen bei einer Bündelung der Projekte zu den Zeitpunkten A und C prognostisch rechtzeitig, vorzeitig oder nachzeitig erneuert werden würden.

Der dritte Output stellt schliesslich den finalen Output dar. Auch in diesem Output sind eine Grafik sowie eine Tabelle dargestellt. Die Grafik mit den drei Balkendiagrammen bildet dieselbe Sachlage ab, wie sie in der Tabelle mit Zahlen dargestellt ist. Sie dient der schnelleren Erfassung des Resultats der Eignungsprüfung einer Bündelung.

Hintergründig hat das TDBI für den dritten Output sämtliche für eine Empfehlung benötigten Kennzahlen berechnet. Wie die benötigten Kennzahlen berechnet werden, ist im Kapitel 4.2 beschrieben.

Mit einer Gegenüberstellung der positiven und negativen Auswirkungen ist in diesem Output der Trade-Off in der Synchronisierung der Anlagenlebenszyklen dargestellt. Das TDBI gibt schliesslich in dem blau gefärbten Satz im unteren Bereich des Output-Fensters die Empfehlung ab, ob und zu welchem Zeitpunkt eine Bündelung der Projekte aus der Sicht der Synchronisierung der Anlagenlebenszyklen durchgeführt werden soll.

4.2 Trade-Off in der Synchronisierung der Anlagenlebenszyklen

Um eine Empfehlung über eine Bündelung von Investitionsprojekten aus Sicht der Synchronisierung der Anlagenlebenszyklen abgeben zu können, werden durch das TDBI folgende Fragen in Bezug auf den entstehenden Trade-Off beantwortet:

- Wie gross sind die negativen Auswirkungen aufgrund vorzeitiger und nachzeitiger Erneuerungen der betroffenen Anlagen?
- Wie gross ist die positive Auswirkung einer Bündelung der Investitionsprojekte aufgrund des Synergieeffekts?
- Lohnt sich eine Bündelung der Investitionsprojekte zu den Zeitpunkten A und/oder C trotz vorzeitigen und nachzeitigen Erneuerungen? Ist die positive Auswirkung des Synergieeffekts grösser als die negativen Auswirkungen der Synchronisierung der Anlagenlebenszyklen?
- Zu welchem der beiden Zeitpunkte lohnt sich die Bündelung der Investitionsprojekte mehr, falls sie sich lohnt?

Damit die aufgeführten Fragen beantwortet werden können, berechnet das TDBI für alle drei Szenarien *ohne Bündelung*, *Bündelung zum Zeitpunkt A* und *Bündelung zum Zeitpunkt C* die Kennzahlen zu den vorzeitigen Erneuerungen, den nachzeitigen Erneuerungen und zum Synergieeffekt. Die brutto Projektkosten (Projektkosten vor Abzug des Synergieeffekts), welche für die Beantwortung der aufgeführten Fragen ebenfalls benötigt werden, werden durch das TDBI aus dem Investitionsplan ermittelt. Die brutto Projektkosten setzen sich als Summe aus den erwarteten Projektkosten der beiden Investitionsprojekte zusammen.

Anschliessend werden alle Kennzahlen addiert und so die Gesamtkosten berechnet. Der Synergieeffekt ist eine negative Zahl und hat daher in der Addition einen vermindernenden Effekt. Das Szenario, in dem die Summe der Kennzahlen am kleinsten ist, stellt von den drei Szenarien den günstigsten Zeitpunkt dar, um eine Bündelung der Projekte durchzuführen (oder eben nicht, falls das Szenario *ohne Bündelung* das Günstigste ist). Das TDBI empfiehlt der anwendenden ISB den günstigsten Zeitpunkt.

Zu den negativen Auswirkungen der Synchronisierung der Anlagenlebenszyklen gehören die durch vorzeitige und nachzeitige Erneuerung entstehenden Kosten. Da diese Kosten nicht in die Projektkosten einfließen, sondern durch die buchhalterische Vernichtung des Restwertes einer Anlage oder durch erhöhte Aufwände im Anlagenunterhalt entstehen, werden sie als Mehrkosten behandelt.

Auf der anderen Seite befindet sich der Synergieeffekt, der sich als positive Auswirkung bei einer Bündelung von Investitionsprojekten zeigt. Der Synergieeffekt ist nicht direkt der Synchronisierung von Anlagenlebenszyklen zuzuordnen, da er eine übergeordnete Rolle spielt und aus mehreren Faktoren des Vorgehensschemas zustande kommt. Die Synchronisierung der Anlagenlebenszyklen weist selbst eine positive Auswirkung aus, da die Anlagen in der Zukunft aufeinander abgestimmte Lebenszyklus-Enden haben werden und somit weniger Anlagen vorzeitig und nachzeitig erneuert werden müssen. Diese positive Auswirkung zeigt sich demnach aber erst in der Zukunft als Verminderung der Mehrkosten bei der Durchführung von Investitionsprojekten. Diese positive Auswirkung stellt sich somit als Minderung der negativen Auswirkungen der Zukunft heraus, weshalb sie nicht in der Berechnung des TDBI berücksichtigt wird.

4.2.1 Berechnung der negativen Auswirkung vorzeitiger Erneuerungen

Bei einer vorzeitigen Erneuerung wird eine Anlage nicht bis an das Ende ihrer Nutzungsdauer betrieben. Aus Aspekten der Nachhaltigkeit wirkt sich dies negativ auf die ISB aus, weshalb eine vorzeitige Erneuerung als Restwertvernichtung des Anlagenrestwertes in die Bündelung von Investitionsprojekten eingerechnet wird. Bei einer Restwertvernichtung wird davon ausgegangen, dass ein noch nicht abgeschriebener Wert einer Anlage verloren geht. Die Restwertvernichtung wird bei einer linearen Abschreibung einer Anlage folgendermassen durch das TDBI berechnet:

$$V = w * \left(1 - \left(\frac{e - i}{n} \right) \right)$$

mit

$$\begin{aligned} V &= \text{Restwertvernichtung} \\ w &= \text{WBW} \\ n &= \text{ND} \\ i &= \text{Jahr der Inbetriebnahme} \\ e &= \text{Jahr der Erneuerung} \end{aligned}$$

4.2.1.1 Beispiel:

Eine Anlage mit einem WBW von CHF 100'000.- wurde im Jahr 2000 gebaut und besitzt eine ND von 40 Jahren. Sie soll aufgrund einer Bündelung mit einem anderen Investitionsprojekt bereits im Jahr 2030 erneuert werden. Die Mehrkosten der vorzeitigen Erneuerung betragen:

$$\begin{aligned} V &= \text{CHF } 100'000.- * \left(1 - \left(\frac{2030 - 2000}{40} \right) \right) \\ V &= \text{CHF } 100'000.- * (1 - 0.75) \\ V &= \text{CHF } 25'000.- \end{aligned}$$

4.2.2 Berechnung der negativen Auswirkung nachzeitiger Erneuerungen

Bei einer nachzeitigen Erneuerung wird eine Anlage über ihre theoretische Nutzungsdauer hinaus betrieben. Da der betriebsfähige Zustand einer Anlage jederzeit gewährleistet sein muss, erhöhen sich die RAMS-Kosten einer Anlage, wenn diese über ihre ND hinaus betrieben wird. Die erhöhten RAMS-Kosten werden mit einer jährlichen Erhöhung der Unterhaltskosten einer Anlage abgebildet. Das bedeutet, dass eine Anlage nach der Erreichung des Endes ihrer ND im Unterhalt jedes Jahr teurer wird. Bei einer rechtzeitigen Erneuerung wird hingegen davon ausgegangen, dass die Anlage mit den regulären Unterhaltskosten weiterbetrieben wird.

Die Mehrkosten einer nachzeitigen Erneuerung werden berechnet, indem, unter der Berücksichtigung der jährlich ansteigenden Unterhaltskosten, die Unterhaltskosten ab dem Zeitpunkt der Überschreitung der Nutzungsdauer bis zu der Instandsetzung kumuliert werden. Die regulären Unterhaltskosten, die eine Anlage bei einer rechtzeitigen Erneuerung verursacht hätte, werden dabei abgezogen. Das TDBI berechnet die Mehrkosten einer nachzeitigen Erneuerung folgendermassen:

$$\Delta C_{total} = C * \left(\frac{(1 + r) * ((1 + r)^n - 1)}{r} - n \right)$$

mit

$$\begin{aligned} \Delta C_{total} &= \text{Mehrkosten durch jährlich steigende Unterhaltskosten} \\ C &= \text{reguläre jährliche Unterhaltskosten vor Erreichung der ND} \\ r &= \text{Erhöhungssatz der Unterhaltskosten} \\ n &= \text{Anzahl Jahre zwischen der Erreichung der ND und der Erneuerung} \end{aligned}$$

4.2.2.1 Beispiel:

Eine Kunstbaute mit einem WBW von CHF 1'000'000.– soll aufgrund einer Bündelung mit einem anderen Investitionsprojekt zehn Jahre nach der Erreichung des Endes ihrer ND erneuert werden. Die regulären jährlichen Unterhaltskosten betragen bei Kunstbauten 0.15% des WBW und die Unterhaltskosten erhöhen sich nach der Erreichung des Endes der ND jedes Jahr um 20%. Die Mehrkosten der nachzeitigen Erneuerung betragen:

$$\Delta C_{total} = 0.0015 * CHF\ 1'000'000.- * \left(\frac{(1 + 0.2) * ((1 + 0.2)^{10} - 1)}{0.2} - 10 \right)$$

$$\Delta C_{total} = CHF\ 1'500.- * 21.15$$

$$\Delta C_{total} = CHF\ 31'725.-$$

Um mit dem TDBI möglichst genaue Ergebnisse zu erzielen, wurden die Parameter C und r für jede Anlagengattung zusammen mit Experten ermittelt, wie in den nächsten Unterkapiteln beschrieben.

4.2.2.2 Parameter Kunstbauten

In der Tabelle 1 sind die für die Ermittlung der Mehrkosten durch nachzeitige Erneuerung benötigten Parameter der Anlagengattung Kunstbauten dargestellt.

Tabelle 1: Ermittlung der regulären Unterhaltskosten (Parameter C) und des jährlichen Erhöhungssatzes der Unterhaltskosten (Parameter r) bei der Anlagengattung Kunstbauten.

Jährliche Unterhaltskosten Anlagengattung Kunstbauten	
Inspektionen [18]	CHF 252'000.–
Unterhaltsarbeiten [19]	CHF 1'199'431.–
Total Unterhaltskosten/Jahr	CHF 1'451'431.–
WBW [19]	CHF 980'152'070.–
Reguläre jährliche Unterhaltskosten in % des WBW	0.15%
Erhöhungssatz der Unterhaltskosten	20%*

*Für den Erhöhungssatz der Unterhaltskosten wurde aufgrund der regulären jährlichen Unterhaltskosten (0.72%) und des Erhöhungssatzes der Anlagengattung Bahnstromanlagen (15%) eine Annahme getroffen. Da die Unterhaltskosten von Kunstbauten kleiner sind als diejenigen der Bahnstromanlagen, wurde ein höherer Erhöhungssatz angenommen.

4.2.2.3 Parameter Fahrbahnanlagen

In der Tabelle 2 sind die für die Ermittlung der Mehrkosten durch nachzeitige Erneuerung benötigten Parameter der Anlagengattung Fahrbahnanlagen dargestellt.

Tabelle 2: Ermittlung der regulären Unterhaltskosten (Parameter C) und des jährlichen Erhöhungssatzes der Unterhaltskosten (Parameter r) bei der Anlagengattung Fahrbahnanlagen.

Jährliche Unterhaltskosten Anlagengattung Fahrbahnanlagen				
Weichen (pro Objekt)	Einfache Weiche < 15000 GBT/d	Einfache Weiche > 15000 GBT/d	Doppelte Kreuzungsweiche < 15000 GBT/d	Doppelte Kreuzungsweiche > 15000 GBT/d
Unterhaltskosten/Jahr [20]	CHF 7'000.–	CHF 8'750.–	CHF 20'000.–	CHF 25'000.–
WBW [21]	CHF 350'000.–	CHF 550'000.–	CHF 350'000.–	CHF 390'000.–
Unterhaltskosten in % des WBW	2%	1.59%	5.71%	6.41%
Gleis (pro Laufmeter)				
		Holzschwellen	Beton < 15000 GBT/d	Beton > 15000 GBT/d
Unterhaltskosten/Jahr [20]		CHF 92.50	CHF 75.–	CHF 90.–
WBW [21]		CHF 2'000.–	CHF 2'000.–	CHF 2'000.–
Unterhaltskosten in % des WBW		4.63%	3.75%	4.5%
Ø Reguläre jährliche Unterhaltskosten in % des WBW				4.08%
Erhöhungssatz der Unterhaltskosten [20]				10%

4.2.2.4 Parameter Bahnstromanlagen

In der Tabelle 3 sind die für die Ermittlung der Mehrkosten durch nachzeitige Erneuerung benötigten Parameter der Anlagengattung Bahnstromanlagen dargestellt.

Tabelle 3: Ermittlung der regulären Unterhaltskosten (Parameter C) und des jährlichen Erhöhungssatzes der Unterhaltskosten (Parameter r) bei der Anlagengattung Bahnstromanlagen.

Jährliche Unterhaltskosten Anlagengattung Bahnstromanlagen	
Unterhaltskosten/Jahr [22]	CHF 1'000'000.–
WBW [22]	CHF 138'060'602.–
Reguläre jährliche Unterhaltskosten in % des WBW [22]	0.72%
Erhöhungssatz der Unterhaltskosten [22]	15%

4.2.2.5 Parameter Sicherungsanlagen und Niederspannung & Telekom

In der Tabelle 4 sind die für die Ermittlung der Mehrkosten durch nachzeitige Erneuerung benötigten Parameter der Anlagengattungen Sicherungsanlagen und Niederspannung & Telekom dargestellt.

Tabelle 4: Ermittlung der regulären Unterhaltskosten (Parameter C) und des jährlichen Erhöhungssatzes der Unterhaltskosten (Parameter r) bei den Anlagengattungen Sicherungsanlagen und Niederspannung & Telekom.

Jährliche Unterhaltskosten	Sicherungsanlagen	Niederspannung & Telekom
Unterhaltskosten/Jahr [23]	CHF 2'277'046.-	CHF 1'358'940.-
WBW [23]	CHF 264'665'116.-	CHF 58'943'525.-
Unterhaltskosten in % des WBW	0.86%	2.31%
Ø Reguläre jährliche Unterhaltskosten in % des WBW		1.59%
Erhöhungssatz der Unterhaltskosten		20%*

*Für den Erhöhungssatz der Unterhaltskosten wurde aufgrund der regulären jährlichen Unterhaltskosten (4.08%) und des Erhöhungssatzes der Anlagegattung Fahrbahnanlagen (10%) eine Annahme getroffen. Da die Unterhaltskosten von Sicherungsanlagen und Niederspannung & Telekom kleiner sind als diejenigen der Fahrbahnanlagen, wurde ein höherer Erhöhungssatz angenommen.

4.2.2.6 Parameter Publikumsanlagen

In der Tabelle 5 sind die für die Ermittlung der Mehrkosten durch nachzeitige Erneuerung benötigten Parameter der Anlagegattung Publikumsanlagen dargestellt.

Tabelle 5: Ermittlung der regulären Unterhaltskosten (Parameter C) und des jährlichen Erhöhungssatzes der Unterhaltskosten (Parameter r) bei der Anlagegattung Publikumsanlagen.

Jährliche Unterhaltskosten Anlagegattung Publikumsanlagen	
Unterhaltskosten/Jahr [19]	CHF 67'236.-
WBW [19]	CHF 117'439'500.-
Reguläre jährliche Unterhaltskosten in % des WBW	0.06%
Erhöhungssatz der Unterhaltskosten	35%

*Für den Erhöhungssatz der Unterhaltskosten wurde aufgrund der regulären jährlichen Unterhaltskosten (4.08%) und des Erhöhungssatzes der Anlagegattung Fahrbahnanlagen (10%) eine Annahme getroffen. Da die Unterhaltskosten von Publikumsanlagen um einiges kleiner sind als diejenigen der Fahrbahnanlagen, wurde ein höherer Erhöhungssatz angenommen.

4.2.3 Berechnung der positiven Auswirkung des Synergieeffekts

Wie bereits erwähnt, entsteht der Synergieeffekt durch unterschiedliche Faktoren in der Bündelung von Investitionsprojekten. So kann ein Synergieeffekt entstehen, wenn ein Logistikkonzept für die Ausführung eines Projekts für die Realisierung eines anderen Projekts genutzt werden kann. Oder wenn ein Projekt im Rahmen eines Projekts einer anderen ISB realisiert werden kann, weil die überregionale Betriebslage überprüft wurde. Da der Synergieeffekt bei diesen Beispielen aber in spezifischen Bereichen des Vorgehensschemas entstehen, welche in dieser Arbeit nicht fokussiert werden, liegt der Schwerpunkt für die Berechnung des Synergieeffekts in dieser Arbeit auf den übergeordneten Bereichen.

Der Synergieeffekt entsteht übergeordnet...

- ...bei einer zeitlichen Bündelung durch die mehrfache gleichzeitige Nutzung einer Streckensperrung für mehrere Projekte und...
- ...bei einer räumlichen Bündelung durch die mehrfache aufeinanderfolgende Nutzung von Arbeitspersonal, -maschinen und Materialien für mehrere Projekte.

Der Synergieeffekt hängt somit von den im Rahmen der beiden Investitionsprojekte ausgelösten Streckensperrungen und von den durchzuführenden Substanzerhaltungsmassnahmen ab. Demnach werden für die Berechnung des Synergieeffekts diese zwei Faktoren bestimmt.

4.2.3.1 Synergie bei Streckensperrungen

Die Information, ob die Ausführung eines Investitionsprojekts eine Streckensperrung zur Folge hat, existiert im Investitionsplan jeder ISB. Es wird zwischen keiner Streckensperrung, einer kleinen Streckensperrung und einer grossen Streckensperrung unterschieden. Wird keine Streckensperrung benötigt, können die Bauarbeiten am Tag während des regulären Bahnbetriebs oder in den nächtlichen Betriebspausen stattfinden. Eine kleine Streckensperrung dauert einen oder mehrere Abende oder ein oder mehrere Wochenenden an und hat zu diesen Zeitpunkten eine Unterbrechung des Bahnbetriebs zur Folge. Von einer grossen Streckensperrung wird gesprochen, wenn der Bahnbetrieb mehr als sieben Tage am Stück durchgehend unterbrochen wird.

Mit dem Ausgangsprojekt und dem Clusterprojekt, welche je eine dieser Möglichkeiten von Sperrungen besitzen, ergeben sich bei einer Bündelung der Projekte sechs Kombinationsmöglichkeiten. Die Kombinationsmöglichkeiten besitzen ein unterschiedlich hohes Potenzial für den Synergieeffekt, weshalb sie mit einer Punktzahl zwischen 1 und 5 bewertet wurden, wobei die Punktzahl 1 die minimal mögliche Synergie und die Punktzahl 5 die maximal mögliche Synergie bedeuten [24]. Die Bewertung wurde mit einer Gewichtung von 0.4 multipliziert, woraus ein Score für die Kombinationsmöglichkeiten der Streckensperrungen entstand. Die begründete Bewertung der Kombinationsmöglichkeiten und die Berechnung der Scores sind in der Tabelle 6 dargestellt.

Das TDBI bestimmt für das Ausgangs- sowie für das Clusterprojekt die Information zu den Streckensperrungen bereits für den ersten Output. Aus diesen Informationen ermittelt es die relevante Kombination von Streckensperrungen und somit den zutreffenden Synergie-Score.

Tabelle 6: Bewertungstabelle für die Bewertung der Synergiepotenziale der Kombinationsmöglichkeiten von Streckensperrungen. Je höher der Score (maximal möglicher Score = 2), desto höher ist das Synergiepotenzial einer Kombination.

Kombination Streckensperrungen						
Sperre 1	Sperre 2	Kombination	Punktzahl (1-5)	Gewichtung	Score Sperrung	Begründung
Keine Sperre	Keine Sperre	S1	1	0.4	0.4	Sehr kleine Synergie, da keine Ausnutzung möglich ist.
Keine Sperre	Kleine Sperre	S2	2	0.4	0.8	Kleine Synergie, da das Projekt ohne Sperrung unabhängig ausgeführt werden, die Ausführung in einer kleinen Sperrung jedoch situativ verkürzt werden kann.
Keine Sperre	Grosse Sperre	S3	2	0.4	0.8	Kleine Synergie, da das Projekt ohne Sperrung unabhängig ausgeführt werden, die Ausführung in einer grossen Sperrung jedoch situativ verkürzt werden kann.
Kleine Sperre	Kleine Sperre	S4	3	0.4	1.2	Mittlere Synergie, wenn die beiden Projekte gleichzeitig oder überschneidend ausgeführt werden können. So wird die gesamte Sperrdauer verkürzt.
Kleine Sperre	Grosse Sperre	S5	5	0.4	2	Sehr grosse Synergie, wenn das Projekt mit der kleinen Sperrung innerhalb der grossen Sperrung ausgeführt werden kann.
Grosse Sperre	Grosse Sperre	S6	4	0.4	1.6	Grosse Synergie, wenn die beiden Projekte gleichzeitig oder überschneidend ausgeführt werden können. So wird die gesamte Sperrdauer verkürzt.

4.2.3.2 Synergie bei den Substanzerhaltungsmassnahmen

Um die Synergie, die durch die Massnahmen zweier Projekte entsteht, zu bestimmen, werden zwei Aspekte betrachtet: Einerseits, wie gross die Abhängigkeit zwischen den betroffenen Anlagen der beiden Projekte ist. Andererseits, welche Arbeitskräfte, Maschinen und Materialien für die Ausführung der beiden Projekte eingesetzt werden müssen. Da die Massnahmen für jedes Projekt aber individuell sind, wird mit einem pauschalen Synergie-Score für jede Kombination von betroffenen Anlagengattungen gerechnet. Der Synergie-Score berücksichtigt die Abhängigkeiten der Anlagengattungen und die eingesetzten Arbeitskräfte, Maschinen und Materialien.

Die Bestimmung des Synergie-Scores für die Massnahmen wurde simultan zu der Bestimmung des Synergie-Scores für die Streckensperrung durchgeführt. Jede Kombinationsmöglichkeit der sechs verschiedenen Anlagengattungen Kunstbauten (KB), Fahrbahn (FB), Bahnstromanlagen (BS), Sicherungsanlagen (SA), Niederspannung & Telekom (NT) und Publikumsanlagen (PA) wurde mit einer Punktzahl zwischen 1 und 5 bewertet, wobei die Punktzahl 1 die minimal mögliche Synergie und die Punktzahl 5 die maximal mögliche Synergie bedeuten [24]. Die Bewertung wurde mit einer Gewichtung von 0.6 multipliziert, woraus ein Score für die Kombinationsmöglichkeiten der Massnahmen entsteht. Die begründete Bewertung der Kombinationsmöglichkeiten und die Berechnung der Scores sind in der Tabelle 7 dargestellt.

Das TDBI bestimmt für das Ausgangs- sowie für das Clusterprojekt die Information zu den betroffenen Anlagengattungen bereits für den ersten Output. Aus diesen Informationen ermittelt das TDBI die relevante Kombination von Streckensperrungen und somit den zutreffenden Synergie-Score. Dieser Synergie-Score wird für die Berechnung des Gesamt-Synergieeffekts verwendet.

Tabelle 7: Bewertungstabelle für die Bewertung der Synergiepotenziale der Kombinationsmöglichkeiten von Massnahmen. Je höher der Score (maximal möglicher Score = 3), desto höher ist das Synergiepotenzial einer Kombination.

Kombination Anlagengattungen						
Anlagen-gattung 1	Anlagen-gattung 2	Kombi-nation	Punkt-zahl (1-5)	Gewich-tung	Score Mass-nahmen	Begründung
KB	KB	A1	5	0.6	3	Sehr grosse Synergie, da dieselbe Anlagengattung betroffen ist.
KB	FB	A2	4	0.6	2.4	Grosse Synergie, da beispielsweise bei einer Brückenerneuerung automatisch die Fahrbahn betroffen ist. Umgekehrt sind bei einer Fahrbahnerneuerung oftmals Wasserdurchlässe betroffen.
KB	BS	A3	3	0.6	1.8	Mittlere Synergie, da die Anlagengattungen nur bei Instandsetzungen von Tunnels oder Weg- bzw. Strassenüberführungen Abhängigkeiten aufweisen.
KB	SA	A4	1	0.6	0.6	Sehr kleine Synergie, da die Anlagen unabhängig voneinander erneuert werden.
KB	NT	A5	1	0.6	0.6	Sehr kleine Synergie, da die Anlagen unabhängig voneinander erneuert werden.
KB	PA	A6	4	0.6	2.4	Grosse Synergie, da ähnliche Massnahmen umgesetzt werden, bspw. Bei Betonarbeiten.
FB	FB	A7	5	0.6	3	Sehr grosse Synergie, da dieselbe Anlagengattung betroffen ist.
FB	BS	A8	2	0.6	1.2	Kleine Synergie, da die Anlagen bis auf Mastfundamente unabhängig voneinander erneuert werden.

FB	SA	A9	4	0.6	2.4	Grosse Synergie, da die Anlagen eng verknüpft sind. Wenn die Fahrbahn erneuert wird, müssen die Sicherungsanlagen auch entfernt und wieder montiert werden.
FB	NT	A10	2	0.6	1.2	Kleine Synergie, da die Anlagen bis auf Kabelkanäle unabhängig voneinander erneuert werden.
FB	PA	A11	4	0.6	2.4	Grosse Synergie, da bei Erneuerungen von Perrons oder Bahnhofszugängen häufig Elemente der Fahrbahn betroffen sind.
BS	BS	A12	5	0.6	3	Sehr grosse Synergie, da dieselbe Anlagengattung betroffen ist.
BS	SA	A13	1	0.6	0.6	Sehr kleine Synergie, da die Anlagen unabhängig voneinander erneuert werden.
BS	NT	A14	1	0.6	0.6	Sehr kleine Synergie, da die Anlagen unabhängig voneinander erneuert werden.
BS	PA	A15	2	0.6	1.2	Kleine Synergie, da die Anlagen, ausser im Bereich von Perrondächern, unabhängig voneinander erneuert werden.
SA	SA	A16	4	0.6	2.4	Grosse Synergie, da dieselbe Anlagengattung betroffen ist. Allerdings ist die Vielfalt der Massnahmen gross, wodurch nicht immer Synergien entstehen.
SA	NT	A17	3	0.6	1.8	Mittlere Synergie, da die Vielfalt der Massnahmen sehr gross ist. Allerdings ist das Know-How für beide Anlagengattungen am selben Ort angesiedelt.
SA	PA	A18	2	0.6	1.2	Kleine Synergie, da die Anlagen, ausser bei Signalen, welche an Publikumsanlagen montiert sind, unabhängig voneinander erneuert werden.
NT	NT	A19	3	0.6	1.8	Mittlere Synergie, da dieselbe Anlagengattung betroffen ist. Allerdings ist die Vielfalt der Massnahmen sehr gross, wodurch oftmals keine Synergien entstehen.
NT	PA	A20	2	0.6	1.2	Kleine Synergie, da die Massnahmen an den Anlagen sehr unterschiedlich sind.
PA	PA	A21	5	0.6	3	Sehr grosse Synergie, da dieselbe Anlagengattung betroffen ist.

Bei einem Investitionsprojekt können mehrere Anlagengattungen betroffen sein. Das TDBI berücksichtigt Projekte, die keine eindeutige Hauptanlagengattung aufweisen, nicht, da diese Projekte bereits als Cluster bezeichnet werden und das TDBI auf die Eignungsprüfung einer Bündelung zweier Investitionsprojekte ausgelegt ist. Ein Projekt muss also eine Anlagengattung aufweisen, die mindestens für 50% der gesamten Projektkosten verantwortlich ist. Die Kombination der Anlagengattungen wird mit den Hauptanlagengattungen durchgeführt. Es ist aber möglich, dass eines oder sogar beide Investitionsprojekte zwei Hauptanlagengattungen besitzen. Wenn dies der Fall ist, überprüft das TDBI alle entstehenden Kombinationsmöglichkeiten (maximal vier Kombinationsmöglichkeiten) und wählt diejenige aus, die den höchsten Synergie-Score aufweist.

4.2.3.3 Gesamt-Synergieeffekt

Für die Berechnung des Gesamt-Synergieeffekts wurden alle Kombinationsmöglichkeiten der Streckensperrungen mit allen Kombinationsmöglichkeiten der Massnahmen miteinander kombiniert. Die beiden Synergie-Scores wurden dabei zu einem Gesamt-Score addiert, der wiederum aus einer Zahl zwischen 1 und 5 besteht. Damit der Gesamt-Score als Synergieeffekt verwendbar wird, wurde die Zahl quadriert, wie der zu entnehmen ist. In der Tabelle 8 ist nur ein Auszug der gesamten Liste dargestellt, da insgesamt 126 Kombinationsmöglichkeiten berechnet wurden. Im Anhang E dieser Arbeit ist eine Excel-Datei mit sämtlichen Kombinationsmöglichkeiten abgelegt.

Der resultierende Synergieeffekt präsentiert sich schliesslich als Prozentsatz für eine Projektkostenreduktion. Somit werden die Projektkosten von Investitionsprojekten bei einer Bündelung um zwischen 1% und 25% reduziert. Gemäss Literatur und einem Interview mit einem Experten entspricht diese mögliche Reduktion den in der Praxis bisher erzielten Projektkostenreduktionen [9] [24].

Mit dieser Bewertungsmethode wird mit einer Bündelung von Investitionsprojekten in jedem Fall eine Reduktion der Projektkosten erzielt. Mit Nachrechnungen von durchgeführten Projekt-Bündelungen konnte die SOB plausibilisieren, dass sich eine Bündelung von Investitionsprojekten positiv auf die Kosten auswirkt. Bei hohen Synergieeffekten sind frühe Projektierungen und Ressourcenplanungen nötig, damit eine Bündelung nicht zu höheren Projektkosten führt [24].

Tabelle 8: Tabelle zur Ermittlung des Synergieeffekts. Die beiden Scores aus der Kombination der Streckensperrungen sowie aus der Kombination der Massnahmen werden addiert. Der resultierende Gesamt-Score wird anschliessend für die Berechnung des Synergieeffekts quadriert.

Total Synergieeffekt						
Kombination A	Score A	Kombination S	Score S	Kombination	Gesamt-Score	Synergieeffekt
A1	3	S1	0.4	A1S1	3.4	11.56
A1	3	S2	0.8	A1S2	3.8	14.44
A1	3	S3	0.8	A1S3	3.8	14.44
A1	3	S4	1.2	A1S4	4.2	17.64
A1	3	S5	2	A1S5	5	25
A1	3	S6	1.2	A1S6	4.2	17.64
A2	2.4	S1	0.4	A2S1	2.8	7.84
A2	2.4	S2	0.8	A2S2	3.2	10.24
A2	2.4	S3	0.8	A2S3	3.2	10.24

4.3 Entwicklung

In diesem Kapitel ist beschrieben, wie das TDBI in seinen vier Einheiten in der Programmiersprache Python entwickelt wurde. Für die Programmierung des TDBI wurde die Anwendung Spyder mit der Python-Version 3.11.4 verwendet.

4.3.1 Einheit 1

4.3.1.1 Investitionsdaten

Zunächst wurde der Investitionsplan der SOB, welcher als Hauptdatenquelle für das TDBI dient, aus der Schnittstelle zwischen dem BAV und den ISB «WDI» als Datei im Format .xlsx exportiert und unter dem Ordner «Hauptliste» im Verzeichnis (Anhang b)) gespeichert. Die Investitionsdaten wurden anschliessend analysiert. Insbesondere wurde herausgefiltert, welche Spalten für das TDBI zu einem Projekt relevant sind. Für die Berechnung der Kennzahlen zur Herbeiführung des Trade-Offs werden die Zeitpunkte des Baubeginns sowie der Inbetriebnahme des Projekts, die Information über Streckensperrungen, die betroffenen Anlagengattung und die Gesamtkosten benötigt. Diese Daten

wurden im Investitionsplan markiert, wie in Abbildung 17 dargestellt. Zusätzlich wurde die Spalte mit dem Titel des Projekts markiert, da der Titel für die anwendende ISB informativ relevant ist.

Baubeginn	Inbetriebnahme	PGV Grosse Streckensperre erforderlich (> 7 Tage)	PGV Kleine Streckensperre erforderlich (Abend oder Wochenende)	110 Brücken	120 Tunnel	199 Übrige Kunstbauten	200 Fahrbahn	300 Bahnstromanlagen	400 Sicherungsanlagen	500 Niederspannungs- und Telekomanlagen	600 Publikumsanlagen	Gesamtkosten
01.01.2024	31.07.2024	0	0	0%	0%	0%	0%	0%	100%	0%	0%	320000.00
30.09.2023	25.10.2025	0	0	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	955000.00
01.01.2025	31.12.2025	0	0	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0.00
01.01.2023	30.11.2023	0	0	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	10257.50
01.01.2023	31.12.2023	0	0	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0.00
01.01.2031	31.12.2031	0	0	0%	0%	0%	100%	0%	0%	0%	0%	0.00
01.01.2027	30.09.2027	0	0	0%	0%	0%	0%	0%	0%	100%	0%	110000.00
01.06.2026	01.12.2026	0	0	0%	0%	0%	0%	0%	100%	0%	0%	600000.00
01.06.2023	31.12.2023	0	0	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0.00
01.01.2022	31.12.2022	0	0	0%	0%	100%	0%	0%	0%	0%	0%	0.00
01.01.2022	31.12.2022	0	0	0%	0%	100%	0%	0%	0%	0%	0%	0.00
01.06.2022	01.10.2022	0	0	0%	0%	0%	0%	0%	100%	0%	0%	116328.71
01.01.2025	31.12.2025	0	0	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	100%	680000.00

Abbildung 17: Markierung der Relevante Spalten des Investitionsplans.

4.3.1.2 Anlagendaten

Die Anlagendaten der SOB befinden sich auf dem internen ERP-System, wie auch auf Datenbanken im Format .xlsx. Um eine Schnittstelle von den Projektdaten auf die Anlagendaten herstellen zu können, wurde zunächst ein Export der Anlagendaten aus dem ERP-System der SOB durchgeführt. Der Export wurde unter dem Ordner «Hilfslisten» als «Technische Plätze.xlsx» gespeichert.

Nach einer Analyse der Anlagendaten aus dem ERP-Export wurde festgestellt, dass die relevanten Informationen zur Lokalisierung (Kilometrierung) der Anlagen sowie das Baujahr unvollständig waren. So waren im Durchschnitt nur 60% aller benötigten Informationen vorhanden. Zudem fehlten auf dem ERP-Export die Informationen zur Nutzungsdauer, und zum Wiederbeschaffungswert der Anlagen. Daher wurden zusätzlich die Datenbanken zu den einzelnen Anlagengattungen aus dem System der SOB beschafft. Diese wiesen eine wesentlich höhere Vollständigkeit der relevanten Informationen auf und auch die Informationen zu der Nutzungsdauer sowie zu dem Wiederbeschaffungswert der Anlagen waren in diesen Datenbanken vorhanden, siehe Abbildung 18. Die Datenbanken wurden mit kleineren Eingriffen, wie dem Löschen einzelner nicht gebrauchter Spalten und der Vereinheitlichung der Spaltenüberschriften manuell aufbereitet.

Techn. Platz	Linie	Standort	km von	km bis	Typbezeichnung	Baujahr	Alter	ND	Restnutz Theoret.	ZK heute	WBW	
I-SA-BALISE -AT -47553	673	AT	22.101	22.104		2012	12	25	13	2037	2	6 000
I-SA-BALISE -AT -47554	673	AT	22.083	22.08		2012	12	25	13	2037	2	6 000
I-SA-BALISE -AT -47555	673	AT	22.304	22.307		2012	12	25	13	2037	2	6 000
I-SA-BALISE -AT -47556	673	AT	22.357	22.36		2012	12	25	13	2037	2	6 000
I-SA-BALISE -AT -47557	673	AT	22.338	22.341		2012	12	25	13	2037	2	6 000
I-SA-BALISE -AT -47558	673	AT	22.683	22.68		2012	12	25	13	2037	2	6 000
I-SA-BALISE -AT -47559	673	AT	23.404	23.401		2012	12	25	13	2037	2	6 000
I-SA-BALISE -AT -48341	673	AT	22.27	22.267		2023	1	25	24	2048	1	6 000
I-SA-BALISE -AT -48342	670	AT	22.289	22.286		2023	1	25	24	2048	1	6 000
I-SA-BALISE -BGH -47502	670	BGH	2.93	2.933		2013	11	25	14	2038	2	6 000
I-SA-BALISE -BGH -47503	670	BGH	2.93	2.933		2013	11	25	14	2038	2	6 000
I-SA-BALISE -BGH -47565	670	BGH	2.218	2.221		2013	11	25	14	2038	2	6 000
I-SA-BALISE -BGH -47566	670	BGH	2.507	2.51		2013	11	25	14	2038	2	6 000
I-SA-BALISE -BGH -47567	670	BGH	2.83	2.827		2013	11	25	14	2038	2	6 000
I-SA-BALISE -BGH -47568	670	BGH	2.83	2.827		2013	11	25	14	2038	2	6 000
I-SA-BALISE -BGH -47569	670	BGH	2.95	2.953		2013	11	25	14	2038	2	6 000

Abbildung 18: Auszug auf der "Datenbank SA & TN".

In den Datenbanken der Anlagengattungen waren alle relevanten Informationen zu den Anlagen vorhanden, bis auf die Nutzungsdauer für die Weichen. Die Nutzungsdauer der Weichen werden aus der Tagesbelastung, dem Weichentyp und dem Schwellentyp berechnet. Da die Tagesbelastung aus der Datenbank Oberbau nicht ermittelt werden kann, werden die Mittelwerte der Nutzungsdauer für Weichentyp und Schwellentyp verwendet [25].

4.3.1.3 Schnittstelle zwischen Investitions- und Anlagendaten

Die Investitionsdaten sollten über ihre geografische Lage mit den Anlagendaten verknüpft werden. Dabei soll das TDBI aus den Investitionsdaten erkennen können, welche Anlagen und welche Projekte sich an derselben geografischen Lage befinden. Damit dies dem TDBI ermöglicht werden konnte, mussten die Investitionsdaten aus dem Investitionsplan mit einem Export aus dem ERP-System der SOB, welcher die Investitionsdaten beinhaltet, ergänzt werden. Dieser Export wurde unter «Investitionsdaten SAP.xlsx» im Ordner «Hilfslisten» gespeichert.

Grundsätzlich wird der Investitionsplan aufgrund der Investitionsdaten im ERP-System erstellt. Da der Investitionsplan jedoch ein schweizweit standardisiertes Dokument ist, werden einige Informationen zu den Projekten bei der Erstellung des Investitionsplans weggelassen. So fehlen für die genaue Lokalisierung eines Projekts die Kilometer-Angaben. Die Schnittstelle zwischen Investitions- und Anlagendaten soll wie folgt funktionieren: Zunächst greift das TDBI mittels Projektnummer auf den Investitionsplan zu und ermittelt dort die relevanten Informationen zu den Zeitpunkten des Baubeginns sowie der Inbetriebnahme des Projekts, zu den Streckensperrungen, zu den betroffenen Anlagengattung und zu den Gesamtkosten. Um den Standort eines Projekts zu ermitteln, greift das TDBI mittels der Projektnummer auf den ERP-Export der Investitionsdaten zu. Mit der Information über den genauen Standort eines Projekts sowie über die betroffene Anlagengattung kann das TDBI anschliessend in den entsprechenden Anlagendaten alle Anlagen innerhalb des Projektperimeters ermitteln.

4.3.1.4 Import der Investitions- und Anlagendaten in das TDBI

Nach der vollständigen Beschaffung und Aufbereitung der Haupt- und Hilfslisten wurde der Pfad der Daten in das TDBI programmiert und alle Tabellen in Python via Package «Pandas» als DataFrames (Tabellen mit Zeilen und Spalten) an vordefinierte Variablen zugewiesen.

4.3.1.5 Umgang mit fehlerhaften und fehlenden Daten

Die Investitions- und Anlagendaten wurden bei der Aufbereitung auf ihre Richtigkeit überprüft. Es ist allerdings möglich, dass in den Daten Fehler vorhanden sind, die ohne intensive Abklärungen nicht erkannt werden können. So kann auch das TDBI keinen Fehler identifizieren, wenn in einem Projekt die Projektkosten mit CHF 500'000.– anstatt mit CHF 100'000.– bewertet wurden. Daher ist davon auszugehen, dass die Daten nach der manuellen Aufbereitung, bis auf wenige Ausnahmen, korrekt sind.

4.3.1.6 Testen der Einheit 1

Nach dem programmierten Import der Investitions- und Anlagendaten wurde überprüft, ob das TDBI die Daten korrekt aufnimmt und den richtigen Variablen zuordnet, indem die Python-Datei ausgeführt wurde. Als die korrekte Funktion der Einheit 1 bestätigt werden konnte, wurde die Einheit 2 programmiert.

4.3.2 Einheit 2

4.3.2.1 Ermittlung der relevanten Investitionsdaten

In der Einheit 2 wurde zunächst die Eingabe der Projektnummern des Ausgangs- sowie des Clusterprojekts programmiert. Die Eingabe der Projektnummern wird durch die anwendende ISB getätigt. Für eine benutzerfreundliche Anwendung wurden alle Benutzerinteraktionen mit dem Package Tkinter programmiert. Dieses Package erlaubt das Öffnen von Popup-Fenstern, in denen Texte und Diagramme ausgegeben werden können oder Eingaben durch die anwendende ISB getätigt werden können. Die Programmierung der Tkinter-Fenster wurde zum Teil mit der Unterstützung von ChatGPT erstellt.

Die anwendende ISB wird nun aufgefordert, die Projektnummer des Ausgangsprojekts einzugeben (siehe Abbildung 10). Mittels Eingabe der Projektnummer wird diese an die Variable «Ausgangsprojekt_nr» übergeben und anhand dieser konnten anschliessend die relevanten Informationen aus den

importierten Investitionsdaten ermittelt werden. Dazu wurde wie folgt programmiert: Die Hauptliste (Investitionsplan) wird in der Spalte mit den Projektnummern nach der Projektnummer des Ausgangsprojekts gefiltert. Da die Projektnummer in den Investitionsdaten nur einmalig vorhanden ist, wird nach der Filterung nur eine Zeile in den Investitionsdaten angezeigt. Aus dieser Zeile zieht das TDBI die relevanten Investitionsdaten Zeitpunkte des Baubeginns sowie der Inbetriebnahme des Projekts, Streckensperrungen, betroffene Anlagengattungen zu den Gesamtkosten des Projekts heraus. Um sicherzustellen, damit es sich bei dem eingegebenen Projekt um ein Einzelprojekt handelt und nicht um eine Projektbündelung, wurde die Bedingung programmiert, dass eine der betroffenen Anlagengattungen mindestens 50% der Projektkosten betreffen muss.

Dieselben Funktionen wurden anschliessend für das Clusterprojekt programmiert.

4.3.2.2 Verknüpfung der Investitionsdaten mit den Anlagendaten

Die möglichen betroffenen Anlagen werden über den Projektstandort ermittelt. Das heisst, dass das TDBI den genauen Perimeter der beiden Projekte bestimmt und die Anlagen auswählt, die innerhalb dieser Perimeter liegen. Bevor dies geschieht, muss das TDBI aber wissen, in welcher Anlagendatenbank es nach den Projektperimetern suchen muss. Daher wurde programmiert, dass das TDBI die betroffenen Anlagengattungen analysiert, die entsprechenden Datenbanken öffnet und die Anlagen in den Datenbanken nach den Projektperimetern filtert. Die gefilterten Anlagen sind diejenigen, die möglicherweise von den beiden Projekten betroffen sind, da sie in den Projektperimetern liegen und von der Anlagengattungen stammen, die im Rahmen der Projekte betroffen sind. In der Abbildung 19 ist die Ermittlung der möglichen betroffenen Anlagen beispielhaft dargestellt. Die möglichen betroffenen Anlagen werden anschliessend für jede Anlagengattung in ein neues DataFrame überführt.

Sind in den Anlagendaten keine Anlagen im entsprechenden Projektperimeter hinterlegt, gibt es TDBI eine Meldung ab und als mögliche betroffene Anlagen werden alle Anlagen vorgeschlagen, die dieselbe Standortbezeichnung besitzen, wie das Projekt.

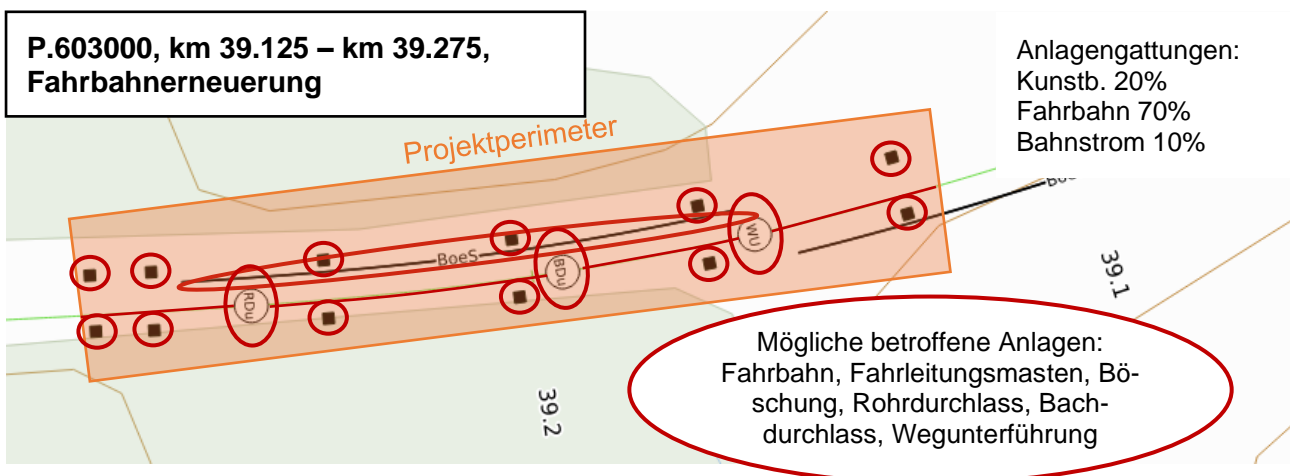


Abbildung 19: Beispielhafte Darstellung dazu, wie das TDBI die von einem Projekt betroffenen Anlagen ermittelt. Zu den betroffenen Anlagengattungen werden alle innerhalb des Projektperimeters liegenden Anlagen selektiert. Diese stellen die möglichen betroffenen Anlagen dar.

4.3.2.3 Auswahl der betroffenen Anlagen

Das TDBI kann anhand der vorgegebenen Projektinformationen nicht restlos alle betroffenen Anlagen ermitteln. Aus diesem Grund wurde ein zweites Tkinter-Fenster programmiert, in dem das TDBI der anwendenden ISB die möglichen betroffenen Anlagen in einem Tkinter-Fenster zur Auswahl zur Verfügung stellt. Die anwendende ISB kann in diesem Fenster die tatsächlich betroffenen Anlagen manuell auswählen (siehe Abbildung 11 und Abbildung 13).

4.3.2.4 Ermittlung der relevanten Anlagendaten

Die ausgewählten betroffenen Anlagen wurden mittels Variablendefinition einem neuen DataFrame zugewiesen. In diesem neuen DataFrame sind nun nur noch die tatsächlich betroffenen Anlagen vorhanden. Aus diesem DataFrame filtert das TDBI die relevanten Anlagendaten (Bezeichnung, Baujahr, Nutzungsdauer, Zustandsklasse und Wiederbeschaffungswert) heraus.

4.3.2.5 Output 1

Der erste Output wurde, wie die zwei folgenden Outputs auch, mit einem Tkinter-Fenster erstellt. Auf dem ersten Output sind die Variablen Nummer, Titel, Strecke, Standort, km von, km bis, Streckensperrungen und Anlagengattungen zu den beiden Projekten dargestellt. Für die Anlagendaten sind im unteren Bereich des Outputs die aufbereiteten DataFrames mit den relevanten Anlagendaten dargestellt, wie in der Abbildung 14 zu sehen.

4.3.2.6 Fehlermeldungen in der Einheit 2

Damit das TDBI mit Fehleingaben oder nicht den Anforderungen entsprechenden Projekten korrekt umgehen kann, wurden für die nachfolgend aufgelisteten Anwendungsfälle Fehlermeldungen eingebaut. Alle Fehler, die durch das TDBI abgefangen werden, werden mit einer Meldung beschrieben. Die anwendende ISB hat bei den ersten beiden Fällen, nach der Bestätigung der Fehlermeldung, die Möglichkeit, die Eingabe zu wiederholen. In der Abbildung 20 sind die Fehlermeldungen dargestellt.

- Fehlermeldung 1: Falsche Eingabe der Projektnummer
- Fehlermeldung 2: Eingabe derselben Projektnummer für Ausgangs- und Clusterprojekt
- Fehlermeldung 3: Projekt ohne Hauptanlagengattung (keine Anlagengattung besitzt 50% oder mehr der Projektkosten)
- Fehlermeldung 4: Keine möglichen Anlagen im Projektperimeter vorhanden

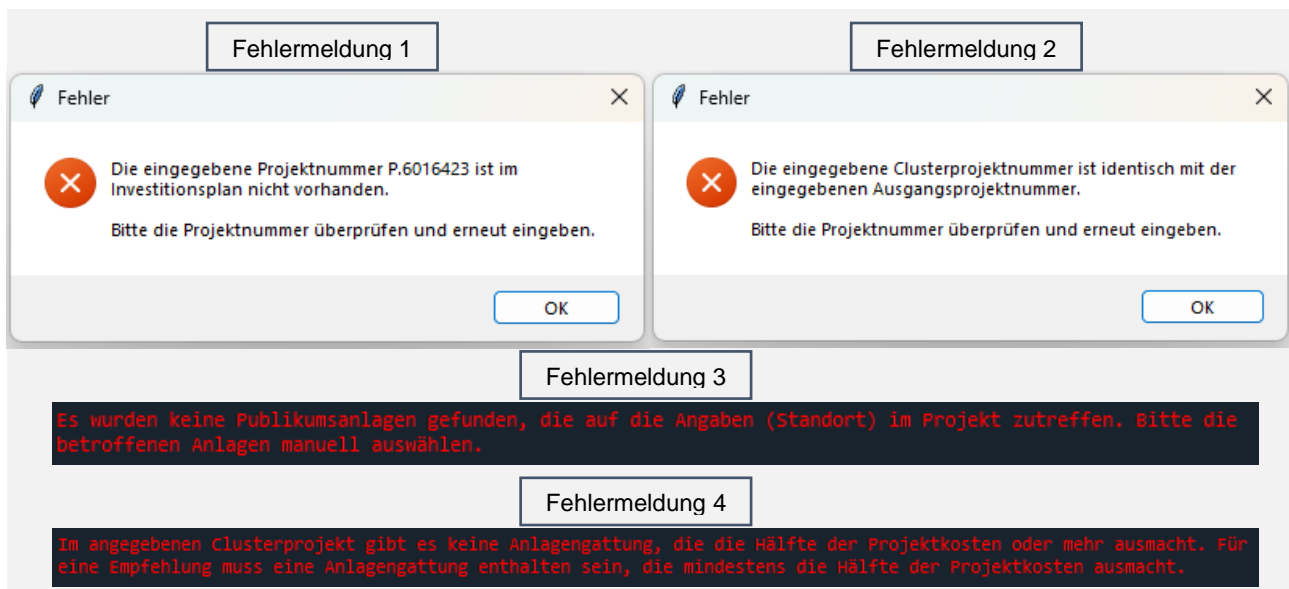


Abbildung 20: Programmierete Fehlermeldungen bei der Eingabe der Projektnummer.

Schliesslich wurde in dieser Einheit für alle Eingabefenster eine Option programmiert, mit der der gesamte Vorgang abgebrochen werden kann. In den Fenstern zur Eingabe der Projektnummern kann das Wort «abbrechen» in das Textfeld eingegeben werden. In den Fenstern zur Auswahl der betroffenen Anlagen kann der Button «Gesamten Vorgang abbrechen» betätigt werden.

4.3.2.7 Testen der Einheit 2

Nach der programmierten Ermittlung der relevanten Investitions- und Anlagendaten wurde die Funktion der Einheit 2 zusammen mit der Einheit 1 getestet. Die Einheiten wurden getestet, indem die Python-Datei ausgeführt wurde und real existierende Projekte eingegeben wurden. Als die korrekte Funktion der Einheiten 1 und 2 zusammen bestätigt werden konnte, wurde die Einheit 3 programmiert.

4.3.3 Einheit 3

In dieser Einheit wurde das TDBI so programmiert, dass es anhand der gesammelten Informationen der betroffenen Anlagen berechnen kann, ob bei einer Bündelung der eingegebenen Projekte vorzeitige oder nachzeitige Erneuerungen erfolgen würden. Dafür wurde zunächst der Baubeginn des Ausgangsprojekts als Zeitpunkt A einer möglichen Bündelung definiert und der Baubeginn des Clusterprojekts als Zeitpunkt C einer möglichen Bündelung.

Für die Berechnung der für diese Einheit benötigten Information wurden die Variablen Baujahr und Nutzungsdauer der Anlagen sowie die Jahreszahl des Zeitpunkts A und des Zeitpunkts C benötigt. Auf das Baujahr der ausgewählten Anlagen wurde die hinterlegte Nutzungsdauer addiert. In der Summe ergibt sich dabei das Jahr, an dem die Anlage theoretisch erneuert werden muss. Anschließend wurde die Jahreszahl der theoretischen Erneuerung mit den Jahreszahlen der Zeitpunkte A und C verglichen. Mit einer Dreisatzrechnung wurde bestimmt, zu welchem Prozentsatz die Nutzungsdauer einer Anlage zu den Zeitpunkten A und C theoretisch erreicht sein wird. In Prozent wird angegeben Die Abbildung 21 zeigt die Berechnungen in diesem Vorgang.

	A	B	C	D	E	F	G
			theretisches Ende der Nutzungsdauer	Zeitpunkt A	Erreichung der Nutzungsdauer zum Zeitpunkt A	Zeitpunkt C	Erreichung der Nutzungsdauer zum Zeitpunkt C
1	Baujahr	Nutzungsdauer	=A2+B2	2030	=100/B2*(B2+(D2-C2))	2050	=100/B2*(B2+(F2-C2))
2	1990	50	2040	2030	80	2050	120

Abbildung 21: Berechnungsbeispiel für die Ermittlung, ob eine Anlage zu den Zeitpunkten A und C das Ende ihrer Nutzungsdauer erreicht haben wird oder nicht. Die Erreichung der Nutzungsdauer wird in Prozent der Nutzungsdauer angegeben (Spalten E und G). In der Zeile 2 sind die Formeln für die Berechnung angezeigt und in der Zeile 3 sind die Resultate angezeigt.

Anhand des Beispiels in der Abbildung 21 wird erkannt, dass die Anlage das Ende ihrer Nutzungsdauer zum Zeitpunkt A noch nicht erreicht haben wird. Somit handelt es sich bei einer Erneuerung zum Zeitpunkt A um eine vorzeitige Erneuerung. Zum Zeitpunkt C wird das Ende der Nutzungsdauer bereits überschritten sein und daher handelt es sich bei der Erneuerung zum Zeitpunkt C um eine nachzeitige Erneuerung.

In das TDBI wurde diese Definition mit einer Wenn-Bedingung programmiert. Wenn die Nutzungsdauer-Erreichung zum Zeitpunkt A oder C unter 100% liegt, dann handelt es sich um eine vorzeitige Erneuerung und wenn die Nutzungsdauer-Erreichung zum Zeitpunkt A oder C über 100% liegt, dann handelt es sich um eine nachzeitige Erneuerung. Für den Fall, dass eine Erneuerung rechtzeitig stattfindet, wird die theoretische Nutzungsdauer-Erreichung 100% anzeigen. In diesem Fall gibt das TDBI eine rechtzeitige Erneuerung aus.

4.3.3.1 Fehlende Daten

Die Vollständigkeit der Anlagendaten liegt bei 97%. Es ist daher in seltenen Fällen möglich, dass bei einer Anlage das Baujahr oder die Nutzungsdauer fehlen. Ohne diese Informationen kann das TDBI nicht berechnen, wann die Anlagen theoretisch erneuert werden müsste. Entsprechend kann nicht berechnet werden, ob die Anlage zu den Zeitpunkten A oder C vorzeitig, rechtzeitig oder nachzeitig erneuert werden würde. Um ein Ergebnis nicht in die negative Richtung zu verfälschen, wird für eine Anlage mit fehlenden Angaben zu Baujahr oder Nutzungsdauer von dem TDBI mit einer

rechtzeitigen Erneuerung gerechnet. Somit verursacht diese Anlage im weiteren Verlauf keine Mehrkosten.

4.3.3.2 *Output 2*

Wie in der Abbildung 15 dargestellt, wurde der zweite Output wieder mit einem Tkinter-Fenster generiert. Auf dem Output ist im oberen Bereich ein Zeitstrahl mit den beiden Zeitpunkten A und C sowie mit den Inbetriebnahmen der beiden Projekte dargestellt. Der Zeitstrahl wurde innerhalb der Tkinter-Funktion programmiert.

Im unteren Bereich ist das DataFrame abgebildet, auf dem die Informationen zu der Erreichung der Nutzungsdauer der Anlagen zu den Zeitpunkten A und C dargestellt sind. Abgesehen davon ist in diesem DataFrame ersichtlich, ob die Anlagen zu den Zeitpunkten A und C vorzeitig, rechtzeitig oder nachzeitig erneuert werden würden.

4.3.3.3 *Testen der Einheit 3*

Nach der programmierten Ermittlung der Nutzungsdauer-Erreichung der Anlagen zu den Zeitpunkten A und C wurde die Funktion der Einheit 3 zusammen mit den Einheiten 1 und 2 getestet. Die Einheiten wurden getestet, indem die Python-Datei ausgeführt wurde und real existierende Projekte eingegeben wurden. Als die korrekte Funktion der Einheiten 1, 2 und 3 zusammen bestätigt werden konnte, wurde die vierte und letzte Einheit programmiert.

4.3.4 **Einheit 4**

In der vierten Einheit wurde das TDBI programmiert, damit es die positiven und negativen Auswirkungen einer Bündelung einander gegenüberstellen und berechnen kann, ob eine Bündelung der Investitionsprojekte lohnend ist oder nicht.

4.3.4.1 *Programmierung der negativen Auswirkungen*

Für eine Gegenüberstellung der positiven und negativen Auswirkungen wurden zunächst die negativen Auswirkungen programmiert. In der dritten Einheit wurde ermittelt, welche Anlagen bei einer Erneuerung zu den Zeitpunkten A und C vorzeitig, rechtzeitig oder nachzeitig erneuert werden würden. Für die quantitative Berechnung der negativen Auswirkungen wurden in der vierten Einheit die in den Kapiteln 4.2.1 und 4.2.2 beschriebenen Formeln in das TDBI programmiert.

Für die Berechnung der Auswirkung durch vorzeitige Erneuerung sind alle Kennzahlen bereits vorhanden. Das TDBI ermittelt lediglich, um wie viele Jahre der vorzeitigen Erneuerung es sich handelt. Anschliessend wird gemäss der Formel der Anteil der vorzeitigen Erneuerung von dem Wiederbeschaffungswert als Restwertvernichtung angegeben.

Bei der nachzeitigen Erneuerung wurden zusätzlich die Parameter der jährlichen Unterhaltskosten sowie der Erhöhungssatz bei Überschreitung der Nutzungsdauer in das TDBI programmiert. Damit diese Parameter durch die anwendende ISB leicht verändert werden können, ist die Parameterdefinition innerhalb der ersten 44 Zeilen des Codes implementiert, wie auf der Abbildung 22 dargestellt. Anschliessend werden die Mehrkosten für die nachzeitige Erneuerung mit den vorhandenen Kennzahlen durch das TDBI gemäss der Formel berechnet.

```

32 # Parameter der jährlichen Unterhaltskosten pro Anlagengattung (als Anteil des WBW der Anlage)
33 unterhalt_kb = 0.0015
34 unterhalt_fb = 0.0408
35 unterhalt_fs = 0.0072
36 unterhalt_satn = 0.0159
37 unterhalt_pa = 0.0006
38
39 # Parameter der jährlichen Erhöhung der Unterhaltskosten bei Überschreitung der Nutzungsdauer (Erhöhungssatz)
40 unterhalt_zk5_kb = 0.2
41 unterhalt_zk5_fb = 0.1
42 unterhalt_zk5_fs = 0.15
43 unterhalt_zk5_satn = 0.2
44 unterhalt_zk5_pa = 0.35

```

Abbildung 22: Festlegung der Parameter für die Ermittlung der Auswirkungen von nachzeitigen Erneuerungen im Python-Code des TDBI.

4.3.4.2 Programmierung der positiven Auswirkung

Um die positive Auswirkung einer Bündelung von Investitionsprojekten quantitativ berechnen zu können, wurden in dem TDBI zunächst die Bruttoprojektkosten berechnet. Diese werden berechnet, in dem die Addition der Projektkosten der beiden Investitionsprojekte programmiert wurden.

Als zusätzliche Hilfsliste wurden die Tabellen der Ermittlung des Synergieeffekts, wie sie im Kapitel 4.2.3 beschrieben sind, als «Synergieeffekt.xlsx» in das TDBI importiert. Das Tool ermittelt anhand der Projektdaten, welche Streckensperrungen durch die Projekte ausgelöst werden. Anhand dieser Informationen sucht das TDBI in der Hilfsliste die entsprechende Kombination der Streckensperrungen und speichert den dazugehörigen Kombinationscode. Im nächsten Schritt ermittelt das TDBI die betroffenen Anlagengattungen und sucht wiederum in der Hilfsliste nach der entsprechenden Kombination der Anlagengattungen und speichert den dazugehörigen Kombinationscode. Für die Synergie der Anlagengattungen berücksichtigt das TDBI jeweils die Hauptanlagengattung. Sollten in einem Projekt zwei Hauptanlagengattungen (je 50% der Projektkosten) vorhanden sein, prüft das TDBI alle entstehenden Kombinationen und wählt diejenige mit dem höchsten Score. Die beiden Kombinationscodes werden in einem letzten Schritt zusammengefügt. So sucht das TDBI in der Liste der Gesamt-Synergie den entsprechenden Synergieeffekt, der auf die beiden Projekte zutrifft.

Schliesslich wurde das TDBI programmiert, dass es mit dem Synergiefaktor die Projektkostenreduktion berechnet und diese von den Bruttoprojektkosten subtrahiert. Diese Subtraktion ergibt die Nettoprojektkosten.

4.3.4.3 Output 3

Gemäss dem entstehenden Trade-Off zwischen der Ausnutzung von Synergieeffekten und den negativen Auswirkungen der Synchronisierung von Anlagenlebenszyklen wurde für den Output 3 eine Gegenüberstellung der negativen und positiven Auswirkungen einer Bündelung programmiert. Einerseits wurde berechnet, wie hoch die Mehrkosten der Anlagen sind, wenn keine Bündelung durchgeführt wird. Andererseits wurden die Mehrkosten mit einer Bündelung für die Zeitpunkte A und C berechnet. Der Synergieeffekt wird bei einer Bündelung angewendet. Falls keine Bündelung stattfindet, wird der Synergieeffekt nicht angewendet.

So werden für alle drei Optionen *ohne Bündelung*, *Bündelung zum Zeitpunkt A* und *Bündelung zum Zeitpunkt C* die Mehrkosten der Anlagen mit den Nettoprojektkosten addiert. Das Tool wurde schliesslich so programmiert, dass es diejenige Option mit den tiefsten Kosten als Bestoption empfiehlt.

Der dritte Output wird in einem Tkinter-Fenster generiert mit Balkendiagrammen für die drei Optionen im oberen Bereich und mit einem DataFrame der drei Optionen im unteren Bereich (siehe Abbildung 16). Die Empfehlung zur Bestoption gibt das TDBI in dem blauen Satz zuunterst in diesem Output aus. Je nach Ergebnis der Gegenüberstellung verändert sich die Empfehlung des TDBI. In der Abbildung 23 sind alle möglichen Empfehlungen dargestellt, die programmiert wurden. Die Empfehlungen wurden für die Abbildung mit den Testprojekten P.603000 und P.603001 generiert.

Die Unterschiede zwischen der dritten und der fünften respektive zwischen der vierten und der sechsten Empfehlung liegen darin, dass wenn eine Bündelung zu einem Zeitpunkt empfohlen wird, die Option der Bündelung zu diesem Zeitpunkt die günstigste ist. Wenn eine Bündelung zu einem Zeitpunkt möglich ist, bedeutet das, dass die Option *keine Bündelung* gleich viel kostet wie die Option mit Bündelung.

Am Schluss wurden alle TKinter-Fenster zu den Outputs umprogrammiert, sodass zwischen ihnen mit den Buttons «weiter» und «zurück» gewechselt und dass der ganze Output mit dem Button «Output Schliessen» geschlossen werden kann.

Eine Bündelung der Projekte P.603000 und P.603001 ist aus Sicht der Synchronisierung der Anlagenlebenszyklen weder zum Zeitpunkt A noch zum Zeitpunkt C zu empfehlen
Eine Bündelung der Projekte P.603000 und P.603001 ist aus Sicht der Synchronisierung der Anlagenlebenszyklen zu den Zeitpunkten A und C oder dazwischen gleichermassen möglich
Eine Bündelung der Projekte P.603000 und P.603001 ist aus Sicht der Synchronisierung der Anlagenlebenszyklen zum Zeitpunkt A zu empfehlen
Eine Bündelung der Projekte P.603000 und P.603001 ist aus Sicht der Synchronisierung der Anlagenlebenszyklen zum Zeitpunkt C zu empfehlen
Eine Bündelung der Projekte P.603000 und P.603001 ist aus Sicht der Synchronisierung der Anlagenlebenszyklen zum Zeitpunkt A möglich
Eine Bündelung der Projekte P.603000 und P.603001 ist aus Sicht der Synchronisierung der Anlagenlebenszyklen zum Zeitpunkt C möglich

Abbildung 23: Alle möglichen Empfehlungen, die das TDBI situativ abgibt.

4.3.4.4 Testen der Einheit 4

Nach der programmierten Gegenüberstellung der positiven und negativen Auswirkungen einer Bündelung wurde die Funktion der Einheit 4 zusammen mit allen vorherigen Einheiten getestet. Die Einheiten wurden getestet, indem die Python-Datei ausgeführt wurde und real existierende Projekte eingegeben wurden.

4.4 Integrationstest

Nachdem alle vier Einheiten miteinander funktionierten, wurde anhand sechs Projekte mit unterschiedlichen Eigenschaften der Integrationstest durchgeführt. Die sechs Projekte wurden in acht verschiedene Kombinationen gesetzt. In dem Integrationstest ging es noch nicht darum, dass das TDBI für reale Bündelungen die korrekten Resultate liefert. Dies wurde in der Validierung des Tools überprüft, welche im Kapitel 5 beschrieben ist.

In dem Integrationstest ging es darum, dass das TDBI in seiner vorgesehenen Umgebung funktioniert und auf unterschiedliche Merkmale der Projekte korrekt eingehen kann. Konkret wurde beobachtet, ob das TDBI alle Daten aufnehmen, sie weiterverarbeiten und in den drei Outputs korrekt darstellen kann. Dafür wurden die in der Tabelle 9 dargestellten Kombinationen von Projekten getestet. Allesamt wurden durch das TDBI korrekt behandelt.

Tabelle 9: Kombinationen der im Rahmen des Integrationstests getesteten Investitionsprojekte. Sechs Projekte mit unterschiedlichen Merkmalen wurden in verschiedenen Kombinationen getestet.

	Projekt	Baubeginn	Inbetriebnahme	Strecken-sperrung	Anlagengattung
Ausgangsprojekt	P.601899	01.01.2025	31.12.2025	Keine	KB 50, PA 50
Clusterprojekt	P.602019	01.01.2031	31.12.2031	Keine	FB 100
Ausgangsprojekt	P.602019	01.01.2031	31.12.2031	Keine	FB 100
Clusterprojekt	P.601899	01.01.2025	31.12.2025	Keine	KB 50, PA 50
Ausgangsprojekt	P.601899	01.01.2025	31.12.2025	Keine	KB 50, PA 50
Clusterprojekt	P.601740	01.02.2027	31.12.2028	Kleine	KB 5, FB 70, BS 10, SA 10, NT 5
Ausgangsprojekt	P.602019	01.01.2031	31.12.2031	Keine	FB 100
Clusterprojekt	P.601740	01.02.2027	31.12.2028	Kleine	KB 5, FB 70, BS 10, SA 10, NT 5
Ausgangsprojekt	P.601588	01.01.2030	31.12.2030	Grosse	FB 100
Clusterprojekt	P.601674	01.04.2024	01.10.2024	Keine	KB 100
Ausgangsprojekt	P.601674	01.04.2024	01.10.2024	Keine	KB 100
Clusterprojekt	P.602019	01.01.2031	31.12.2031	Keine	FB 100
Ausgangsprojekt	P.601945	01.04.2026	01.09.2026	Keine	FB 20, SA 10, NT 70
Clusterprojekt	P.601588	01.01.2030	31.12.2030	Grosse	FB 100
Ausgangsprojekt	P.601674	01.04.2024	01.10.2024	Keine	KB 100
Clusterprojekt	P.601945	01.04.2026	01.09.2026	Keine	FB 20, SA 10, NT 70

5 Proof of Concept: Validierung des TDBI

Mit dem Integrationstest wurde erfolgreich überprüft, dass das TDBI in seiner vorgesehenen Arbeitsumgebung korrekt funktioniert. Mit der Validierung des TDBI wurde schliesslich die Anwendbarkeit in der Praxis überprüft. Die Validierung wurde anhand dreier Beispiele, welche in der Realität zu einer Bündelung von Investitionsprojekten führten, und anhand eines Beispiels, bei welchem in der Realität bewusst keine Bündelungen vorgenommen wurde, durchgeführt. Die Validierung des TDBI wurde im Anhang C mit Abbildungen dokumentiert. In diesem Anhang sind sämtliche Validierungsergebnisse einsehbar.

Das TDBI empfahl das Vorgehen in Bezug auf die Bündelung der Investitionsprojekte in allen vier Situationen korrekt. Somit beweist sich das entwickelte TDBI in der Praxis als anwendungstauglich.

5.1 Instandsetzung «Wasserfluchtunnel» und Viadukt «alte Strasse»

In dem Jahr 2024 findet zwischen Wattwil und Herisau ein Projektcluster statt, der unter anderem die Investitionsprojekte P.601795, Instandsetzung Wasserfluchtunnel und P.601749, Instandsetzung Viadukt alte Strasse in Lichtensteig beinhaltet [26]. In der Abbildung 24 ist der Projektcluster in der Region Lichtensteig dargestellt.

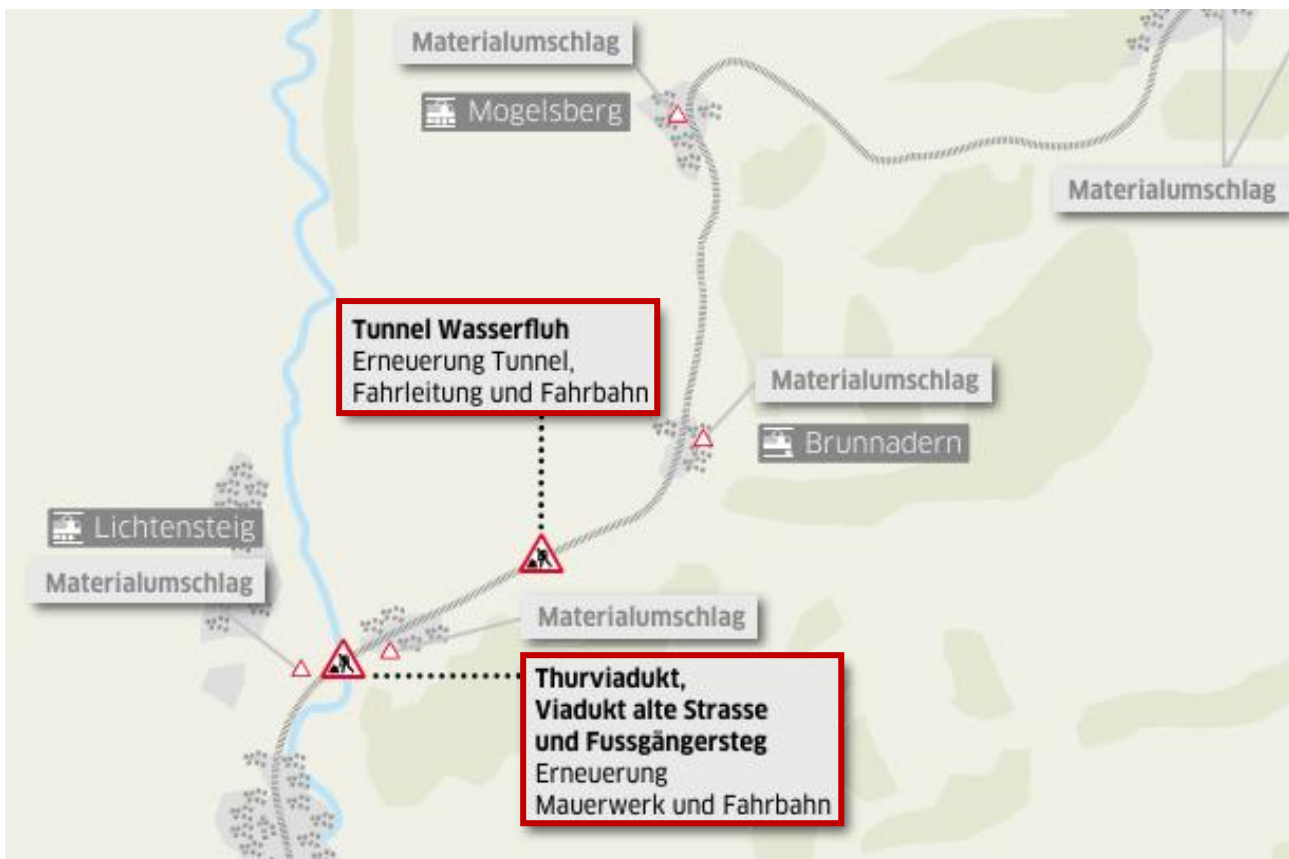


Abbildung 24: Übersicht über den Projektcluster Ost 2024 der SOB. Ausschnitt aus der Region Lichtensteig [16].

Die beiden Investitionsprojekte werden im Jahr 2024 gebündelt realisiert. Mit diesen zwei Projekten wurde überprüft, ob das TDBI das Synergiepotenzial zwischen den beiden Projekten erkennt und die Bündelung empfiehlt. Das TDBI konnte das Synergiepotenzial zwischen den beiden Projekten erkennen. Es empfahl eine Bündelung der Projekte zum Zeitpunkt C, also zum Zeitpunkt des Baubeginns des Projekts P.601749.

Gemäss den Kennzahlen der Synchronisierung der Anlagenlebenszyklen wäre der Zeitpunkt C der bessere Zeitpunkt für eine Bündelung als der Zeitpunkt A. Dennoch wird der Cluster im Jahr 2024 ausgeführt und nicht im Jahr 2026. Dies liegt daran, dass für die Entscheidung des Durchführungszeitpunkts der Bündelung andere Faktoren die treibenden Kräfte hinter der Entscheidung des Ausführungszeitpunkts waren. So wurde aufgrund einer Zustandsanalyse des Bühlbergtunnels, welcher ebenfalls im Rahmen des Projektclusters instandgesetzt wird, festgestellt, dass für die Bahnstromanlagen im Tunnel keine Ersatzteile mehr verfügbar waren und sich die Fahrplananlagen in einem schlechten Zustand befanden. Abgesehen davon findet im Jahr 2025 eine totale Streckensperrung in St. Margrethen statt, weshalb die Durchführung des Clusters in diesem Jahr ausgeschlossen wurde [27]. Gemäss Output 3 des TDBI ist der Zeitpunkt A für eine Bündelung aber auch noch lohnend und somit wurde entschieden, dass der gesamte Projektcluster im Jahr 2024 realisiert wird.

5.2 Erneuerung Bahnstromanlagen und Fahrbahn

Auf einem Streckenabschnitt zwischen Biberbrugg und Einsiedeln stehen mit den Projekten P.601629 und P.601963 eine Erneuerung der Bahnstromanlagen und der Fahrplananlagen an, wie in der Abbildung 25 dargestellt. Die Projekte werden im Jahr 2027 gebündelt ausgeführt.

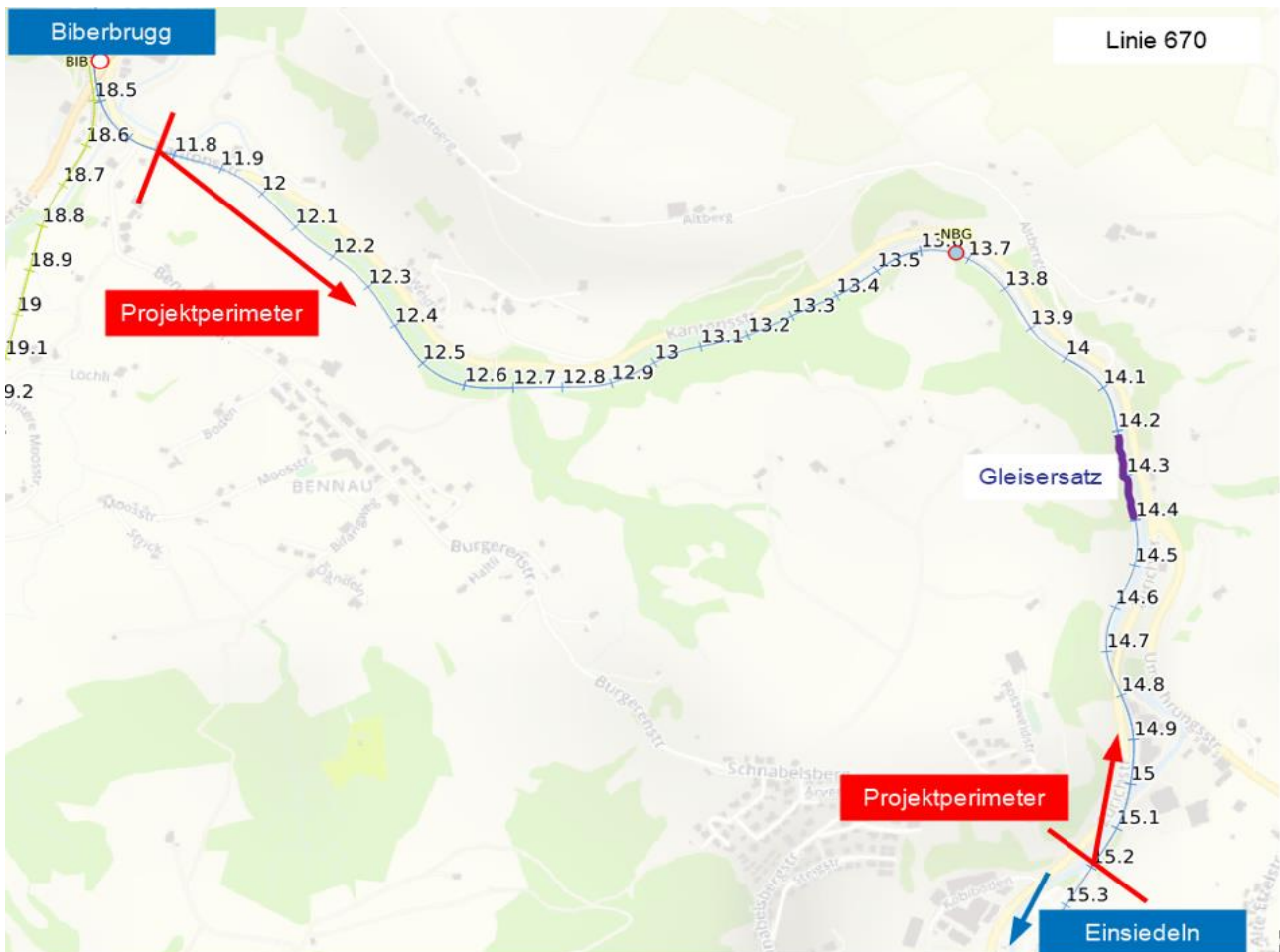


Abbildung 25: Übersicht über die gebündelten Projekte P.601629 und P.601963. (Quelle: SOB-interner Projektantrag)

Das TDBI erkannte bei diesen Projekten das Potenzial des Synergieeffekts und empfahl eine Bündelung der Projekte zu dem Zeitpunkt C, also im Jahr 2028. Auch hier war ein äusserer Einfluss, für die frühere Durchführung der Bündelung der Projekte verantwortlich. Im Jahr 2027 wird zwischen Schindellegi und Biberbrugg ein Doppelspurausbau durchgeführt, welcher eine totale Streckensperrung zur Folge hat. Für die Bündelung der beiden Investitionsprojekte ergibt sich somit eine zusätzliche Synergie, wenn die Streckensperrung des Doppelspurausbaus ausgenutzt werden kann. Aus diesem Grund wurde entschieden, die beiden Projekte im Jahr 2027 auszuführen.

5.3 Ersatz unterbrechungsfreie Stromversorgung und Erneuerung Fahr- bahn

In den Jahren 2027 und 2029 erneuert die SOB im Rahmen des Projekts P.601740 den doppelspurigen Fahrbahnabschnitt zwischen Samstagen und Schindellegi, wie die Abbildung 26 zeigt. Die unterbrechungsfreie Stromversorgung (USV) in Schindellegi erreichte im Jahr 2020 das theoretische Ende ihrer Nutzungsdauer. Mit Inspektionen hat sich gezeigt, dass sich die USV in einem schlechten Zustand befindet und sie ersetzt werden muss. Der Ersatz der USV wird unter der Projektnummer P.601614 gebündelt mit der Erneuerung der Fahrbahn durchgeführt.

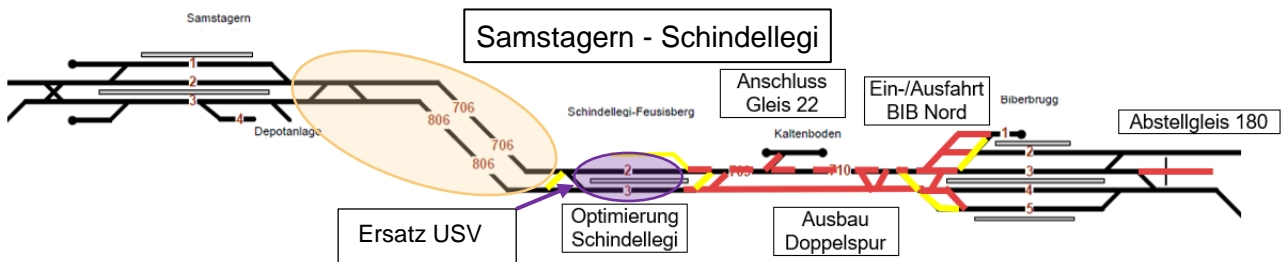


Abbildung 26: Übersicht über die Erneuerung des Doppelspurabschnitts zwischen Samstagen und Schindellegi. Die Erneuerung der Fahrbahn und somit auch das Projekt zum Ersatz der USV wurden zusätzlich mit dem Projekt des Doppelspurausbau zwischen Schindellegi und Biberbrugg gebündelt. (Quelle: SOB-interner Projektantrag)

Das TDBI erkannte das Synergiepotenzial zwischen den beiden Projekten und empfahl, die Projekte gebündelt zu dem Zeitpunkt C durchzuführen.

5.4 Ersatz unterbrechungsfreie Stromversorgung und Stationsprojekt

In Schindellegi findet zwischen den Jahren 2033 und 2035 unter der Projektnummer P.601614 ein Stationsprojekt statt, bei dem diverse Publikumsanlagen umgebaut werden. Da mit der Erneuerung des Doppelspurabschnitts zwischen Samstagen und Schindellegi, mit dem Doppelspurausbau zwischen Schindellegi und Biberbrugg und mit dem Ersatz der USV in den Jahren 2027 und 2028 die Bautätigkeit in der Region bereits an ihre Grenzen stösst, wurde das Stationsprojekt bewusst nicht mit diesen Projekten gebündelt. Nebst dem Volumen der Bautätigkeit sind aber auch die Anlagen der Projekte Treiber für den Ausführungszeitpunkt in den 2020-er Jahren. Daher wurde in diesem letzten Beispiel überprüft, ob das TDBI erkennt, dass der Ersatz der USV in Schindellegi nicht mit dem Stationsprojekt gebündelt werden soll. Das TDBI kam in diesem Beispiel zu dem korrekten Resultat. Es empfahl für die beiden Projekte Ersatz USV und Stationsprojekt Schindellegi keine Bündelung vorzunehmen.

6 Beobachtungen in den Resultaten

Aus den Resultaten, die während des Integrationstests und der Validierung des TDBI generiert wurden, konnten einige Erkenntnisse zu dem Verhalten des TDBI sowie zu der Synchronisierung von Anlagenlebenszyklen gewonnen werden.

6.1 Zeitliche Differenz bei der Bündelung von Investitionsprojekten

Aus einer Analyse der Resultate wurde erkannt, dass das TDBI für Investitionsprojekte, die neun oder mehr Jahre auseinander liegen, nur in seltenen Fällen eine Bündelung empfiehlt. Der Grund dafür ist, dass die Mehrkosten bei der Synchronisierung von Anlagenlebenszyklen steigen, je weiter die Projekte auf der Zeitachse auseinander liegen, während der Synergieeffekt nicht von der Zeit abhängig ist. Wird davon ausgegangen, dass zwei Investitionsprojekte zehn Jahre auseinander liegen und die Anlagen zu dem Zeitpunkt der geplanten Einzelausführung alle rechtzeitig ausgeführt werden, so müssten bei einer Bündelung zu dem Zeitpunkt A alle Anlagen des Clusterprojekts zehn Jahre vorzeitig oder bei einer Bündelung zu dem Zeitpunkt C alle Anlagen des Ausgangsprojekts zehn Jahre nachzeitig erneuert werden.

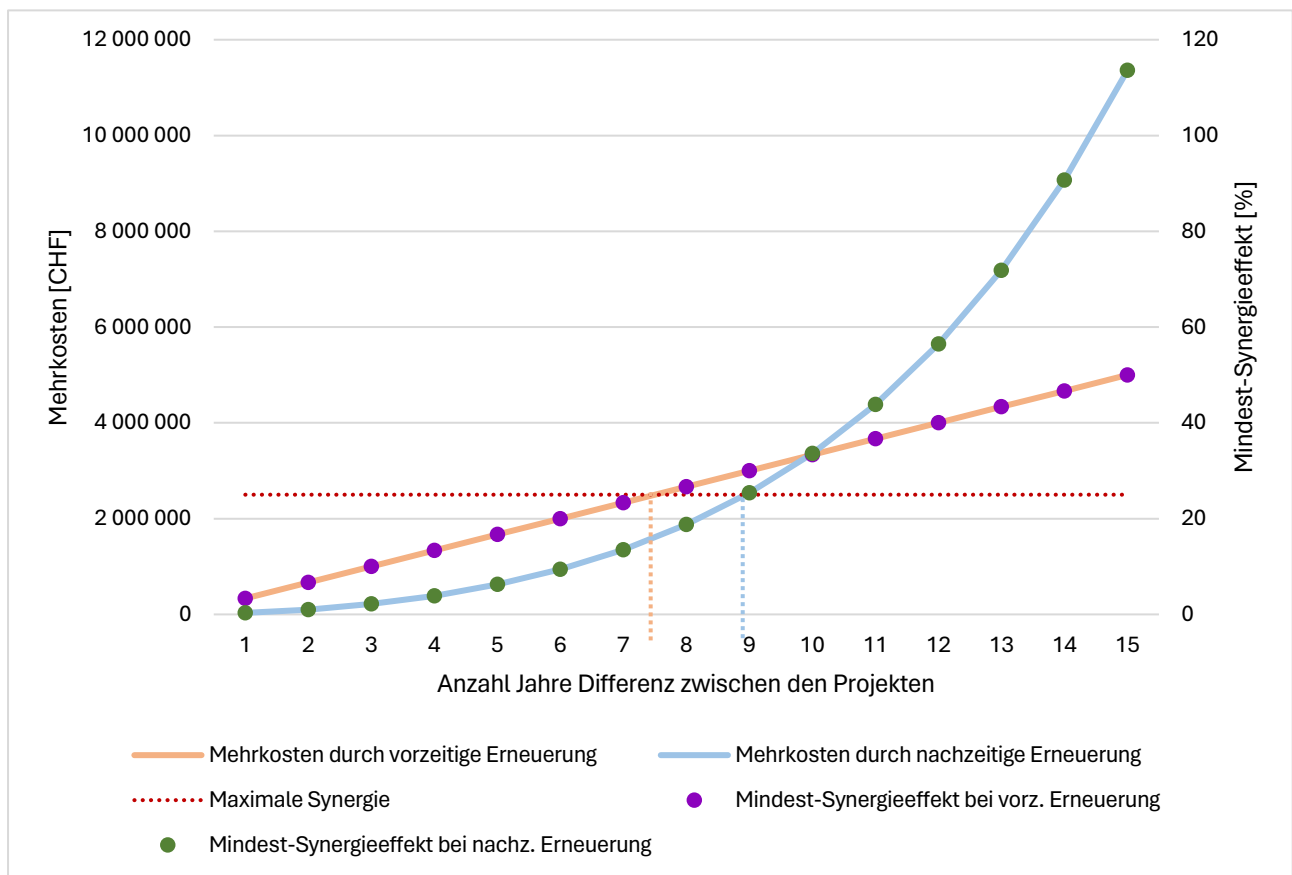


Abbildung 27: Beispiel, wie sich die Mehrkosten einer Bündelung von zwei Investitionsprojekten erhöhen, je länger auseinander die beiden Projekte zeitlich liegen. So muss sich auch der Mindest-Synergieeffekt erhöhen, damit sich eine Bündelung lohnt.

Wenn zwei Projekte gebündelt werden sollen, deren Projektkosten je CHF 5'000'000.– betragen und deren Anlagen einen WBW von je CHF 10'000'000.– sowie eine ND von 30 Jahren besitzen, liegt die maximale zeitliche Differenz für eine Bündelung bei vorzeitiger Erneuerung bei sieben Jahren und bei nachzeitiger Erneuerung bei acht Jahren, wie die Abbildung 27 zeigt. Das heisst, wenn von einem maximal möglichen Synergieeffekt von 25% (rot-gestrichelte horizontale Linie) ausgegangen wird, wird eine Bündelung zweier Projekte mit den beschriebenen Eigenschaften mit maximal acht Jahren Differenz von dem TDBI empfohlen. Für die nachzeitige Erneuerung wurde bei diesem

Beispiel mit den Parametern von Sicherungsanlagen (jährliche Unterhaltskosten betragen 1.59% des WBW und die Unterhaltskosten erhöhen sich jährlich um 20% nach der Erreichung der ND) gerechnet. Bei der SOB besitzen nur 5.2% aller geplanten Projekte Projektkosten von CHF 5'000'000.– oder mehr, welche gebündelt miteinander Gesamt-Projektkosten von über CHF 10'000'000.– ergeben. Bei diesen Projekten ist es möglich, dass das TDBI eine Bündelung auch bei einer grösseren zeitlichen Differenz als acht Jahre empfiehlt.

6.2 Häufige Empfehlung des späteren Zeitpunkts

In den Resultaten der Validierung wurden von den drei Empfehlung zu einer Bündelung drei mit einer Bündelung zum Zeitpunkt C, also zum Späteren der beiden Zeitpunkte, empfohlen. Diese Mehrheit hat zwei Gründe:

- Einerseits liegen die Mehrkosten durch nachzeitige Erneuerung, wie in der Abbildung 27 zu sehen, bis zu zehn Jahren Differenz zwischen den zu bündelnden Projekten unter den Mehrkosten der vorzeitigen Erneuerung. Da der spätere Zeitpunkt derjenige ist, der weniger vorzeitige und mehr nachzeitige Erneuerungen aufweist, sind die Mehrkosten der nachzeitigen Erneuerung häufig günstiger als die Mehrkosten der vorzeitigen Erneuerung.
- Andererseits werden bei der SOB die Projekte bewusst eher frühzeitig eingeplant. So können im Investitionsplan eine höhere Stabilität und eine höhere Flexibilität erreicht werden. Bei der Überprüfung der Investitionsprojekte weisen viele Anlagen daher schon von vornherein eine vorzeitige Erneuerung auf, weshalb das TDBI versucht, eine Bündelung hinauszuzögern, indem es den Späteren der beiden Zeitpunkte empfiehlt.

In dem Integrationstest wurden aber auch mehrere Empfehlungen für eine Bündelung zum Zeitpunkt A abgegeben. Eine Empfehlung zum Zeitpunkt A kommt also auch regelmässig vor.

6.3 Anlagen-Mehrkosten ohne Bündelung

Mehrkosten von Anlagen durch die vorzeitige und nachzeitige Erneuerung entstehen nicht nur bei der Bündelung von Investitionsprojekten, sondern auch bei der Einzelausführung zweier Projekte. Dies zeigen die Resultate des Integrationstests und der Validierung des TDBI. Der Grund dafür ist, dass bei den meisten Projekten mehr als eine Anlage und oftmals Anlagen unterschiedlicher Anlagengattungen betroffen sind. Sobald mehrere Anlagen in einem Projekt betroffen sind, deren Lebenszyklen nicht zu demselben Zeitpunkt enden, findet für einzelne Anlagen eine Synchronisierung der Lebenszyklen statt, wodurch Mehrkosten entstehen. Nur in Projekten, bei denen alle betroffenen Anlagen zu demselben Zeitpunkt erneuert werden müssen, ist es möglich, dass keine Mehrkosten der Anlagen anfallen.

6.4 Anstieg der Mehrkosten bei mehr betroffenen Anlagen

In den Resultaten des Integrationstests und der Validierung des TDBI zeigt sich, dass die Mehrkosten der Anlagen bei Projekten mit vielen betroffenen Anlagen tendenziell höher sind als bei Projekten mit wenigen betroffenen Anlagen. Dies liegt daran, dass die Wahrscheinlichkeit einer vorzeitigen oder nachzeitigen Erneuerung mit dem Anstieg an betroffenen Anlagen steigt. Je mehr Anlagen also durch ein Projekt betroffen sind, desto höher ist die Wahrscheinlichkeit, dass die Lebenszyklen der Anlagen bei einer Instandsetzung synchronisiert werden müssen und so Mehrkosten auslösen. Allerdings sind die Mehrkosten abhängig von dem WBW der Anlagen. Daher ist es situativ möglich, dass Projekte mit wenigen betroffenen Anlagen höhere Anlagen-Mehrkosten aufweisen als Projekte mit vielen betroffenen Anlagen.

7 Diskussion und Ausblick

7.1 Diskussion

Mit dem Testen der einzelnen Einheiten über den Integrationstest bis hin zu der Validierung mittels Proof of Concept konnte bestätigt werden, dass das in dieser Arbeit entwickelte TDBI korrekt funktioniert und in der Praxis anwendbar ist. Nebst der qualitativen Richtigkeit des TDBI ist hervorzuheben, dass die fünf Validierungsbeispiele mit dem TDBI innerhalb von 20 Minuten überprüft werden konnten, während die Abklärungen in der Praxis mehrere Arbeitsstunden in Anspruch nahmen. Somit bestätigt sich, dass das TDBI dem anwendenden ISB einen zeitlichen Vorteil gegenüber dem herkömmlichen, manuellen Vorgehen verschafft.

Nebst der Entwicklung eines Tools, welches den Prozess der Bildung von Projektbündelungen unterstützt, konnten in dieser Arbeit zusätzliche Themen weiterentwickelt werden. So wurden die negativen Auswirkungen von vorzeitigen und nachzeitigen Erneuerungen detailliert ergründet und Formeln zur Berechnung der Auswirkungen ermittelt. Des Weiteren wurde eine neuartige Bewertungsmethode für die Ermittlung des Synergieeffekts bei einer Bündelung von Investitionsprojekten angewendet. Darüber hinaus wurde für die SOB eine Schnittstelle zwischen Investitionsprojektdaten und Anlagendaten entwickelt, die vorher noch nicht existierte.

7.1.1 Das TDBI ist ein unterstützendes Tool

In allen vier Validierungsbeispielen empfahl das TDBI das richtige Vorgehen in Bezug auf die Bündelung zweier Investitionsprojekte. In den ersten beiden Beispielen wurde jedoch gezeigt, dass in der Praxis ein anderer Zeitpunkt für die Bündelung gewählt wurde, als er von dem TDBI empfohlen wurde. Nicht nur der Zeitpunkt einer empfohlenen Bündelung kann schlussendlich von der ursprünglichen Empfehlung des TDBI abweichen. Wie im Vorgehensschema zu sehen, ist es möglich, dass eine Bündelung aus Sicht der Synchronisierung der Anlagenlebenszyklen empfehlenswert ist, sie jedoch aufgrund eines anderen Faktors im weiteren Verlauf des Vorgehensschemas nicht durchgeführt werden kann. Beispielsweise ist es möglich, dass eine Bündelung von Projekten aus Sicht der Synchronisierung der Anlagenlebenszyklen von dem TDBI empfohlen wird, sie schliesslich aber nicht durchgeführt wird, weil die logistischen Anforderungen nicht erfüllt werden können. In seltenen Fällen kann auch der gegenteilige Fall vorkommen, dass eine Bündelung von Projekten vorgenommen wird, obwohl diese aus Sicht der Synchronisierung der Anlagenlebenszyklen nicht sinnvoll ist. Dieser Fall trifft dann ein, wenn ein anderer Faktor als relevanter eingestuft wird und er die Sicht der Synchronisierung der Anlagenlebenszyklen übersteuert.

Die oben erwähnten Punkte machen deutlich, dass das TDBI zur Unterstützung in der Bildung von Projektbündelungen entwickelt wurde. Es ersetzt nicht den bestehenden Prozess, sondern erleichtert diesen mit einer effizienten Empfehlung im Bereich der Synchronisierung von Anlagenlebenszyklen. Die weiteren Faktoren des Vorgehensschemas sollen in der Praxis nach wie vor überprüft und berücksichtigt werden.

7.1.2 Relevanz der Datenqualität und -vollständigkeit

Für ein digitales Tool, wie das TDBI eines ist, ist von hoher Wichtigkeit, dass die Daten, mit welchen das Tool gespeist wird, vollständig und korrekt gepflegt werden. Die Datenqualität bestimmt die Qualität der Outputs des TDBI. Durch eine manuelle Überprüfung der Datenqualität konnte diese für die Anwendung des TDBI im Rahmen dieser Arbeit sichergestellt werden. Auch zukünftig ist es wichtig, dass die Daten korrekt erfasst und gepflegt werden.

Nebst der Korrektheit ist auch die Vollständigkeit der Daten von hoher Wichtigkeit. Mit komplementären Quellen für die Investitionsdaten und die Anlagendaten konnte in dieser Arbeit sichergestellt werden, dass die Datenvollständigkeit für das TDBI schlussendlich bei 96% lag. Dies wurde

überprüft, indem die Vollständigkeit der relevanten Spalten der Haupt- und aller Hilfslisten gezählt und der Durchschnitt daraus berechnet wurde, wie in der Abbildung 28 dargestellt.

Investitionsdaten	Durchschnitt	geogr. Lage	Zeitpunkt		betroffene Anlagengattungen	Streckensperungen	Projektkosten
			Baubeginn	Inbetriebnahme			
Investitionsplan	95%	99%	99%	99%	99%	100%	72%
Investitionsplan ERP-Export	95%	92%	99%	99%	100%	100%	80%
Durchschn. Investitionsdaten	95%						
Anlagendaten	Durchschnitt	geogr. Lage	Baujahr	Nutzungsdauer	Wiederbeschaffungs		
					wert		
Kunstabauten	86%	100%	57%	100%	85%		
Fahrbahnanlagen	99%	100%	98%	99%	98%		
Bahnstromanlagen	100%	100%	100%	100%	100%		
Sicherungsanlagen und Niederspannung & Telekom	99%	98%	99%	100%	99%		
Publikumsanlagen	100%	100%	100%	100%	100%		
Durchschn. Anlagendaten	97%						
Datenvollständigkeit	96%						

Abbildung 28: Ermittelte Datenvollständigkeit aller Investitions- und Anlagendaten. Die Vollständigkeit der relevanten Spalten wurde in der Haupt- und in den Hilfslisten ausgerechnet und daraus der Durchschnitt berechnet.

7.2 Ausblick

Basierend auf dem in dieser Arbeit entwickelten TDBI werden Recherche- beziehungsweise Handlungsfelder aufgezeigt, mit welchen das Tool selbst und die Thematik der Bündelung von Substanzerhaltungsmassnahmen der Eisenbahninfrastruktur weiterentwickelt werden können.

7.2.1 Teilbereiche des Vorgehensschemas in das TDBI implementieren

Das TDBI ist im dritten Teilbereich, nämlich im Teilbereich Synchronisierung der Anlagenlebenszyklen, des beschriebenen Vorgehensschemas tätig. Für eine Weiterentwicklung des TDBI könnten alle Teilbereiche des Vorgehensschemas als Module programmiert werden. Diese Module könnten anschliessend miteinander verknüpft werden. Daraus würde ein TDBI entstehen, dass den gesamten Prozess zur Bündelung von Investitionsprojekten selbstständig durchlaufen könnte. Es würde als einziger Input die Projektnummer des zu initialisierenden Projekts sowie die betroffenen Anlagen benötigen.

7.2.1.1 Modul 1

Das TDBI überprüft anhand der geografischen Lage sowie anhand des auszuführenden Zeitpunkts des zu initialisierenden Projekts die vorhandenen Projekte Investitionsplan. Dabei sucht es autonom nach möglichen Clusterprojekten. Die Auswahl trifft das TDBI anhand der zeitlichen Differenzen der Projekte sowie anhand der geografischen Distanz.

7.2.1.2 Modul 2

Die physischen Abhängigkeiten des Ausgangsprojekts werden durch das TDBI selbstständig ermittelt. Dabei überprüft das TDBI die betroffenen Anlagen und stellt anhand von Verknüpfungen in den Anlagendaten fest, welche Anlagen mit anderen Anlagen physisch zusammen hängen. Bei physischen Abhängigkeiten überprüft das TDBI anschliessend das Mengengerüst des Projekts auf seine Vollständigkeit.

Für die Realisierung dieses Moduls wird eine Verknüpfung der Anlagen von unterschiedlichen Anlagengattungen vorausgesetzt. Eine solche Verknüpfung existiert bei der SOB noch nicht. Daher sollte zunächst diese Verknüpfung hergestellt werden, bevor dieses Modul programmiert werden kann.

7.2.1.3 Modul 3

Das dritte Modul stellt das in dieser Arbeit entwickelte TDBI dar, welches im Kapitel 4 beschrieben ist.

7.2.1.4 Modul 4

Im vierten Modul ermittelt das TDBI das vorhandene und das bereits verbrauchte Budget der Leistungsvereinbarung. Es prüft anschliessend, ob eine Bündelung von Projekten innerhalb des verfügbaren Budgets realisierbar ist oder nicht. Gegebenenfalls muss eine grosse Bündelung von Projekten zeitlich verschoben werden, um das Budget entsprechend einzuplanen. Bei einer Verschiebung des Realisierungszeitpunkts muss das TDBI wiederum die Synchronisierung der Anlagenlebenszyklen im Modul 3 überprüfen.

7.2.1.5 Modul 5

Das TDBI überprüft, wie sich die Dauer des Baus mit einer Bündelung von Investitionsprojekten verändert. Insbesondere wird untersucht, ob die beiden Projekte Streckensperrungen zur Folge hätten und ob die Sperrungen ausgenutzt werden könnten. Eine Bündelung soll nur durchgeführt werden, wenn eine totale Streckensperrung nicht länger als fünf Wochen andauert.

7.2.1.6 Modul 6

Im sechsten Modul werden überregionale Betriebseinschränkungen ermittelt. Für dieses Modul überprüft das TDBI die Investitionspläne der eigenen sowie der Nachbar-ISB nach Projekten mit einer totalen Streckensperrung. Sind Sperrungen vorhanden, könnte das TDBI in einem nächsten Schritt die Bündelung von Ausgangs- und Clusterprojekt mit dem bestehenden überregionalen Projekt anhand der Leitfragen im Vorgehensschema prüfen.

7.2.1.7 Modul 7

Das TDBI schätzt in diesem Modul anhand der geografischen Lage der Projekte und der durchzuführenden Massnahmen ab, ob für eine Bündelung genügend Platz für die zu bewältigenden logistischen Herausforderungen verfügbar ist oder nicht.

7.2.1.8 Module 8 und 9

In diesen beiden Modulen überprüft das TDBI die Verfügbarkeiten von menschlichen und materiellen Ressourcen. Für dieses Modul müsste das TDBI auf die internen Arbeitspläne des Fachpersonals sowie auf die Verfügbarkeiten von Menschen und Maschinen bei externen Unternehmen zugreifen können.

Zu dem letzten Teilbereich des Vorgehensschemas *grössere Präsenz in der Öffentlichkeit* werden keine konkreten Abklärungen gemacht, weshalb dieser Teilbereich für das TDBI kein separates Modul erfordern würde.

7.2.2 Allgemeine Weiterentwicklungen des TDBI

7.2.2.1 Berücksichtigung der Anlagenzustände

Für die Bündelung von Investitionsprojekten wird in der Praxis nebst der theoretischen Erreichung der Nutzungsdauer auch der Zustand einer Anlage berücksichtigt und anhand des Zustands eine Prognose erstellt, wann die Anlage instandgesetzt werden muss. Als Weiterentwicklung des TDBI könnten die Anlagenzustände berücksichtigt werden und anhand der Zustände eine Prognose für den spätestmöglichen Zeitpunkt einer Instandsetzung durch das TDBI berechnet werden. Eine Berücksichtigung der Anlagenzustände bedingt eine sorgfältige Erfassung und Pflege der Zustandsdaten der Anlagen. Zusätzlich müsste eine «Abnutzungskurve» für jeden Anlagentyp erstellt werden, mit der das TDBI die Prognose berechnen könnte.

7.2.2.2 Überprüfung von Bündelungen zwischen mehr als zwei Projekten

Das TDBI wurde in dieser Arbeit darauf ausgelegt, dass durch die anwendende ISB die Bündelung zweier einzelnen Investitionsprojekte überprüft werden kann. Im Rahmen einer Weiterentwicklung des TDBI würde sich anbieten, wenn das Tool zusätzlich die Bündelung eines Projekts mit einem bestehenden Projektcluster oder die Bündelung von zwei Projektclustern zusammen überprüfen könnte. Dafür muss das TDBI mehr Inputs aufnehmen können.

7.2.2.3 Bündelungen von Investitionsprojekten und Unterhaltsmassnahmen

Das TDBI überprüft die Bündelung von Investitionsprojekten. Dabei geht es um die Synergienutzung zweier Erneuerungs- oder Instandsetzungsprojekten. Es ist aber durchaus möglich, dass zwischen den Massnahmen für eine Instandsetzung und für einen Unterhalt Synergien genutzt werden können, indem ähnliche oder dieselben Materialien, Arbeitsgeräte und Fachkräfte eingesetzt werden. Abgesehen davon werden die negativen Auswirkungen der Synchronisierung von Anlagenlebenszyklen bei einer Instandsetzung mit einem gezielten Unterhalt verkleinert, da die Lebensdauer von Anlagen mit Unterhaltsarbeiten situativ verlängert wird. Daher ist eine abgestimmte Planung von Investitionsprojekten und Unterhaltsmassnahmen für eine ISB sehr wertvoll. Das TDBI könnte dahingehend weiterentwickelt werden, indem es nicht nur die Investitionsdaten, sondern zusätzlich auch die Unterhaltsdaten berücksichtigt.

7.3 Datenstruktur zur Steigerung der Intelligenz des TDBI

Wie bereits erwähnt, ist eine saubere Erfassung und Pflege der Daten elementar für korrekte Resultate des TDBI. Mit Verknüpfungen der Investitionsdaten mit den Anlagendaten sowie der Investitionsplanung mit der Unterhaltsplanung könnte die SOB die Entwicklung eines intelligenteren TDBI ermöglichen. Diese Verknüpfungen gäben dem TDBI die Möglichkeit, festzustellen, zu welchem Zeitpunkt eine Anlage das letzte Mal unterhalten oder instandgesetzt wurde und welche Massnahmen ergriffen wurden. Zusammen mit den aktuell gehaltenen Zustandsdaten könnte das TDBI genau berechnen, zu welchem Zeitpunkt weitere Unterhalts- oder Instandsetzungsarbeiten getätigt werden müssen.

Abgesehen davon wäre eine digitale Abbildung der physischen Verknüpfung zwischen den einzelnen Anlagen ein wichtiger Schritt für die Zukunft, da mit dieser Verknüpfung die Rahmenbedingungen zum Unterhalt eines ganzen Systems digitalisiert festgelegt werden könnten. Die SOB arbeitet momentan daran, die Anlagendaten einheitlich zu führen und doch auf die individuellen Merkmale der verschiedenen Anlagen einzugehen. Mit diesen Schritten wird die Basis geschaffen, damit die erwähnten technologie- und nachhaltigkeitsfördernden Datenverknüpfungen in naher Zukunft hergestellt und so intelligente Tools zur Unterstützung in der Investitions- und Unterhaltsplanung entwickelt werden können.

8 Verzeichnisse

8.1 Quellenverzeichnis

- [1] Bundesamt für Verkehr BAV, «BAV Substanzerhalt der Bahninfrastruktur,» Bundesamt für Verkehr BAV, [Online]. Available: <https://www.bav.admin.ch/bav/de/home/verkehrsmittel/eisenbahn/bahninfrastruktur/substanz-erhalt-und-betrieb.html>. [Zugriff am 4 Mai 2024].
- [2] Verband öffentlicher Verkehr VöV, «RTE 29900,» VöV, Bern, 2018.
- [3] Bundesamt für Verkehr, «BAV NEAT,» BAV, [Online]. Available: <https://www.bav.admin.ch/bav/de/home/verkehrsmittel/eisenbahn/bahninfrastruktur/ausbauprogramme/abgeschlossene-ausbauprogramme/neat.html>. [Zugriff am 6 Mai 2024].
- [4] Bundesamt für Verkehr BAV, «BAV Bahn 2000,» BAV, [Online]. Available: <https://www.bav.admin.ch/bav/de/home/verkehrsmittel/eisenbahn/bahninfrastruktur/ausbauprogramme/abgeschlossene-ausbauprogramme/bahn-2000.html>. [Zugriff am 6 Mai 2024].
- [5] Bundesamt für Verkehr BAV, «BAV Ausbauprogramme der Bahninfrastruktur,» BAV, [Online]. Available: <https://www.bav.admin.ch/bav/de/home/verkehrsmittel/eisenbahn/bahninfrastruktur/ausbauprogramme.html>. [Zugriff am 6 Mai 2024].
- [6] Eidgenössische Finanzverwaltung EFV, «EFV Ausgaben nach Aufgabengebieten 2023,» EFV, 25 März 2024. [Online]. Available: https://www.efv.admin.ch/efv/de/home/finanzberichterstattung/bundeshaushalt_ueb/ausgaben.html. [Zugriff am 6 Mai 2024].
- [7] W. Stölzle, U. Weidmann, T. Klaas-Wissing, J. Kupferschmid und B. Riegel, «Vision Mobilität Schweiz 2050,» ETH Zürich, Zürich, 2015.
- [8] L. Andina, «Systematisches Clustering von Investitionsprojekten der Bahninfrastruktur,» ZHAW School of Engineering Institut für Datenanalyse und Prozessdesign, Winterthur, 2023.
- [9] U. Weidmann, «Bahninfrastrukturen; Planen - Entwerfen - Realisieren - Erhalten,» vdf Hochschulverlag AG, Zollikon, 2020.
- [10] R. von Planta, «Clustering von Infrastrukturerneuerungen und -instandhaltungen,» SOB Schweizerische Südostbahn AG, Samstagern, 2015.
- [11] M. Burkhalter, A novel methodology to optimise intervention programs for railway infrastructure networks in a digital environment, Zürich: ETH Zürich, 2021.
- [12] Schweizerische Südostbahn AG, «SOBdirekt,» Schweizerische Südostbahn AG, 4 Juli 2023. [Online]. Available: <https://direkt.sob.ch/themen/bahnwissen/bus-statt-zug-im-sommer-wird-zwischen-rapperswil-uznach-und-biberbrugg-arth-goldau-gebaut>. [Zugriff am 28 Mai 2024].
- [13] P. Veit, «Instandhaltung und Anlagenmanagement des Fahrwegs,» in *Handbuch Eisenbahninfrastruktur*, Berlin Heidelberg, Springer-Verlag, 2013, pp. 1009-1054.
- [14] R. Staubli, J. Dreyer und J. Hofschreuder, «Erhaltungsmanagement der Strassen - Erarbeiten der Grundlagen und Schadenkataloge zur systematischen Zustandserhebung und -bewertung von zusätzlichen Objekten der Strassen,» Bundesamt für Strassen ASTRA, Bern, 2014.
- [15] Electrosuisse, *SN EN 50126-1: Bahnanwendung - Spezifikation und Nachweis von Zuverlässigkeit, Verfügbarkeit, Instandhaltbarkeit und Sicherheit (RAMS) - Teil 1: Generischer RAMS Prozess*, Fehraltorf, 2017.
- [16] D. Angermeier, C. Bartelt, O. Bauer, G. Beneken, K. Bergner, U. Birowicz, T. Bliss, C. Breitenstrim, N. Cordes, D. Cruz, P. Dohrmann, J. Friedrich, M. Gnatz, U. Hammerschall, I. Hidvergi-Barstorfer, H. Hummel, D. Israel, T. Klingenberger, K. Klugseder, I. Küffer, M. Kuhrmann, M. Kranz, W. Kranz, H.-J. Meinhardt, M. Meisinger, S. Mittracht, H.-J. Neusser, D. Niebuhr, K. Plögert, D. Rauh, A. Rausch, T. Rittel, W. Rösch, E. Saas, J. Schramm, M. Sihling,

- T. Ternité, S. Vogel, B. Weber und M. Wittmann, V-Modell XT - Das deutsche Referenzmodell für Systementwicklungsprojekte, München: Verein zur Weiterentwicklung des V-Modell XT e.V., 2006.
- [17] D. Angermeier, C. Bartelt, O. Bauer, G. Beneken, K. Bergner, U. Birowicz, T. Bliss, C. Breitenstrim, N. Cordes, D. Cruz, P. Dohrmann, J. Friedrich, M. Gnatz, U. Hammerschall und Hidvergi-Bars, «Grundkonzepte,» in *V-Modell XT - Das deutsche Referenzmodell für Systementwicklungsprojekte*, München, Verein zur Weiterentwicklung des V-Modell XT e.V., 2006, p. 15.
- [18] R. Wagner, Interviewee, *Interview zur Ermittlung realitätsnaher Parametereinstellungen für Kunstbauten*. [Interview]. 22 Mai 2024.
- [19] Schweizerische Südostbahn AG, «Netzzustand 2021 - 2024 JB 2023.xlsx,» SOB, St. Gallen, 2023.
- [20] J. Wipf, Interviewee, *Interview zur Ermittlung realitätsnaher Parametereinstellungen für Fahrplananlagen*. [Interview]. 16 Mai 2024.
- [21] Schweizerische Südostbahn AG, «Datenbank Oberbau.xlsx,» SOB, St. Gallen, 2024.
- [22] A. Rechsteiner, Interviewee, *Interview zur Ermittlung realitätsnaher Parametereinstellungen für Bahnstromanlagen*. [Interview]. 8 Mai 2024.
- [23] R. Hösli, Interviewee, *Interview zur Ermittlung realitätsnaher Parametereinstellungen für Sicherungsanlagen und Niederspannung & Telekom*. [Interview]. 14 Mai 2024.
- [24] L. Stauffacher, Interviewee, *Interview zur Bewertung des Synergieeffekts bei der Ausnutzung von Streckensperrungen und Substanzerhaltungsmassnahmen*. [Interview]. 27 Mai 2024.
- [25] Schweizerische Südostbahn AG, «Standardelemente Weichen Ausgabe 2021.xlsx,» SOB, St. Gallen, 2021.
- [26] Schweizerische Südostbahn AG, «SOB,» Schweizerische Südostbahn AG, [Online]. Available: <https://www.sob.ch/die-sob/baustellen-und-unterhalt/baustellen/cluster-ost-2024/instandsetzung-muehleuehltunnel-herisau>. [Zugriff am 29 Mai 2024].
- [27] L. Stauffacher, Interviewee, *Interview 2 mit Linus Stauffacher zum Thema Clustering*. [Interview]. 7 Dezember 2023.

8.2 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Veranschaulichung der zwei Varianten von Bündelung von Investitionsprojekten. Liegen zwei Projekte zeitlich nahe beieinander, ist gegebenenfalls Potenzial für eine zeitliche Bündelung vorhanden. Liegen zwei Projekte räumlich nahe beieinander und benötigen sie ähnliche oder dieselben Massnahmen, ist gegebenenfalls Potenzial für eine räumliche Bündelung vorhanden. Liegen zwei Projekte weder zeitlich noch räumlich beieinander und unterscheiden sich die auszuführenden Arbeiten, kommt keine Bündelung zustande.

Abbildung 2: Beispiel von vorzeitiger und nachzeitiger Erneuerung von Anlagen. Diese Effekte können bei der Synchronisierung der Anlagenlebenszyklen für eine Bündelung von Investitionsprojekten auftauchen.

Abbildung 3: Darstellung der drei Szenarien zu der Veränderung der Baudauer bei einer Bündelung von Investitionsprojekten gegenüber der Einzelausführung des zu initialisierenden Projekts.

Abbildung 4: Das in der Projektarbeit "Systematisches Clustering von Investitionsprojekten der Bahninfrastruktur" entwickelte Vorgehensschema. In den grau umrandeten Texten sind die für eine Entscheidung über die Bündelung von Investitionsprojekten relevanten Faktoren beschrieben [8].

Abbildung 5: Einordnung des TDBI in das im Rahmen der Projektarbeit entwickelte Vorgehensschema. Das in dieser Arbeit zu entwickelnde TDBI wird im rot markierten Bereich tätig sein.

Abbildung 6: Beispielhaftes Vorgehen, wenn im Investitionsplan mehrere mögliche Clusterprojekte existieren [8].

Abbildung 7: Darstellung eines beispielhaften Resultats der Synchronisierung von Anlagenlebenszyklen. Das Beispiel wurde anhand der Anlagengattung Fahrbahn erstellt [9].

Abbildung 8: Entscheidungspunkte des V-Modell Entwicklungsprozesses. Die rot markierten Entscheidungspunkte sind diejenigen, die für die Entwicklung des TDBI in dieser Arbeit angewendet werden [12].

Abbildung 9: Systementwurf des TDBI. Im Systementwurf ist festgelegt, mit welchen Inputs das Tool Outputs generieren soll, die den definierten Anforderungen entsprechen.

Abbildung 10: Eingabefenster für die Eingabe der Projektnummer des Ausgangsprojekts (Schritt 1 in der Anwendung des TDBI).

Abbildung 11: Auswahlfenster für die Auswahl der durch das Ausgangsprojekt betroffenen Anlagen (Schritt 2 in der Anwendung des TDBI).

Abbildung 12: Eingabefenster für die Eingabe der Projektnummer des Clusterprojekts (Schritt 3 in der Anwendung des TDBI).

Abbildung 13: Auswahlfenster für die Auswahl der durch das Clusterprojekt betroffenen Anlagen (Schritt 4 in der Anwendung des TDBI).

Abbildung 14: Darstellung des ersten durch das TDBI generierten Outputs. Der erste Output fasst Informationen zu den beiden ausgewählten Projekten sowie zu den durch die Projekte betroffenen Anlagen zusammen. Im oberen linken Bereich sind die Informationen zum Ausgangsprojekt angegeben und in der Tabelle unterhalb die durch das Ausgangsprojekt betroffenen Anlagen. Auf der rechten Seite sind im oberen Bereich die Informationen zum Clusterprojekt dargestellt und in der Tabelle unterhalb die durch das Clusterprojekt betroffenen Anlagen.

Abbildung 15: Darstellung des zweiten durch das TDBI generierten Outputs. Der zweite Output stellt die beiden Projekte auf einem Zeitstrahl dar und gibt Auskunft darüber, ob bei einer Bündelung der Projekte zu den Zeitpunkten A und C vorzeitige oder nachzeitige Erneuerungen stattfinden würden.

Abbildung 16: Darstellung des dritten durch das TDBI generierten Outputs. Der dritte Output zeigt die negativen sowie positiven Auswirkungen einer Bündelung quantitativ auf. Schliesslich gibt das TDBI im dritten Output eine Empfehlung über eine Bündelung der Projekte ab.

Abbildung 17: Markierung der Relevante Spalten des Investitionsplans.

Abbildung 18: Auszug auf der "Datenbank SA & TN".

Abbildung 19: Beispielhafte Darstellung dazu, wie das TDBI die von einem Projekt betroffenen Anlagen ermittelt. Zu den betroffenen Anlagengattungen werden alle innerhalb des Projektperimeters liegenden Anlagen selektiert. Diese stellen die möglichen betroffenen Anlagen dar.

Abbildung 20: Programmierte Fehlermeldungen bei der Eingabe der Projektnummer.

Abbildung 21: Berechnungsbeispiel für die Ermittlung, ob eine Anlage zu den Zeitpunkten A und C das Ende ihrer Nutzungsdauer erreicht haben wird oder nicht. Die Erreichung der Nutzungsdauer wird in Prozent der Nutzungsdauer angegeben (Spalten E und G). In der Zeile 2 sind die Formeln für die Berechnung angezeigt und in der Zeile 3 sind die Resultate angezeigt.

Abbildung 22: Festlegung der Parameter für die Ermittlung der Auswirkungen von nachzeitigen Erneuerungen im Python-Code des TDBI.

Abbildung 23: Alle möglichen Empfehlungen, die das TDBI situativ abgibt.

Abbildung 24: Übersicht über den Projektcluster Ost 2024 der SOB. Ausschnitt aus der Region Lichtensteig [16].

Abbildung 25: Übersicht über die gebündelten Projekte P.601629 und P.601963. (Quelle: SOB-interner Projektantrag)

Abbildung 26: Übersicht über die Erneuerung des Doppelspurabschnitts zwischen Samstagern und Schindellegi. Die Erneuerung der Fahrbahn und somit auch das Projekt zum Ersatz der USV wurden zusätzlich mit dem Projekt des Doppelspurausbau zwischen Schindellegi und Biberbrugg gebündelt. (Quelle: SOB-interner Projektantrag)

Abbildung 27: Beispiel, wie sich die Mehrkosten einer Bündelung von zwei Investitionsprojekten erhöhen, je länger auseinander die beiden Projekte zeitlich liegen. So muss sich auch der Mindest-Synergieeffekt erhöhen, damit sich eine Bündelung lohnt.

Abbildung 28: Ermittelte Datenvollständigkeit aller Investitions- und Anlagendaten. Die Vollständigkeit der relevanten Spalten wurde in der Haupt- und in den Hilfslisten ausgerechnet und daraus der Durchschnitt berechnet.

8.3 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Ermittlung der regulären Unterhaltskosten (Parameter C) und des jährlichen Erhöhungssatzes der Unterhaltskosten (Parameter r) bei der Anlagengattung Kunstbauten.

Tabelle 2: Ermittlung der regulären Unterhaltskosten (Parameter C) und des jährlichen Erhöhungssatzes der Unterhaltskosten (Parameter r) bei der Anlagengattung Fahrbahnanlagen.

Tabelle 3: Ermittlung der regulären Unterhaltskosten (Parameter C) und des jährlichen Erhöhungssatzes der Unterhaltskosten (Parameter r) bei der Anlagengattung Bahnstromanlagen.

Tabelle 4: Ermittlung der regulären Unterhaltskosten (Parameter C) und des jährlichen Erhöhungssatzes der Unterhaltskosten (Parameter r) bei den Anlagengattungen Sicherungsanlagen und Niederspannung & Telekom.

Tabelle 5: Ermittlung der regulären Unterhaltskosten (Parameter C) und des jährlichen Erhöhungssatzes der Unterhaltskosten (Parameter r) bei der Anlagengattung Publikumsanlagen.

Tabelle 6: Bewertungstabelle für die Bewertung der Synergiepotenziale der Kombinationsmöglichkeiten von Streckensperrungen. Je höher der Score (maximal möglicher Score = 2), desto höher ist das Synergiepotenzial einer Kombination.

Tabelle 7: Bewertungstabelle für die Bewertung der Synergiepotenziale der Kombinationsmöglichkeiten von Massnahmen. Je höher der Score (maximal möglicher Score = 3), desto höher ist das Synergiepotenzial einer Kombination.

Tabelle 8: Tabelle zur Ermittlung des Synergieeffekts. Die beiden Scores aus der Kombination der Streckensperrungen sowie aus der Kombination der Massnahmen werden addiert. Der resultierende Gesamt-Score wird anschliessend für die Berechnung des Synergieeffekts quadriert.

Tabelle 9: Kombinationen der im Rahmen des Integrationstests getesteten Investitionsprojekte. Sechs Projekte mit unterschiedlichen Merkmalen wurden in verschiedenen Kombinationen getestet.

9 Anhang

A. Ordner «Tool»

- a) **TDBI.py**
- b) **Ordner «Hauptliste»**
 - Investitionsplan_Export.xlsx
- c) **Ordner «Hilfslisten»**
 - Datenbank Fahrstrom.xlsx
 - Datenbank Kunstbauten.xlsx
 - Datenbank Oberbau.xlsx
 - Datenbank Publikumsanlagen.xlsx
 - Datenbank SA & TN.xlsx
 - Investitionsdaten SAP.xlsx
 - Synergieeffekt.xlsx
 - Technische Plätze.xlsx
 - Transformation Standort.xlsx

B. Ordner «Quellen»

- Clustering von Infrastrukturerneuerungen und -instandhaltungen.pdf
- Erhaltungsmanagement der Strassen.pdf
- Handbuch Eisenbahninfrastruktur.pdf
- Interviews mit Experten im Rahmen der Bachelorarbeit.pdf
- Netzzustand 2021 - 2024 JB 2023.xlsx
- Standardelemente Weichen Ausgabe 2021.xlsx
- Vision Mobilität Schweiz 2050.pdf

C. Dokumentation der Validierung des TDBI.pdf

D. Nutzungsanleitung für das TDBI.pdf

E. Bewertungssystem des Synergieeffekts.xlsx