



GreenInfraTwins

Adaptive digitale Zwillinge für Nachhaltigkeitsbewertungen im Infrastrukturbau

Ein Projekt finanziert im Rahmen der

D-A-CH-Kooperation

Verkehrsinfrastrukturforschung 2023

D-A-CH 2023



Januar 2026

Impressum

Programmerstellung und -finanzierung der D-A-CH-Kooperation:

Bundesministerium für Verkehr (BMV)

Invalidenstraße 44

10115 Berlin

Deutschland



Bundesministerium
für Verkehr

Bundesministerium für Innovation, Mobilität und
Infrastruktur (BMIMI)

Radetzkystraße 2

1030 Wien

Österreich



Bundesministerium
Innovation, Mobilität
und Infrastruktur

Bundesamt für Strassen (ASTRA)

Papiermühlestrasse 13

3063 Ittigen

Schweiz



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Bundesamt für Strassen ASTRA

Programmmanagement:

Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft mbH

Sensengasse 1

1090 Wien

Österreich



FFG
Forschung wirkt.

Für den Projektinhalt verantwortlich:

GreenInfraTwins Konsortium

Projektleitung:

Ruhr-Universität Bochum

Lehrstuhl für Informatik im Bauwesen

Universitätsstraße 150

DE-44801 Bochum



GreenInfraTwins

Adaptive digitale Zwillinge für Nachhaltigkeitsbewertungen im Infrastrukturbau

D-A-CH 2023

Auftragnehmer

Lehrstuhl für Informatik im Bauwesen, Ruhr-Universität Bochum, DE

Infrastructure Management Consultants, Zürich, CH

Hochtief Engineering ViCon, Essen, DE

Institut für Konstruktiven Ingenieurbau, Universität für Bodenkultur Wien, AT

Lombardi AG, Bellinzona-Giubiasco, CH

Autorinnen und Autoren

Prof. Dr. Markus König, Dr. Philipp Hagedorn, Simon Kosse, Liu Liu,

Prof. Dr. Rade Hajdin, Dr. Tim Blumenfeld, Dr. Nikola Tanasic, Dr. Frank Schiffmann,
Dr. Holger Diederich

Dr. Tim Zinke, Jessica Steinjan

Prof. Dr. Alfred Strauß

Christian Schlatter

Die in diesem Bericht verwendeten Personenbezeichnungen beziehen sich immer gleichermaßen auf weibliche und männliche Personen. Auf eine Doppelnennung und gegenderte Bezeichnungen wird zugunsten einer besseren Lesbarkeit verzichtet.

INHALTSVERZEICHNIS

Impressum.....	2
Kurzfassung	6
Abstract	7
Abkürzungsverzeichnis	8
1 Einleitung	10
2 Grundlagen.....	13
2.1 Das Konzept der digitalen Zwillinge	13
2.2 Anwendung digitaler Zwillinge im Ingenieur- und Infrastrukturbau	23
2.3 Nachhaltigkeitsbewertung für Ingenieurbauwerke.....	37
3 Anforderungen und Anwendungsfälle	65
3.1 Methodisches Vorgehen	65
3.2 Ausformulierung der Anwendungsfälle	70
3.3 Anwendungsfallsteckbriefe	71
3.4 Weiteres Vorgehen auf Basis der Anforderungsdefinition	76
4 Konzept zur Nachhaltigkeitsbewertung	77
4.1 Bestimmung und Berechnung der Nachhaltigkeitsindikatoren	79
4.2 Unterstützung der Entscheidungsprozesse.....	89
4.3 Integration in die digitalen Zwillinge	99
4.4 Zusammenfassung	102
5 Spezifikation der digitalen Zwillinge.....	105
5.1 Definition der Informationsaustauschprozesse.....	106
5.2 Ausarbeitung der Informationsbedarfe	108
5.3 Spezifikation der Systemarchitektur	111
5.4 Funktionale Anforderungen an die Demonstratoren.....	114
5.5 Zusammenfassung	116

6	Implementierung der digitalen Zwillinge	118
6.1	Datenmodell	118
6.2	Basiskomponenten und Schnittstellen	120
6.3	Zusammenfassung	125
7	Auswahl der Demonstratoren	126
7.1	Systemgrenzen.....	126
7.2	Deutschland: Standard-Plattenbalkenbrücke der ViA6.....	127
7.3	Schweiz: Überführungsbauwerk entlang des Berner Ostrings	128
7.4	Österreich: Seitenhafenbrücke (Wien) – Plattenbalkenkonstruktion.....	129
7.5	Ergebnis der Demonstratoren.....	131
7.6	Ergebnis der Evaluation.....	140
8	Schlussbetrachtung.....	146
8.1	Zusammenfassung	146
8.2	Wesentliche Erkenntnisse	147
8.3	Ausblick und Handlungsempfehlungen.....	148
9	Anhang	151
9.1	Steckbriefe der Indikatoren.....	152
9.2	Informationsbedarf der Demonstratoren	180
9.3	Details zum Demonstrator Deutschland.....	195
9.4	Details zum Demonstrator Schweiz	202
9.5	Details zum Demonstrator Österreich	213
	Abbildungsverzeichnis.....	221
	Tabellenverzeichnis.....	225
	Literaturverzeichnis.....	226

Kurzfassung

Nachhaltigkeitsanalysen im Ingenieurbau sind entscheidend für die Reduzierung von Treibhausgasemissionen und Ressourcenverbrauch. Digitale Zwillinge können die Nachverfolgung von Umweltauswirkungen über den gesamten Lebenszyklus von Bauwerken unterstützen, nachhaltige Lösungen identifizieren und die Verringerung der Umweltauswirkungen der Bauindustrie fördern. Das GreenInfraTwins-Projekt entwickelt Methoden für effiziente Nachhaltigkeitsanalysen im Ingenieurbau in den DACH-Ländern. Hierzu wurden konzeptionelle, methodische und technische Grundlagen erarbeitet, um Nachhaltigkeitsbewertungen systematisch in digitale Zwillinge von Ingenieurbauwerken zu integrieren. Zentrale Ergebnisse sind ein strukturierter Indikatorensatz für ökologische, ökonomische und soziale Nachhaltigkeitsdimensionen, klar definierte Anwendungsfälle entlang des Lebenszyklus sowie ein interoperables Architektur- und Datenkonzept für den Einsatz digitaler Zwillinge im Bestand. Die Arbeiten zeigen, dass digitale Zwillinge insbesondere in der Betriebs- und Erhaltungsphase ein hohes Potenzial haben, um nachhaltigkeitsrelevante Entscheidungsprozesse datenbasiert zu unterstützen und die Auswirkungen von Handlungsalternativen über den Lebenszyklus nachvollziehbar darzustellen. Gleichzeitig wird deutlich, dass die Aussagekraft von Nachhaltigkeitsbewertungen stark von der Datenverfügbarkeit und -qualität bestehender Bestandsdaten abhängt. Anhand ausgewählter Demonstratoren in Deutschland, Österreich und der Schweiz wurde die praktische Umsetzbarkeit der entwickelten Konzepte überprüft. Dabei bestätigte sich, dass digitale Zwillinge nicht per se zu nachhaltigen Lösungen führen, sondern als Entscheidungsunterstützung wirken, deren Nutzen weniger von der eingesetzten Technologie als vielmehr von klar definierten Entscheidungsprozessen und einer ausreichenden Datenbasis abhängt.

Abstract

Sustainability assessments in civil engineering are essential for reducing greenhouse gas emissions and resource consumption. Digital twins can support the monitoring of environmental impacts throughout the life cycles of infrastructure assets, help identify sustainable solutions, and contribute to reducing the environmental footprint of the construction industry. The GreenInfraTwins project develops methods for efficient sustainability assessments in civil engineering in the DACH countries. To this end, conceptual, methodological, and technical foundations have been developed to systematically integrate sustainability assessments into digital twins of civil infrastructure assets. Key results include a structured set of indicators covering environmental, economic, and social sustainability dimensions, clearly defined use cases across the life cycle, and an interoperable architecture and data concept for the application of digital twins in existing infrastructure. The results show that digital twins have significant potential, particularly in the operation and maintenance phase, to support sustainability-related decision-making in a data-driven manner and to transparently assess the impacts of alternative actions over the life cycle. At the same time, it becomes clear that the reliability of sustainability assessments strongly depends on the availability and quality of existing asset data. The practical feasibility of the developed concepts was examined using selected demonstrators in Germany, Austria, and Switzerland. This confirmed that digital twins do not inherently lead to sustainable solutions but rather serve as decision-support tools whose benefits depend less on the technology itself than on clearly defined decision-making processes and an adequate data basis.

Abkürzungsverzeichnis

AM	Asset Management
BAP	BIM-Abwicklungsplan
BIM	Building Information Modeling
CPS	Cyber-Physisches System
CSR	Corporate Sustainability Reporting
CSRD	Corporate Sustainability Reporting Directive
DACH	Deutschland Austria Confoederatio Helvetica (Deutschland, Österreich, Schweiz)
DZ	Digitale Zwillinge
EEG	Erneuerbare-Energien-Gesetz
EnEfG	Energieeffizienzgesetz
EPD	Environmental Product Declaration
EPBD	Energy Performance of Buildings Directive
ESR	European Sustainability Reporting Standards
GEG	Gebäudeenergiegesetz
I4.0	Industrie 4.0
IFC	Industry Foundation Classes
KI	Künstliche Intelligenz
KPI	Key Performance Indicator
NRW	Nordrhein-Westfalen
SHM	Structural Health Monitoring
SDG	Sustainable Development Goals
SIB	Straßeninformationsbank
WPG	Wärmeplanungsgesetz
ZfP	zerstörungsfreie/-arme Prüfmethode

1 Einleitung

Nachhaltigkeitsanalysen im Ingenieurbau gewinnen zunehmend an Bedeutung, da die Bauindustrie erheblich zu Treibhausgasemissionen und zum Verbrauch natürlicher Ressourcen beiträgt und Infrastrukturmaßnahmen verstärkt auch unter Nachhaltigkeitsgesichtspunkten bewertet werden müssen. Insbesondere die öffentliche Hand steht vor der Herausforderung, Entscheidungen nicht mehr ausschließlich auf Grundlage technischer und wirtschaftlicher Kriterien zu treffen, sondern auch ökologische und weitere Nachhaltigkeitswirkungen systematisch zu berücksichtigen. Digitale Zwillinge (DZ) erleichtern die Nachverfolgung und Quantifizierung von Umweltauswirkungen über den gesamten Lebenszyklus von Bauwerken, von der Bauphase bis zur Abbruch- und Recyclingphase. Sie tragen zur nachhaltigen Entwicklung bei, indem sie notwendige Erhaltungsmaßnahmen vorhersagen, nachhaltige Optionen für Erhaltungsmaßnahmen bewerten und die Lebensdauer von Bauwerken verlängern, mit dem Ziel, den Bedarf an neuen Baumaterialien zu reduzieren und Treibhausgasemissionen zu senken. Durch die Simulation von Maßnahmenvarianten ermöglichen DZ die Identifikation nachhaltigerer Lösungen, ohne physische Modelle erstellen zu müssen. Entlang des Lebenszyklus von Ingenieurbauwerken entstehen umfangreiche Daten aus Planung, Bau und Betrieb, die bislang jedoch nur eingeschränkt für übergreifende Nachhaltigkeitsbewertungen genutzt werden. Dieses vorhandene Datenpotenzial bietet eine wesentliche Grundlage, um DZ für lebenszyklusorientierte Nachhaltigkeitsanalysen nutzbar zu machen. Trotz dieses Potenzials fehlen bislang konkrete und praxistaugliche Umsetzungen zur Nachhaltigkeitsbewertung. Das Projekt GreenInfraTwins setzt hier an und entwickelt Ansätze, um Nachhaltigkeitsanalysen im Ingenieurbau durch DZ zu verbessern, wobei ausgewählte Indikatoren für den Betrieb und den Rückbau in den DACH-Ländern angewendet werden.

Auf dieser Grundlage zielte das Projekt darauf ab, eine nachhaltigkeitsbezogene Entscheidungsunterstützung durch den Einsatz DZ im Ingenieurbau zu entwickeln und diese anhand realitätsnaher Anwendungsbeispiele zu untersuchen. Im Mittelpunkt steht dabei die Frage, wie Informationen aus DZ so genutzt und aufbereitet werden können, dass Nachhaltigkeitsanalysen systematisch durchgeführt und in Entscheidungsprozesse für Betrieb, Erhaltung und Rückbau integriert werden. Der vorliegende Schlussbericht fasst die wesentlichen Ergebnisse des Projekts GreenInfraTwins zusammen. Zur Beantwortung dieser Fragestellung wurde ein methodischer Ansatz verfolgt, der Nachhaltigkeitsindikatoren, konkrete Anwendungsfälle und DZ konsistent miteinander verknüpft. Eine Übersicht über das methodische Vorgehen im Projekt ist in Abbildung 1-1 dargestellt.

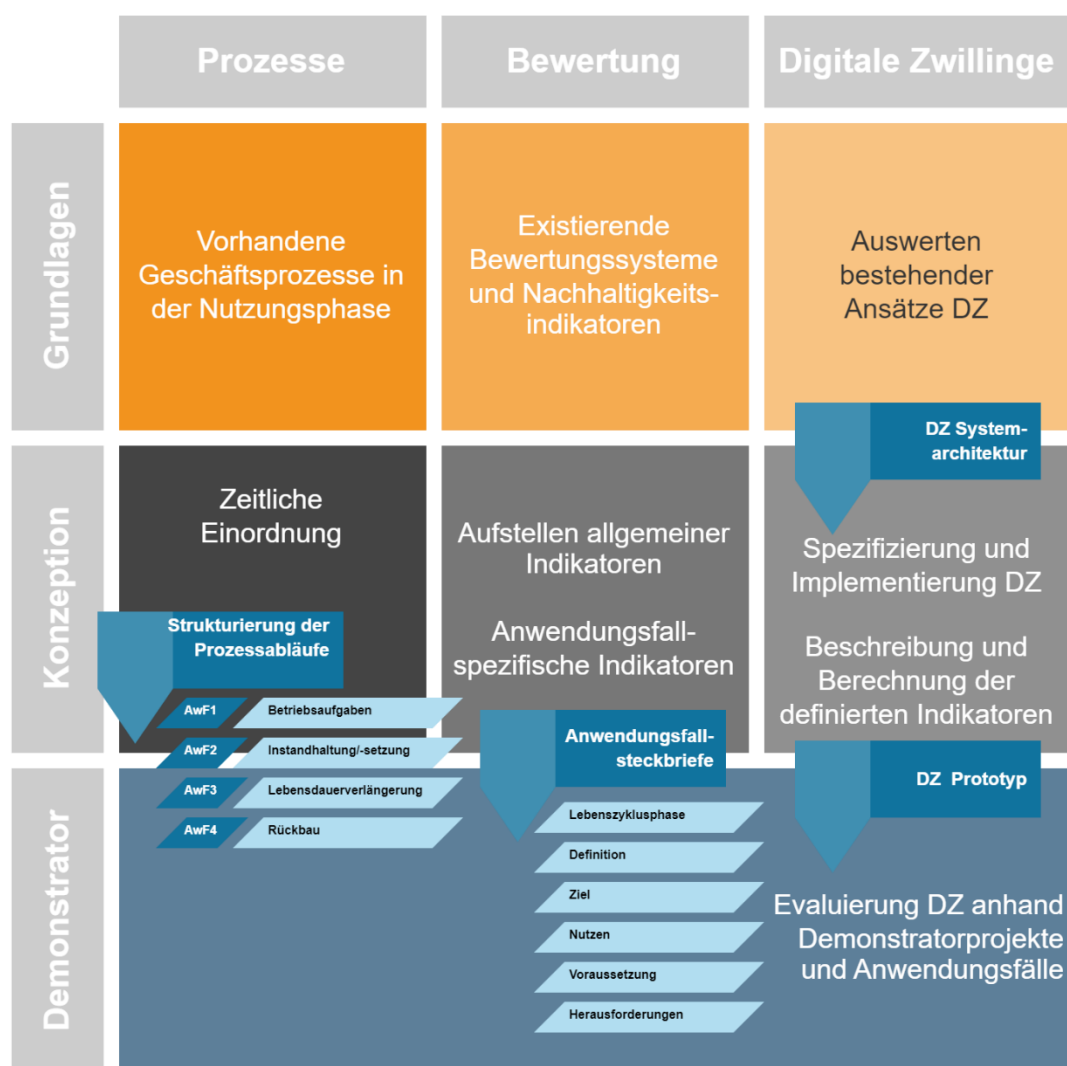


Abbildung 1-1. Methodisches Vorgehen bei der Projektbearbeitung

Aufbauend auf dem identifizierten Forschungs- und Handlungsbedarf werden im Projekt zunächst zentrale Anforderungen und Anwendungsfälle für den Einsatz von DZ zur nachhaltigkeitsbezogenen Entscheidungsunterstützung im Ingenieurbau abgeleitet. Grundlage hierfür bildet eine systematische Analyse des Stands der Technik und der Forschung, die sowohl bestehende Konzepte der DZ als auch etablierte und in Entwicklung befindliche Nachhaltigkeitsbewertungsmethoden berücksichtigt. Ziel ist es, praxisrelevante Anwendungsfälle zu identifizieren, die einen messbaren Beitrag zur Nachhaltigkeitsbewertung von Betrieb, Erhaltung und Rückbau leisten. Ein zentrales Element des Projektansatzes ist die Identifikation und Bewertung geeigneter Nachhaltigkeitsindikatoren als Grundlage für eine digital gestützte Entscheidungsunterstützung. Im Fokus stehen dabei bestehende, in Entwicklung befindliche sowie bislang fehlende Indikatoren und Bewertungsmethoden für Ingenieurbauwerke, insbesondere Brücken. Neben ökologischen Aspekten werden auch

ökonomische und soziale Nachhaltigkeitsdimensionen berücksichtigt, wobei ein besonderer Schwerpunkt auf der Kreislauffähigkeit von Materialien sowie auf der automatisierten Nutzung verfügbarer Daten aus bestehenden Datenbanken im DACH-Raum liegt.

Aufbauend auf dem aktuellen Forschungsstand wurden im Projekt konkrete Anwendungsfälle für den Einsatz von DZ zur nachhaltigkeitsbezogenen Entscheidungsunterstützung identifiziert (vgl. Abbildung 1-1). Maßgeblich ist dabei die Perspektive des Erhaltungsmanagements und deren Relevanz für die ökologischen, ökonomischen und sozialen Nachhaltigkeitsdimensionen. Die systematische Beschreibung der Anwendungsfälle bildet die Grundlage für die Ableitung geeigneter Nachhaltigkeitsindikatoren sowie für die Definition von Entscheidungsprozessen. Darauf aufbauend wird ein integriertes Gesamtkonzept zur Nachhaltigkeitsbewertung von Betrieb und Rückbau von Ingenieurbauwerken entwickelt. Aus diesem Konzept ergeben sich die Anforderungen an die Umsetzung mit DZ, insbesondere hinsichtlich der Softwarearchitektur, der Daten- und Datenaustauschprozesse sowie der benötigten Informationen und Funktionalitäten.

Die entwickelten methodischen und konzeptionellen Ansätze werden im Projekt in drei prototypischen Demonstratoren umgesetzt und anhand konkreter Anwendungsfälle erprobt. In den Demonstratoren werden Anwendungsfälle, Nachhaltigkeitsindikatoren und DZ zusammengeführt und für nachhaltigkeitsbezogene Entscheidungsprozesse im Betrieb, in der Erhaltung und im Rückbau von Ingenieurbauwerken nutzbar gemacht. Die Demonstratoren dienen als Nachweis der technischen und methodischen Umsetzbarkeit des Gesamtkonzepts und zeigen dessen Potenzial für eine praxisnahe Anwendung im Ingenieurbau.

2 Grundlagen

2.1 Das Konzept der digitalen Zwillinge

Die Grundidee der DZ stammt aus einer Initiative der University of Michigan aus dem Jahr 2002 zur Gründung eines Zentrums für Product Lifecycle Management (PLM), wobei das Konzept als die Vereinigung eines physischen und eines virtuellen Systems definiert wurde. Letzteres hält alle relevanten Informationen über das physische System bereit. Das Konzept fördert die Duplizierung von Systemen zwischen der physischen und der digitalen Welt [1]. Die National Aeronautics and Space Administration (NASA) hat diesen Ansatz als grundlegend für ihre Technologieentwicklungsstrategien für die Raumfahrt und für die Konzeption der nächsten Generation ihrer Kampfflugzeuge und Raumfahrzeuge übernommen [2]. Eine heute weit verbreitete Definition stammt von der NASA, die den DZ als integrierte multiphysikalische, multiskalige, probabilistische Simulation eines Fahrzeugs oder Systems im Ist-Zustand definiert, die die besten verfügbaren physikalischen Modelle, Sensor-Updates, die Flottenhistorie und andere relevante Daten nutzt, um die Lebensdauer des entsprechenden fliegenden Zwillings abzubilden [3]. Die Fertigungsindustrie gehörte zu den ersten Anwendern des DZ-Konzepts. DZ bieten der Fertigung eine Reihe signifikanter Vorteile. Sie ermöglichen eine Überwachung und Synchronisierung in Echtzeit, steigern die Effizienz der Produktionsprozesse und minimieren Stillstandszeiten. Zudem unterstützen DZ die prädiktive Instandhaltung, indem sie rechtzeitige Reparaturen erleichtern, und schaffen eine virtuelle Umgebung für die Produktentwicklung sowie für Schulungen des Bedienpersonals. Dies trägt zur Straffung der Prozesse und zur Verbesserung der Gesamtergebnisse bei [4–6]. Im Kontext von Industrie 4.0 (I 4.0) und Smart Manufacturing spielen DZ eine Schlüsselrolle, indem sie kontinuierliche virtuelle Repräsentationen von Systemen über deren gesamten Lebenszyklus hinweg liefern. Durch die Echtzeitsynchronisation mit Sensoren ermöglichen sie aktuelle Datenfeeds, was eine Weiterentwicklung der Konzepte virtueller Fabriken darstellt. Diese digitalisieren den Betrieb von Anlagen vollständig und sorgen für eine Integration mit dem physischen System, was eine umfassende Unterstützung der Produktionsabläufe vom Anfang bis zum Ende des Lebenszyklus einer Anlage bietet [4]. Im Kontext des Industrie 4.0-Modells betonen Rosen et al. [5] die essenzielle Rolle autonomer Systeme in der modernen Fertigung. Diese Systeme, ausgestattet mit intelligenter Technologie, sind fähig, Aufgaben von hoher Komplexität ohne umfangreiche Programmierung oder menschliches Zutun zu erledigen. Mit einem tiefen Verständnis ihrer eigenen Leistungsfähigkeit und Zustände können diese Systeme selbständig zwischen verschiedenen Handlungsoptionen wählen, um ihre Aufgaben zu

koordinieren und auszuführen. DZ sind in diesem Rahmen entscheidend, da sie eine genaue Darstellung der Produktionsabläufe und deren Interaktion mit der Umwelt ermöglichen, was die Grundlage für die Autonomie in der Fertigung bildet [5, 7]. In verschiedenen Branchen findet der DZ unterschiedliche Anwendungen, was zu einer Vielfalt von Definitionen geführt hat, die branchenspezifisch sind. Dies resultiert in einem umfangreichen, jedoch teilweise unvollständigen Verständnis des Gesamtkonzepts [5, 8]. Kritzinger et al. [8] differenzieren den DZ von verwandten Konzepten wie dem digitalen Modell und dem digitalen Schatten anhand des Integrationsgrades. Während ein digitales Modell eine statische digitale Repräsentation eines physischen Objekts oder Systems darstellt, bietet der DZ eine dynamische, in Echtzeit aktualisierte Darstellung, die durch Daten und Sensoren direkt mit seinem physischen Pendant verbunden ist. Diese Verbindung ermöglicht es dem DZ, Änderungen im physischen System zu reflektieren und prädiktive Analysen anzubieten. Im Unterschied zum digitalen Schatten, welcher nur eine vereinfachte digitale Abbildung darstellt und lediglich bestimmte Aspekte des physischen Systems wiedergibt, strebt der DZ eine möglichst genaue Nachbildung des kompletten physischen Systems an. Dies umfasst sowohl das Verhalten als auch die Leistung des Systems unter verschiedenen Bedingungen.

2.1.1 Digitale Zwillinge im Bauwesen

Im Bereich des Bauwesens befindet sich die Technologie des DZ noch in einem frühen Stadium der Entwicklung. Das Interesse daran nimmt jedoch schnell zu, und es wird erwartet, dass die Zahl der Publikationen zu diesem Thema in den nächsten Jahren deutlich ansteigt. Der Schwerpunkt der meisten Forschungsarbeiten über DZ in der Baubranche liegt bisher hauptsächlich auf der Entwurfs- und Konstruktionsphase [1]. Im Allgemeinen versteht man im Bauwesen den DZ als eine virtuelle Repräsentanz, die über Bauinformationsmodelle aus dem BIM-Kontext hinausgeht. Boje et al. [2] definieren den DZ als eine ganzheitliche soziotechnische und prozessorientierte Charakterisierung komplexer Artefakte, die am Bauprozess beteiligt sind. Die DZ nutzen die Synchronität der bidirektionalen cyber-physikalischen Datenflüsse, verbessern die Effizienz der Wertschöpfungskette und minimiert die Auswirkungen des Lebenszyklus von Gebäuden durch die Integration von Technologien für die Überwachung von Daten aus Sensornetzwerken, sichere und robuste Datenspeichersysteme und semantische Modelle für die Simulation und Optimierung von technischen Systemen.

Obwohl der Begriff der DZ im Bauwesen weit verbreitet ist, herrscht oft kein Konsens über ihre genaue Bedeutung, insbesondere in Bezug auf seine Abgrenzung zu BIM und cyber-

physischen Systemen (CPS) [3]. Während einige die DZ als synonym zu BIM betrachten, sehen andere sie als eine Erweiterung oder komplementäre Technologie zu BIM an [4].

DZ und Building Information Modelling (BIM) nutzen beide virtuelle Modelle gebauter Objekte, unterscheiden sich jedoch wesentlich in ihrer Anbindung und Funktion [3, 4]. Während DZ ein physisches Pendant voraussetzen und auf die exakte Darstellung und Echtzeitaktualisierung des aktuellen Zustands existierender Objekte ausgerichtet sind, kann BIM auch geplante Strukturen abbilden, ohne dass ein reales Gegenstück existiert [3]. BIM ist ein prozessorientierter Ansatz, der digitale Darstellungen der physischen und funktionalen Eigenschaften von Bauwerken ermöglicht, um Planung, Bau und Betrieb zu unterstützen. BIM fördert die Zusammenarbeit durch Bereitstellung geometrischer und semantischer Informationen über Bauelemente, ist jedoch primär auf statische Daten beschränkt und bedarf externer Datenquellen für Aktualisierungen [5]. BIM ist ein prozessorientierter Ansatz, der digitale Darstellungen der physischen und funktionalen Eigenschaften von Bauwerken ermöglicht, um Planung, Bau und Betrieb zu unterstützen. Es fördert die Zusammenarbeit durch Bereitstellung geometrischer und semantischer Informationen über Bauelemente, ist jedoch primär auf statische Daten beschränkt und bedarf externer Datenquellen für Aktualisierungen [4–6]. DZ bieten durch den Echtzeit-Datenaustausch Möglichkeiten für dynamische Analysen und Überwachung, die über die statischen Modelle von BIM hinausgehen [7]. DZ bilden ein dynamisches digitales Abbild einer physischen Einheit, das durch die Integration von IoT, KI, ML und Softwareanalysen in Echtzeit aktualisiert wird [4, 5, 7]. Ein "Ist"-BIM-Modell ähnelt zwar einem DZ, doch die tiefe Verbindung zum physischen Objekt, die für DZ charakteristisch ist, ist bei BIM nicht erforderlich [3]. Im Bereich des Datenaustauschs ermöglichen DZ einen nahtlosen Datenfluss zwischen virtuellem und physischem Modell, wohingegen BIM-Modelle eine eingeschränkte Kommunikationsfähigkeit aufweisen [4]. Ein Digitaler Zwilling Bundesfernstraßen ist eine virtuelle dynamische Repräsentation des realen Systems und seiner Wirkzusammenhänge. Er unterstützt über einen (teil)automatisierten bidirektionalen Daten- und Informationsaustausch optimierte Entscheidungsgrundlagen für ein nachhaltiges Management im Lebenszyklus der Infrastruktur [8].

Unabhängig von der wahrgenommenen Beziehung zwischen DZ und BIM - ob als synonym, unabhängig oder komplementär betrachtet - ist die Einbindung von BIM-Daten in DZ entscheidend. Diese Integration ist von entscheidender Bedeutung für die Aufrechterhaltung eines nahtlosen und kontinuierlichen Informationsflusses, der gewährleistet, dass die digitale Darstellung genau und aktuell bleibt [4, 5, 9]. In ihrer Untersuchung heben Shazad et al. [4]

das erhebliche Potenzial von BIM-Daten zur Verbesserung von DZ hervor, vorausgesetzt, sie werden effektiv integriert. Sie argumentieren, dass die Fülle an Informationen, die in BIM-Modellen gespeichert sind, bei richtiger Abstimmung mit der BIM-Technologie den Nutzen und die Genauigkeit digitaler Darstellungen in der bebauten Umwelt erheblich steigern können. Die Integration der bestehenden Fähigkeiten von BIM, wie geometrische Modellierung, disziplinäre Koordination, Levels of Development (LOD), Datenschemata und Ontologien, ist von entscheidender Bedeutung, um sicherzustellen, dass die einzigartigen Vorteile jedes einzelnen effizient und effektiv bei der Unterstützung von Bauwerken während ihres gesamten Lebenszyklus genutzt werden. Es sind jedoch objektive Analysen erforderlich, um die spezifischen Anwendungsfälle zu bestimmen, in denen DZ wesentliche Vorteile gegenüber BIM bieten [7]. Nguyen et al. [9] verstehen die Rolle von BIM innerhalb von DZ als grundlegend und integrativ. BIM legt mit seinen Datenintegrationsfähigkeiten den Grundstein für die Entwicklung von DZ, indem es die Erstellung präziser virtueller Gegenstücke zu physischen Anlagen erleichtert. Diese Synergie ist entscheidend für die Erstellung präziser digitaler Repliken, die Verbesserung des Informationsaustauschs während der Bauphase und die Verbesserung der Entscheidungsfindung und der DZ-Funktionalität.

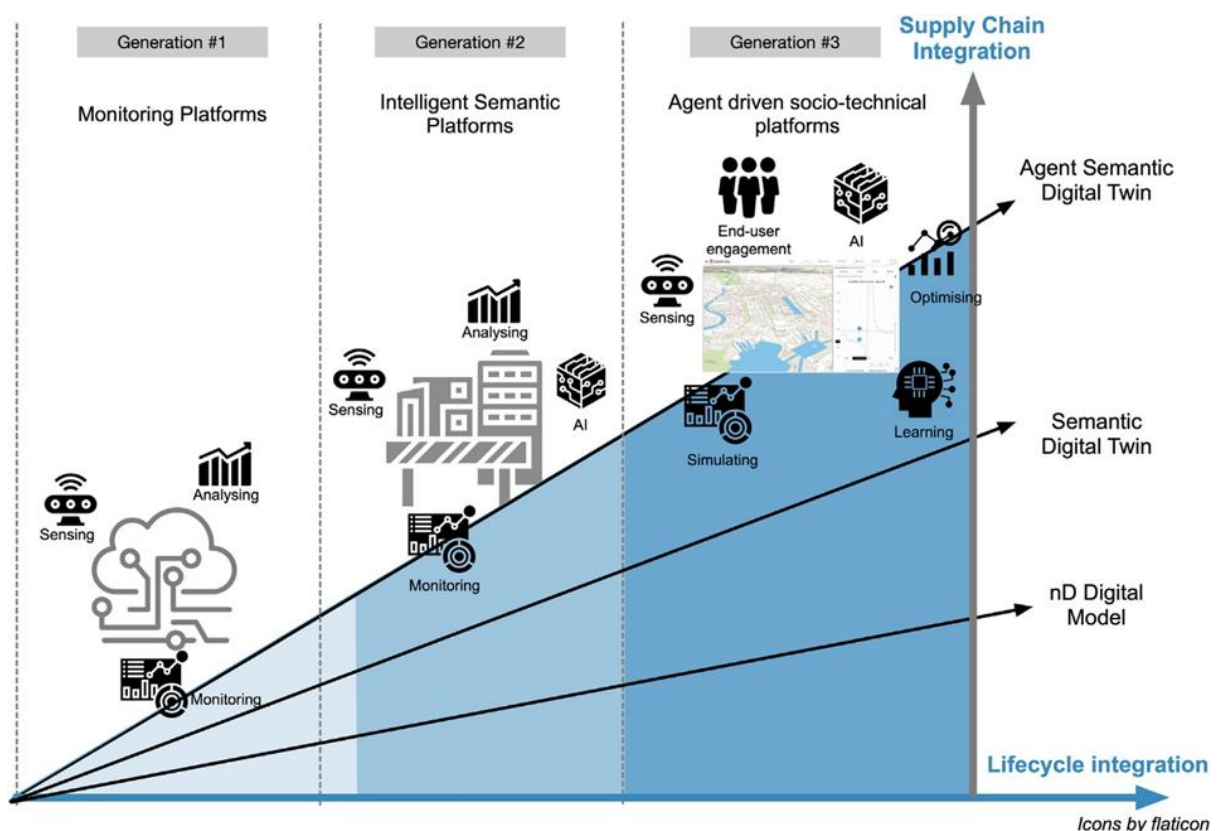


Abbildung 2-1. Die Evolution des DZ im Bauwesen [2]

Die Entwicklung von BIM hin zum DZ stellt keinen abrupten Sprung, sondern einen kontinuierlichen, geradlinigen Prozess dar. Zur Veranschaulichung dieser Entwicklung hat sich das Konzept der DZ-Reifegrade etabliert. Diese Reifegrade beschreiben die schrittweise Integration und Verfeinerung von Technologien und Prozessen, die notwendig sind, um von statischen BIM-Datenmodellen zu dynamischen, interaktiven DZ zu gelangen, die Echtzeitdaten nutzen und optimierte Entscheidungen im Lebenszyklus von Bauwerken unterstützen.

Boje et al. [2] skizzieren ein evolutionäres dreistufiges Paradigma für den DZ im Bauwesen, das eine schrittweise Umsetzung über den gesamten Lebenszyklus eines Gebäudes, die Integration der Lieferkette und die Nutzung fortschrittlicher Technologien vorsieht (vgl. Abbildung 2-1). Auf der ersten Stufe werden Überwachungsplattformen für physische Anlagen eingerichtet, die eine Grundlage bilden. Die zweite Stufe verbessert die Integration und technologische Raffinesse, indem virtuelle Modelle mit Sensortechnologien auf einer einheitlichen semantischen Webplattform zusammengeführt werden, um die Interoperabilität zu verbessern. Die letzte Stufe führt fortschrittliche KI ein und leitet Aufgaben zum autonomen Management des DZ über.

Deng et al. [5] stellen ein Leitersystem zur Klassifizierung der Reifegrade von DZ in der gebauten Umwelt vor, das sich über fünf Ausbaustufen erstreckt. Stufe 1 beginnt mit grundlegenden digitalen Darstellungen von Gebäuden durch BIM, wobei der Schwerpunkt auf Informationsaustausch und Interoperabilität liegt. Stufe 2 geht über zu BIM-gestützten Simulationen für eine verbesserte Planung mit statischen Daten. Auf Stufe 3 ermöglicht die Integration mit IoT-Technologien die Datenerfassung in Echtzeit und verbessert so das Gebäudemanagement. Stufe 4 führt prädiktive Analytik und KI für vorausschauende Maßnahmen ein, während Stufe 5, der Höhepunkt, DZ der nächsten Generation umfasst, die in der Lage sind, die Umgebung autonom zu steuern und zu optimieren und KI für eine nahtlose Interaktion zwischen virtueller und realer Welt zu nutzen.

2.1.2 Herausforderungen und Schlüsseltechnologien Digitaler Zwillinge im Bauwesen

Die Implementierung von DZ im Bausektor ist mit mehreren Herausforderungen verbunden [4]. Zunächst stellen die Komplexität der technologischen Systeme, aus denen DZ bestehen, sowie die Verfügbarkeit der erforderlichen Technologie erhebliche Hindernisse dar. Um diesen innovativen Ansatz zu verwirklichen, sind die Qualifizierung der Arbeitskräfte und ein grundlegender Kulturwandel erforderlich. Darüber hinaus erschweren die enormen

Schwierigkeiten der Bauindustrie bei der Datengenerierung und -verwaltung sowie Interoperabilitätsprobleme, die sich daraus ergeben, dass verschiedene Akteure unterschiedliche Systeme verwenden, die Einführung von DZ. Die Bewältigung dieser Herausforderungen erfordert robuste Datenverwaltungsstrategien, branchenweite Standards, die Einführung von Technologien, Datenschutz- und Sicherheitsmaßnahmen sowie kosteneffiziente Lösungen, was die Vielschichtigkeit der Integration von DZ im Bausektor verdeutlicht.

Tao et al. [10] unterstreichen die Rolle der Standardisierung für die Sicherstellung von Konsistenz, Effizienz und Interoperabilität über verschiedene Industrien hinweg. Ohne diese Standardisierung riskiert die Erstellung und Nutzung von DZ eine Fragmentierung, was Fehler, Ineffizienzen und Integrationshindernisse nach sich ziehen kann. Vordefinierte Architekturen sind essenziell, um DZ zielgerichtet und effizient über Lebenszyklusphasen und Wertschöpfungsketten hinweg einzusetzen und so die Gefahr zu vermeiden, dass sie zu unhandlichen "Datenmonstern" werden [11]. Forschungsarbeiten im Bauwesen fokussieren hauptsächlich auf spezifische Einsatzmöglichkeiten von DZ, die diversen datenbezogenen Technologien, hochauflösende Modellierungen oder simulationsbasierte Modelle nutzen [1]. Da DZ verschiedenste Technologien integrieren, ist es logisch, sowohl auf bestehende Grundstandards zurückzugreifen als auch spezifische Domänenstandards je nach Kontext einzubeziehen, um Interoperabilität, Konnektivität sowie eine vereinfachte Daten- und Modellpflege zu fördern [12]. Nach Kosse et al. [13] spielt die Modularisierung eine Schlüsselrolle bei der Standardisierung von DZ. Durch die Zerlegung komplexer Systeme in handhabbare Einheiten, die unabhängig analysiert und optimiert werden können, bevor sie in das Gesamtmodell integriert werden, lassen sich die Interoperabilität und Verknüpfung von domänenspezifischen DZ durch standardisierte Prozesse sicherstellen. Zudem unterstützt die Modularität die Überbrückung bekannter Datentransformationslücken zwischen den verschiedenen Phasen des Lebenszyklus [12]. Insbesondere die Implementierung auf Basis von Informationscontainern, wie sie aus dem AAS von I4.0 [14] oder Information Container for Linked Document Delivery (ICDD) bekannt sind, ist eine Alternative zu integrierten BIM-basierten Ansätzen [15, 16].

Die Implementierung von DZ im Bauwesen steht vor mehreren Herausforderungen, die hauptsächlich in einem fehlenden einheitlichen Verständnis des Potenzials von DZ für die Branche liegen [3]. Darüber hinaus erfordern DZ eine Integration mit bestehenden Systemen und Technologien wie Sensoren, IoT und Softwareplattformen, ein komplexer Prozess, der sorgfältige Planung und Ausführung erfordert [3, 7, 17]. Die Verwaltung großer Datenmengen,

einschließlich Punktwolken, Bildern und Sensordaten, stellt eine weitere erhebliche Hürde dar. Die Gewährleistung einer echtzeitnahen und genauen Reflexion physischer Gegenstände in virtuellen Modellen erfordert hochentwickelte Technologie und Methodologien und fügt den Implementierungsherausforderungen hinzu [3].

Das Fehlen branchenweiter Standards für DZ kompliziert die Angelegenheit weiter und führt zu Interoperabilitätsproblemen, die eine breite Adoption behindern [7, 17]. Sicherheitsherausforderungen sind von größter Bedeutung, angesichts der erhöhten Konnektivität und des Datenaustauschs, die DZ mit sich bringen. Der Schutz sensibler Informationen gegen Brüche und Cyberangriffe ist entscheidend für die Aufrechterhaltung der Integrität und Vertraulichkeit der Daten sowie das Vertrauen der Datenanbieter und Nutzer. Die Herausforderung erstreckt sich darauf, die Sicherheit der Datenquellen und der DZ-Infrastruktur selbst zu gewährleisten [18].

Ein weiteres bedeutendes Hindernis ist die Verfügbarkeit und Zugänglichkeit von Daten, insbesondere im Bauwesen, wo Zurückhaltung oder rechtliche Barrieren für die Datenfreigabe bestehen. Technische, vertragliche und kommerzielle Probleme sowie kultureller Widerstand gegen Veränderungen komplizieren die Datenintegration und -freigabe weiter [17]. Die Bewältigung dieser Bedenken erfordert die Förderung einer Umgebung, die offene Datenpraktiken mit dem Schutz von Datenbesitz und Wettbewerbsvorteilen ausbalanciert [18].

Schließlich stellen die Kosten und Komplexität, die mit der Entwicklung und Wartung von DZ verbunden sind, erhebliche Barrieren dar, insbesondere für kleinere Firmen [7, 17]. Die Überwindung dieser Herausforderungen erfordert eine konzertierte Anstrengung in Richtung Standardisierung, Bildung und Entwicklung fortgeschrittener Cybersicherheits- und Datenmanagementstrategien, um die effektive und sichere Implementierung von DZ im Baugewerbe zu gewährleisten.

Schlüsseltechnologien sind Werkzeuge, Technologien oder Methoden, die die Einführung, den Betrieb und die Verbesserung von Systemen oder Prozessen unterstützen. Im Rahmen von Bau 4.0 und DZ beinhalten diese Schlüsseltechnologien eine Bandbreite an technologischen Entwicklungen und Methodiken, die die Entscheidungsfindung fördern, Effizienz verbessern und die Verknüpfung digitaler und physischer Bauprozesse ermöglichen. Unabhängig davon, ob der DZ auf der Basis von BIM entwickelt wird oder BIM lediglich ein Teilmodell innerhalb des DZ darstellt, ist BIM eine Schlüsseltechnologie, die eine essenzielle digitale Repräsentation der physischen und funktionalen Eigenschaften eines Objekts bietet. Diese ist insbesondere für die Erstellung einer anfänglichen Darstellung eines DZ von entscheidender Bedeutung [22, 24]. Durch die Einbindung von BIM in den DZ wird ein

fließender Übergang von der Design- und Bauphase hin zur Betriebsphase ermöglicht, was das Lebenszyklusmanagement eines Gebäudes signifikant verbessert [14, 22].

Künstliche Intelligenz (KI), maschinelles Lernen und Big Data sind Schlüsseltechnologien, die wesentlich zur Entwicklung und Effektivität von DZ beitragen. Diese Technologien ermöglichen die Erstellung dynamischer Modelle, die aus heterogenen Datenquellen lernen und den Zustand ihrer physischen Entsprechungen kontinuierlich aktualisieren [22]. Maschinelles Lernen ermöglicht es DZ, zukünftige Zustände vorherzusagen und trägt so zur vorausschauenden Wartung bei, indem es Ausfälle prognostiziert, bevor sie geschehen [14]. Die Datenanalyse fungiert als das Rückgrat der operativen Intelligenz, indem sie immense Datenvolumen verarbeitet und interpretiert, was entscheidend für die Entscheidungsfindung und Effizienzsteigerung ist [14]. Durch die Integration dieser Technologien können DZ prädiktive Analysen durchführen, intelligente Entscheidungen treffen und komplexe Szenarien simulieren, was ihre Fähigkeit, handlungsrelevante Erkenntnisse zu liefern, erheblich verbessert [25]. Fortgeschrittene Techniken der Datenanalyse, -verarbeitung und -visualisierung werden eingesetzt, um die großen Datenmengen aus verschiedenen Quellen zu bewältigen, die aus der physischen Umgebung stammen, und unterstreichen die transformative Rolle von KI, maschinellem Lernen und Big Data als Schlüsseltechnologien für den Erfolg von DZ [24]. Cloud Computing spielt eine entscheidende Rolle als Schlüsseltechnologie für DZ, indem es eine essenzielle Lösung für die Herausforderungen im Umgang mit den umfangreichen Datenmengen bietet, die diese Systeme generieren und nutzen. Die enormen Datenmengen, die durch DZ erfasst werden, erfordern eine robuste Infrastruktur für die Datenspeicherung, -verarbeitung und -zugänglichkeit – eine Anforderung, die durch Cloud Computing effektiv erfüllt wird [22]. IoT-Sensor- und drahtlose Technologien sind zentrale Treiber für die Entwicklung und Effektivität von DZ, indem sie eine kontinuierliche Datenerfassung aus der physischen Umgebung ermöglichen. IoT-fähige Sensoren, einschließlich Bilderverarbeitungs- und komponentenbasierte Sensoren sowie RFID- und UWB-Tags, für die Erfassung von Echtzeitdaten aus verschiedenen Komponenten, wie Gebäudebestandteile, Maschinen und Arbeitenden sind essenziell für die Erfassung von Echtzeitdaten [24]. Hu et al. [25] unterstreichen die Bedeutung fortschrittlicher Internet- und Kommunikationstechnologien als Rückgrat des DZ, das den notwendigen Echtzeit-Datenaustausch und die Kommunikation zwischen physischen und virtuellen Gegenständen ermöglicht. Diese Technologien gewährleisten, dass der DZ den aktuellen Zustand seines physischen Pendants präzise widerspiegelt [22], während drahtlose Sensornetzwerke essenzielle Echtzeitdaten, beispielsweise über Temperatur, Luftfeuchtigkeit und strukturelle Integrität liefern, die zur Analyse und Simulation im DZ genutzt werden [14]. Insgesamt bilden

IoT, Sensoren und drahtlose Technologien wichtige Komponenten, die es DZ ermöglichen, komplexe physische Systeme präzise zu modellieren und zu simulieren. Im Gegensatz zu technologischen Schlüsselementen sind Richtlinien und Normen zur Förderung der Standardisierung unerlässlich. Shahzad et al. [12] unterstreichen, dass die Etablierung gemeinsamer Datenstandards und Interoperabilität entscheidend für die effektive Entwicklung und Implementierung von DZ ist, da sie einen nahtlosen Informationsaustausch über verschiedene Systeme und Plattformen hinweg ermöglichen. Diese sind für die präzise digitale Replikation und Simulation physischer Assets ausschlaggebend. Ferner ist die Integration von Sicherheitsaspekten und Designprinzipien von großer Bedeutung, um persönliche Daten und Privatsphäre zu schützen, sensible Infrastrukturen zu sichern und Risiken, die mit der Datenaggregation einhergehen, zu minimieren. Dadurch wird die Integrität und Vertrauenswürdigkeit DZ gewahrt. Zudem spielen Leitprinzipien eine wichtige Rolle bei der Entwicklung und Implementierung DZ und unterstützen das Entstehen eines Ökosystems vernetzter DZ quer durch verschiedene Sektoren. Diese durch Richtlinien gestützten Rahmenbedingungen sind fundamental für die breite Akzeptanz und den Erfolg von DZ und stellen eine wichtige Ergänzung zu technologischen Entwicklungen dar.

2.1.3 Bewertung der Ausgangslage für das Projekt

DZ sind digitale Abbilder physischer Systeme, die Echtzeitdaten nutzen, um diese Systeme zu überwachen und zu steuern. Bisher wurden sie besonders in der Industrie 4.0 und im Smart Manufacturing verwendet, und spielen dort eine Schlüsselrolle für die Begleitung des gesamten Lebenszyklus von Produktionsanlagen mit der die Effizienz gesteigert werden kann. Damit erlauben sie Echtzeitsynchronisation, prädiktive Instandhaltung und Optimierung der Produktionsprozesse.

Im Bauwesen steckt das DZ-Konzept noch in einer frühen Entwicklungsphase. Durch das große Potenzial, den gesamten Bauzyklus von der Planung bis zum Betrieb durch bidirektionale Datenflüsse zu verbessern, steigt das Interesse seit einiger Zeit stark. Dabei geht der DZ über das Building Information Modeling (BIM) hinaus, das statische Daten bereitstellt. Während BIM hauptsächlich Planungs- und Bauinformationen umfasst, ermöglicht der DZ eine Echtzeitüberwachung und -analyse physischer Objekte. Obwohl BIM eine wichtige Grundlage für DZ bildet, unterscheidet sich der DZ durch die Integration von IoT, künstlicher Intelligenz (KI) und maschinellem Lernen (ML).

Trotz der frühen Entwicklungsphase werden DZ bereits bei Brücken, Tunneln und Fahrbahnen, zunehmend angewandt. Bei Brücken werden sie vor allem im Rahmen des

Structural Health Monitoring (SHM) eingesetzt, um den Zustand der Bauwerke zu überwachen. Verschiedene Sensoren sammeln Daten, die mit historischen Daten kombiniert und in Echtzeit analysiert werden, um den Wartungsbedarf zu ermitteln. Ein IoT-basiertes DZ-Framework verbessert die Kommunikation und Datenverarbeitung bei Brückenüberwachung und erlaubt so eine effizientere Wartung und höhere Sicherheit.

Im Tunnelbau werden DZ beispielsweise genutzt, um die Beleuchtung zu simulieren und zu optimieren, sowie zur Erhaltung und Überwachung der Tunnelinfrastruktur. Hier kommen Technologien wie Virtual Reality und Multisensorik zum Einsatz, um präventive Wartungen durchzuführen und den Tunnelbetrieb effizienter zu gestalten.

Für Fahrbahnen werden DZ beispielsweise zur Zustandsüberwachung, Wartungsplanung und Verkehrssicherheit verwendet. Sensoren und LIDAR erfassen Echtzeitdaten über den Fahrbahnzustand, die in den DZ integriert werden. Diese Informationen werden genutzt, um die Instandhaltungsplanung zu verbessern und autonomes Fahren zu unterstützen.

All diese Anwendungen beabsichtigen, eine frühzeitigere und tiefere Einsicht in den Zustand von Bauwerken und Infrastrukturen zu gewinnen. Damit können die Grundlagen geschaffen werden, um bessere Wartungsentscheidungen zu treffen, die Sicherheit zu erhöhen und langfristig Kosten zu reduzieren und die Lebensdauer von Infrastrukturen zu verlängern. Besonders im Hinblick auf Fahrbahnen und die Unterstützung von autonomem Fahren wird das Potenzial deutlich, dass DZ die Grundlage für zukünftige Verkehrssysteme legen dürfte.

Den bedeutenden Vorteilen, die durch die Implementierung von DZ, speziell auch für die genannten Infrastrukturtypen erreicht werden können, stehen jedoch auch beachtliche Herausforderungen gegenüber. Dazu gehören technologische Komplexität, mangelnde Standardisierung, Interoperabilitätsprobleme und Sicherheitsbedenken. Auch die Datenverfügbarkeit, insbesondere in der Bauindustrie, ist problematisch. Standardisierung und Modularisierung sind notwendig, um eine effiziente Nutzung und Integration von DZ zu gewährleisten. Schließlich erfordern DZ eine enge Verbindung zu neuen Technologien wie Cloud Computing und drahtlosen Netzwerken, um Echtzeitdaten zu erfassen und zu verarbeiten.

Allerdings bleibt die Herausforderung der Datenverarbeitung und der Kommunikationskomplexität bestehen, die durch innovative Ansätze wie Edge-Computing und optimierte Kommunikationsprotokolle bewältigt werden müssen. Insgesamt wird der Einsatz von DZ in der Infrastruktur weiter an Bedeutung gewinnen, insbesondere angesichts der wachsenden Anforderungen an Verkehrssicherheit und automatisiertes Fahren.

In der Folge zeigen wir exemplarisch, wie die Effizienz, Sicherheit und Entscheidungsprozesse mit dem Einsatz von DZ im Bauwesen verbessert werden können. Es bleibt eine übergeordnete Notwendigkeit, die technologischen und organisatorischen Abläufe anzupassen, um die Vorteile von DZ vollständig zu realisieren. Hierfür sind die erwähnte Weiterentwicklung der Standards und die Förderung von Technologien wie IoT und KI besonders wichtig, um eine nahtlose Integration und Nutzung von DZ zu gewährleisten.

2.2 Anwendung digitaler Zwillinge im Ingenieur- und Infrastrukturbau

Der Einsatz von DZ im Ingenieur- und Infrastrukturbau im Lebenszyklus (vgl. Abbildung 2-2) bietet zahlreiche Vorteile und Möglichkeiten für die Planung, den Bau, den Betrieb, die Erhaltung sowie den Rückbau von Ingenieurbauwerken.

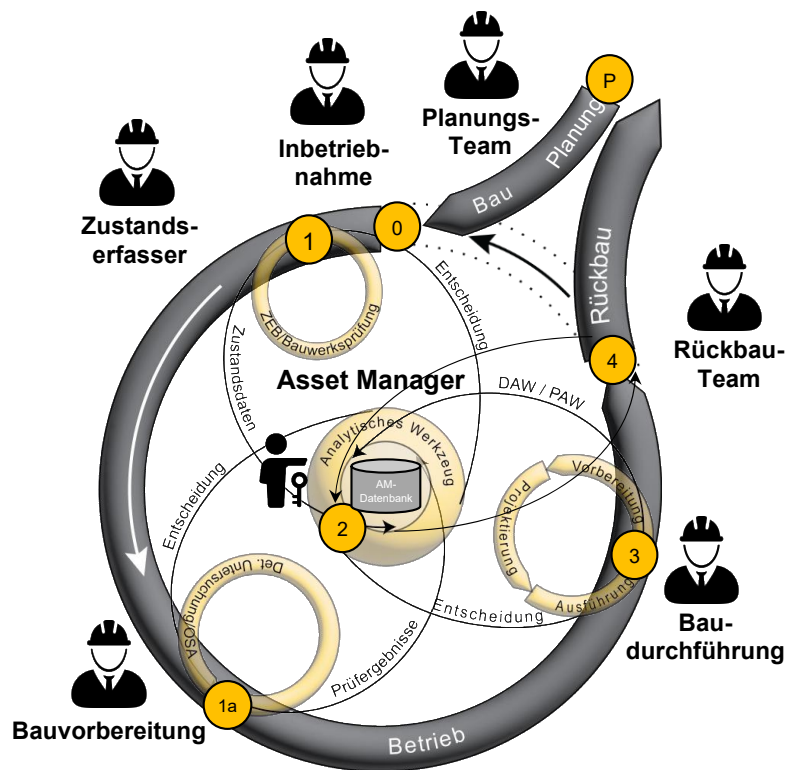


Abbildung 2-2. Prozesskreislauf eines Infrastrukturbauwerks mit Zeitpunkten des Datenaustauschs zwischen den Prozessbeteiligten [19]

Im Folgenden werden einige Anwendungsfälle skizziert, in denen DZ im Lebenszyklus von Infrastrukturbauwerken eingesetzt werden können:

Phase P: Planung und Entwurf

Im Rahmen der Planung und des Entwurfs von Ingenieurbauwerken ermöglichen virtuelle Modelle (BIM) eine präzise Planung und Simulation von Bauwerken, was zu effizienteren

Entwurfsprozessen führt. Durch die Integration von Daten aus verschiedenen Quellen können Planende realistischere und fundiertere Entscheidungen treffen.

Phase 0: Bauüberwachung und -dokumentation

Für die Bauüberwachung und -dokumentation können die aus dem Entwurf entnommenen BIM-Modelle in einen DZ überführt werden und um Informationen aus dem Bauprozess angereichert werden. DZ erleichtern die Überwachung des Baufortschritts in Echtzeit. Sensordaten können genutzt werden, um die physische Integrität des Bauwerks zu überprüfen und frühzeitig auf potenzielle Probleme während des Bauprozesses hinzuweisen. Nach Abschluss der Bauphase kann ein Geburtszertifikat (vgl. [20]) des Brückenbauwerks erstellt werden, in dem der Referenzzustand des Bauwerks zu Beginn seiner Nutzungsdauer dokumentiert wird.

Phase 1: Betrieb / Nutzung

Der Zustand eines Ingenieurbauwerks unterliegt einer ständigen Beanspruchung durch Verkehr und Klima und ist damit eine zeitlich veränderliche Kenngröße. Aus diesem Grund werden in den DACH-Ländern regelmäßige und standardisierte Bauwerksprüfungen und -überwachungen durchgeführt (vgl. [21–23]), um einen aktuellen Überblick zum Netzzustand zu erhalten. Diese Daten werden in den Bauwerksdatenbanken bzw. der Asset-Management-Datenbank (AM-DB) historisiert abgelegt (vgl. [24–26]) und dienen neben weiteren Daten, u. a. zum Aufbau, der vorhandenen (Schwer-) Verkehrsbelastung oder Klima, bei Analysen zur Modellbildung der Zustandsentwicklung. Während des Betriebs ermöglichen DZ eine umfassende Überwachung von Struktur, Leistung und Zustand der Ingenieurbauwerke.

Phase 1a: Detaillierte Untersuchungen (Bauvorbereitung)

Im Rahmen der Maßnahmenvorbereitung können tiefgreifende Untersuchungen erforderlich werden, wie z. B. zerstörungsfreie und/oder -arme Prüfmethoden (ZfP). Hierbei werden die Daten manuell, und zwar in einem reduzierten Umfang, in der AM-DB erfasst. Diese Aktualisierung erfolgt im Punkt 1a in Abbildung 2-2. In der Regel ist hierfür keine geeignete Datenstruktur in AM-DB vorhanden, sodass nur ein PDF-Bericht in der Datenbank abgelegt wird. Dies bedeutet, dass die gewonnenen Erkenntnisse aus den tiefgreifenden Untersuchungen im analytischen Werkzeug nicht oder nur marginal berücksichtigt werden. Des Weiteren können sensorbasierte Daten genutzt werden, um vorbeugende Instandhaltung

durchzuführen und Ausfallzeiten zu minimieren. Eine Verknüpfung dieser Daten könnte mithilfe eines DZ erfolgen. Anhand eines Vergleichs des in einem Geburtszertifikat dokumentierten Ausgangszustands mit Folgemessungen können bspw. Aussagen zu Veränderungen am Bauwerk und Abweichungen vom normalen Verhalten getroffen werden.

Phase 2: Erhaltungsplanung

Der Prozessschritt der Erhaltungsplanung erfordert u. a. Inputdaten zum Bauwerkszustand, zur Statik, zu den baustofftechnologischen Daten, und zu weiteren planungsrelevanten Kenngrößen. Das Ergebnis einer netzweiten Erhaltungsplanung stellt die Finanzbedarfsprognose sowie die Identifikation und Priorisierung von maßnahmenbedürftigen Anlagenteilen dar. Dies erzeugt vordergründig keine Änderung des Bestandsmodells. Allerdings zeigen die Anforderungen aus der Praxis, dass es notwendig ist, auch hier einen netzweiten Überblick über das anstehende Erhaltungsprogramm, welches aus maßnahmenbedürftigen Bauwerken besteht, zu generieren (Punkt 2 in Abbildung 2.2). Die notwendigen Informationen umfassen die Angaben zum betroffenen Bauwerk, zum geplanten Maßnahmenjahr sowie zum vorab zugeordneten Maßnahmentyp. Ein Maßnahmentyp umfasst verschiedene Erhaltungsmaßnahmen mit ähnlichem Umfang bzw. ähnlichen Auswirkungen in Bezug auf Zustand und Kosten.

Phase 3: Erhaltung

Im Rahmen der objektbezogenen Projektierung und Bauausführung wird die Baumaßnahme konkretisiert und dann umgesetzt (Punkt 3 in Abbildung 2-2). Dabei kann sich unter Umständen der durch die Erhaltungsplanung vordefinierte Maßnahmentyp nochmals ändern. Durch eine Baumaßnahme wird das Bauwerk z. B. durch den Ersatz einer oder mehrerer Bauteile bzw. Bauteilgruppen gesamthaft erneuert. Damit ändert sich das initiale as-built-Modell und es wird in Phase 3 festgelegt, zu welchen Abschnitten die relevanten Änderungen zusätzlich in das Modell zu übernehmen sind. Neben den geometrischen Änderungen werden auch die neuen baustofftechnischen Daten mit übernommen (vgl. [19, 27]).

Phase 4: Rückbau / Recycling

Der Einsatz von DZ für Ingenieurbauwerke während des Rückbaus bietet eine Vielzahl von Vorteilen, die zu einer effizienteren, sichereren und nachhaltigeren Abwicklung des Rückbauprozesses beitragen.

DZ ermöglichen eine detaillierte und präzise Planung des Rückbaus, einschließlich der Simulation verschiedener Szenarien. Planungsfehler können im Vorfeld erkannt und behoben werden, was zu einer optimierten und sicheren Durchführung des Rückbaus führt. Durch die

virtuelle Darstellung des Bauwerks können Ressourcen wie Arbeitskräfte, Maschinen und Materialien effizienter eingesetzt werden. Eine genaue Vorhersage der benötigten Ressourcen führt zu einer Optimierung der Kosten und Zeit. DZ ermöglichen die Identifikation potenzieller Sicherheitsrisiken während des Rückbaus. Schulungen und Simulationen können auf der Grundlage des DZ durchgeführt werden, um die Sicherheit der Arbeitskräfte zu verbessern. Während des Rückbaus ermöglichen DZ eine Echtzeitüberwachung des Abbruchprozesses. Sensordaten können genutzt werden, um die Stabilität des Bauwerks zu überwachen und unvorhergesehene Probleme frühzeitig zu erkennen. DZ unterstützen das Management und die Überwachung des Abfallstroms während des Rückbaus. Eine genaue Bestimmung von wiederverwertbaren Materialien kann dazu beitragen, den Abfall zu minimieren und umweltfreundliche Entsorgungsoptionen zu identifizieren. Durch die DZ können alle Phasen des Rückbaus genau dokumentiert werden. Die Einhaltung von Umweltauflagen und gesetzlichen Vorschriften kann durch umfassende digitale Aufzeichnungen sichergestellt werden. DZ ermöglichen eine umfassende Bewertung der Umweltauswirkungen des Rückbaus. Die Integration nachhaltiger Praktiken und die Identifizierung von Möglichkeiten zur Wiederverwendung von Materialien können gefördert werden. Durch präzise Planung und Ressourcenoptimierung können die Gesamtkosten des Rückbaus minimiert werden. Das frühzeitige Erkennen von Problemen und die schnelle Anpassung des Rückbauplans können zu einer Kostenreduktion führen.

Die Integration von DZ in den Rückbauprozess von Ingenieurbauwerken bietet somit nicht nur technologische Vorteile, sondern unterstützt auch umfassendere Ziele wie Sicherheit, Nachhaltigkeit und Kostenoptimierung.

Für die oben skizzierten Anwendungsfälle besteht insbesondere noch Forschungsbedarf für die Rückbauphase. Für die Straßenverkehrsinfrastruktur ist ein BIM-basiertes digitales 3D-Modell mit Informationen über den gesamten Lebenszyklus eines Bauwerks (Planung, Bau, Betrieb und Erhaltung) erforderlich, um die derzeitigen Arbeitsabläufe innerhalb der beschriebenen Lebensphasen zu verbessern. Zwar bildet BIM seit etwa 20 Jahren eine Schlüsselkomponente bei der Infrastrukturautomatisierung und -digitalisierung, jedoch wird es bisher hauptsächlich für die Planung/Projektierung und den Bau eingesetzt.

Digitalisierungsinitiative der deutschen Infrastrukturbetreiber

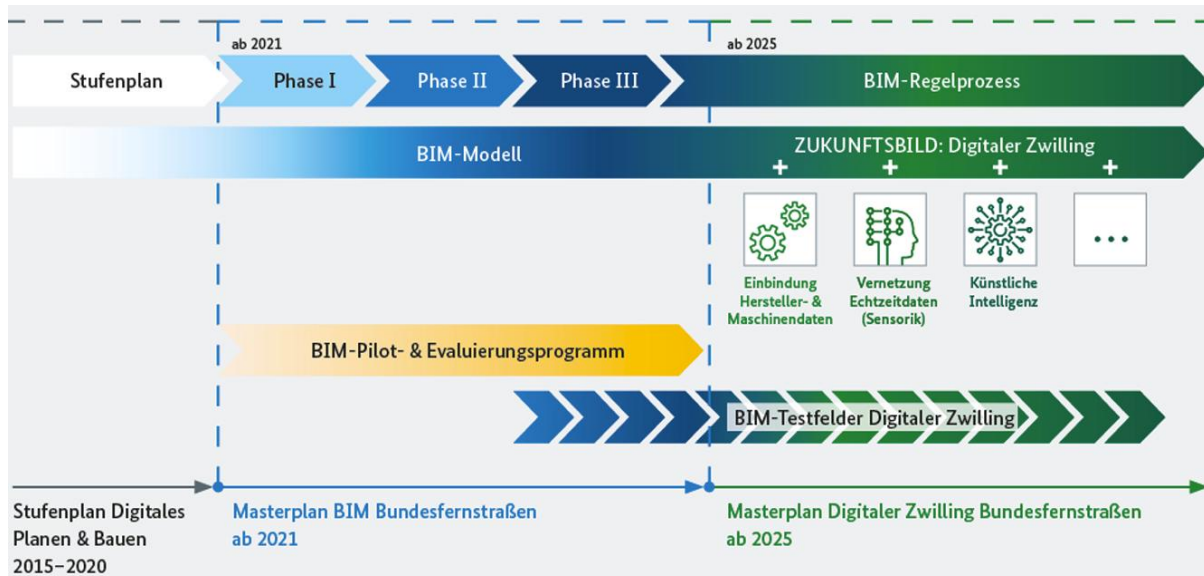


Abbildung 2-3. Phasenmodell der BIM-Implementierungsstrategie erweitert um den Beitrag zum Masterplan Digitaler Zwilling Bundesfernstraßen [28]

Für die Einführung von BIM im Bundesfernstraßenbau hat das BMDV einen „Masterplan BIM Bundesfernstraßen“ erstellt (vgl. Abbildung 2-3). Dieser beinhaltet eine Implementierungsstrategie der BIM-Methode mit dem Ziel, die Digitalisierung des Planens, Bauens und Betreibens im Bundesfernstraßenbau mit der BIM-Methode voranzutreiben. Die bisherigen Aktivitäten beschränken sich dabei auf die Abbildung der Planungs-, Entwurfs- und Bauphase. Mit dem „Masterplan digitaler Zwilling“ soll ab 2025 auch eine Einführung von BIM auf die Nutzungs- und Erhaltungsphase in Form von DZ erfolgen [28].

Einen ersten Großdemonstrator eines DZ einer Bundesfernstraßeninfrastruktur wird derzeit im Rahmen des Pilotprojektes *smartBRIDGE Hamburg* erprobt [29].

Digitalisierungsinitiative der österreichischen Infrastrukturbetreiber

Die digitale Strategie der österreichischen Bundesregierung wurde 2016 in Form einer Roadmap festgelegt [30]. An der Erstellung der „Digital Roadmap“ haben mehr als 100 ExpertInnen aus allen Ministerien, den Bundesländern, dem Städte- und Gemeindebund sowie von Sozialpartnern und anderen Organisationen mitgewirkt. Die Roadmap gibt einen Überblick über die aktuellen Herausforderungen sowie über bestehende und geplante Maßnahmen und Aktivitäten. Diese orientieren sich an zwölf Leit-prinzipien für die Gestaltung der Digitalisierung in Österreich. Die Infrastrukturbetreiber koordinieren und formulieren ihre Digitalisierungsstrategien nach Bedarf, indirekt auf Basis der Roadmap des Ministeriums.

Die Infrastrukturbetreiber verfolgen folgende drei Digitalisierungsinitiativen:

(1) Digitalisierungsinitiative „Mission 2020 – Vision 2030“; a) Etablierung von BIM als Standard in den Projekten; b) Erreichung der Durchgängigkeit von Daten über den gesamten Lebenszyklus; c) Aus Daten bessere Erkenntnisse gewinnen, um damit bessere Entscheidungen zu treffen, die langfristig zu besseren Ergebnissen führen; A) Zeitraum 2020-2022 – Phase „Sensibilisierung“, Informieren - Aktueller Stand der Digitalisierung (Datenbanken, BIM-Modelle, etc.), Pilotieren - Umsetzung der BIM-Strategie - Ziel BIM als Standard (Modellvorgaben, Vorgaben zur Datenstrukturzuordnung), Motivieren – Mitarbeitende setzen BIM bei Projekten ein und erfassen den Mehrwert; B) Zeitraum 2023-2024 – Phase „Befähigung“, Umsetzung von BIM inkl. geschaffener Standards in Projekten, Aufbau und Erweiterung der Kompetenzen in Anwendung von BIM, Change-Management in Bezug auf Rollenverständnis und Verantwortung, Transformation auf der menschlichen Ebene; C) Zeitraum 2025ff – Phase „Transformation“, BIM ist Teil der Prozesse und gehört zum Tagesgeschäft der Projektabwicklung, Daten sind vernetzt und umfassen den gesamten Lebenszyklus; **(2) Digitalisierungsinitiative „BIM-Chancen/Möglichkeiten“;** Die Analyse der Möglichkeiten von BIM läuft parallel zur ASFINAG-Initiative 1 und konzentriert sich auf folgende Themen; A) Zeitraum parallel zur Mission 2020 – Vision 2030, Wofür werden die BIM-Modelle verwendet, was passiert jetzt und in Zukunft mit diesen Modell-Informationen?, Prozess des aktuellen Datenmanagements, Prozess der Integration bestehender Daten aus Datenbanken in die BIM-Datenstrukturen, Umsetzung des Lebenszyklus; Instandhaltung, Betrieb, Erneuerung und Bauprogrammplanung in der BIM-Datenstruktur [19] **(3) Digitalisierungsinitiative „Green Infra ESS“;** Die Analyse der Möglichkeiten von BIM für Integration der **Green Infra** ESS Initiativen, Schaffung von Entscheidungsgrundlagen - Struktur der Daten - ESS-Datenstrukturen, Verbindung von BIM mit LCCO2-Tool und ökosozialen Daten, Beginn der CO2-Implementierung in den BIM-Modellstrukturen; **(4) Digitalisierungsinitiative „ÖIAV Arbeitsgruppe öffentliche Auftraggeber“;** In der ÖIAV-Arbeitsgruppe öffentliche Auftraggeber (AGoeAG), die 2019 ins Leben gerufen wurde, werden Ressourcen zum Thema Digitalisierung und BIM in den Bereichen Planen, Genehmigen, Bauen und Betreiben gebündelt. Die gemeinsame fachliche Zusammenarbeit sowie Ausarbeitung von Digitalisierungs- und BIM-Themen aus Sicht der öffentlichen Auftraggeber bringt Synergien für den öffentlichen Sektor. Ziele der Arbeitsgruppe sind: (a) Schaffung eines gemeinsamen Verständnisses in Bezug auf Digitalisierung und BIM durch gemeinsamen Knowhow-Aufbau, Austausch von Praxiserfahrungen und Pilotanwendungen, gemeinsame Schulungen und Veranstaltungen, Betrachtung von gesamten Lebenszyklen, (b) Förderung offener Methoden und Technologien – z. B. openBIM, (c) Ausarbeitung von

Standards in Form von Schriften und Richtlinien in Bezug auf Digitalisierung und BIM, (d) Stärkung des Wirtschaftsstandortes Österreichs mit seiner erfolgreichen KMU-Struktur [31].

Digitalisierungsinitiative der schweizer Infrastrukturbetreiber

Das Bundesamt für Strassen (ASTRA) hat mit der Amtsstrategie eine Übersicht über langfristige Ziele erstellt, die das Zukunftsbild für das Jahr 2040 definieren. Darin ist neben der Teilstrategie digitale Ausrichtung [32] und der Teilstrategie Daten [33] auch die Teilstrategie Building Information Modeling integriert, welche die Einführung von BIM gemäß dem Aktionsplan „Digitale Schweiz“ bis 2025 thematisiert. Im Zusammenhang mit BIM werden Ziele wie die Anwendung der Methode im gesamten Lebenszyklus von Infrastrukturen, Verbesserung von Projekttransparenz und Implementierung von Qualitätskontrollen definiert. Die Nutzung eines DZ für das Asset Management, mobile Datenzugriffe und die Integration internationaler Standards sind weitere Schwerpunkte. Ziel ist die Reduzierung doppelt vorhandener Daten bis 2030 und die Umsetzung des Prinzips "Single Point of Truth". Die Digitalisierung für BIM wird abteilungsübergreifend vorangetrieben, auch externe Partner sollen datengestützte Mehrwerte implementieren. Die Einführung von BIM soll auf Basis eines konkreten Stufenplans im Zeitraum bis 2030 erfolgen (vgl. Abbildung 2-4).

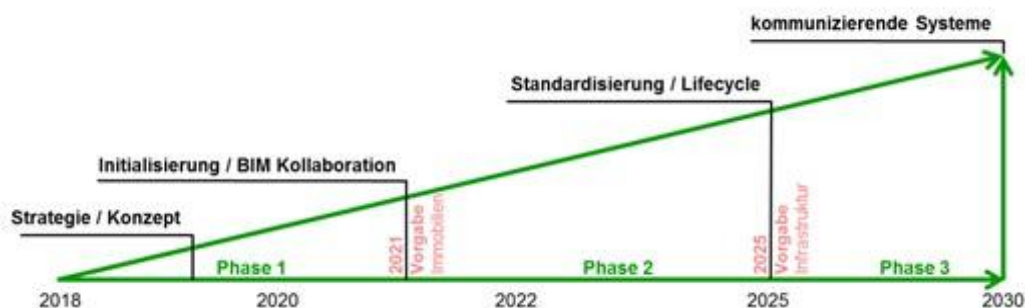


Abbildung 2-4. Stufenplan des ASTRA zur Einführung von BIM [32]

Für die Implementierung von BIM sind acht Handlungsfelder, die wiederum entsprechende Maßnahmen beinhalten, um die strategischen Ziele zu erreichen. Dazu zählen u.a. die Integration von BIM in die Unternehmensarchitektur sowie die Verknüpfung von BIM mit Daten und Softwareanwendungen. In Bezug auf die Nachhaltigkeit wird derzeit ein Konzept zur Festlegung von Nachhaltigkeitsindikatoren für BIM-basierte Anwendungen erarbeitet [34].

2.2.1 Digitale Zwillinge im Infrastrukturbau – Stand der Technik

Seit 2020 existieren in der Fachliteratur vermehrt Arbeiten zur Konzeptentwicklung und zur prototypischen Entwicklung von DZ für die Anwendung im Bauwesen [1]. Diese Arbeiten sind gestreut über die verschiedenen Lebenszyklusphasen der Bauwerke und behandeln einzelne

Phase oder mehrere Phasen. In der Planungsphase, in welcher der physikalische Zwilling als Gegenstück zum DZ noch nicht realisiert ist, gibt es folglich nur wenige wissenschaftliche Arbeiten. Jiang et al. [3] verwenden einen DZ-Ansatz zur Erstellung eines virtuellen Projekts und integrieren die vorhandene Umgebung und das Bauwerk zur Unterstützung der Abstimmung der Planung. Dabei ist es nicht belegt, dass die Planung mit DZ effizienter ist als die Methode mit BIM.

Im Gegensatz dazu werden in der Phase der Bauausführung vermehrt echte Ansätze des DZ zur Echtzeitüberwachung oder Prozessautomatisierung eingesetzt. Sacks et al. [35] charakterisieren DZ als eine prozess- und datenzentrierte Technologie. Darauf aufbauend entwickeln sie ein Konzept für den digitalen Zwilling Bau (engl. Digital Twin Construction), welcher BIM und Lean Prinzipien integriert, um Bauprojekte effizienter und kostengünstiger abzuwickeln. Insbesondere wurde der Ansatz des DZ für die Verbesserung der Baustellensicherheit als wichtiger Einsatzbereich erkannt [36]. Dabei werden häufig Sensoren (z. B. Global Positioning System (GPS) Sensoren) und Kameratechnologien eingesetzt, um die Position von Arbeitskräften und das Verhalten im Arbeitsbereich zu überwachen und so bei Gefährdungen zu warnen. Außerdem wurden XR-Technologien zur Simulation eingesetzt, um die Sicherheitsplanung und das Training effizient durchzuführen.

Für die Betriebsphase präsentieren Lu et al. [37] ein Konzept des DZ für den Betrieb und die Erhaltung eines Gebäudes. Neben der Integration unterschiedlicher Datenquellen und der Strukturierung von Informationen auf Basis des IFC-Modells wurde dargestellt, wie die technische Gebäudeausrüstung automatisiert und effizient überwacht werden kann. Für den Ingenieur- und Infrastrukturbau in der Betriebsphase unterscheidet sich die Literatur zu DZ von der Konzeptentwicklung bis zur Implementierung in verschiedenen Bauwerkstypen, z. B. Brücken, Tunnel, Fahrbahnen und von Smart Cities [38]. Die Anwendungsbereiche reichen von der Zustandsüberwachung bestimmter Ingenieurbauwerke [39] bis zur Simulation und Entwicklung von Szenarien für die Stadtplanung [38].

Digitale Zwillinge für Brücken

Zahlreiche wissenschaftliche Arbeiten zeigen, dass DZ-Anwendungen für Brücken zur Überwachung des Bauwerkszustandes, auch bekannt als Structural Health Monitoring (SHM), mit unterschiedlichen Schwerpunkten häufig vorgestellt und prototypisch umgesetzt werden.

Beispielsweise zeigen die Studien von Wenner et al. [39], Mahmoodian et al. [40], Nicoletti et al. [41], Collin et al. [42], dass verschiedene Sensoren hauptsächlich zur Zustandsüberwachung eingesetzt werden, um Veränderungen im Bauwerksverhalten zu

erfassen und die Bauwerkssicherheit zu gewährleisten. Diese Sensoren spielen eine entscheidende Rolle bei der kontinuierlichen Erfassung und Bewertung des Zustands von Bauwerken, indem sie Daten über strukturelle Parameter sammeln und analysieren. Die Sensordaten können mit verschiedenen Datenquellen oder Technologien verknüpft werden, um eine spezifische Zustandsbewertung zu erreichen. Im Projekt smartBRIDGE Hamburg [39] wurden die Sensordaten mit historischen Gebäudedaten kombiniert, um die Automatisierung der manuellen Inspektion und die effektive Festlegung von Wartungsplänen zu ermöglichen.

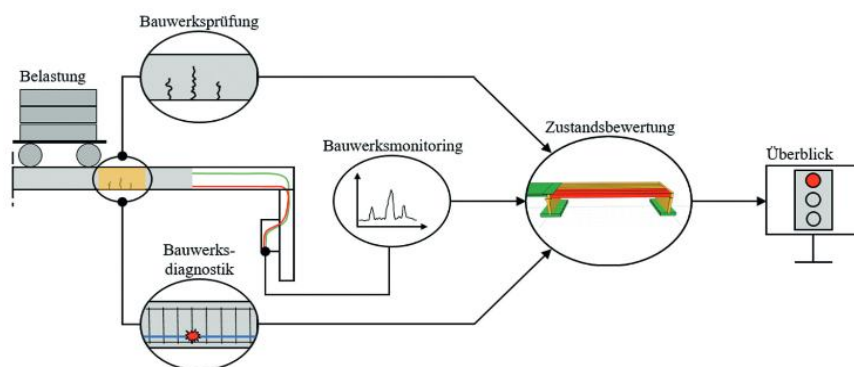


Abbildung 2-5. Schematische Darstellung des DZ mit Bauwerkszustandsbewertung [42]

In Mahmoodian et al. [40] wurden die Sensordaten genutzt, um das Strukturverhalten mittels Finite-Elemente-Berechnung zu simulieren und den entsprechenden Instandhaltungsbedarf zu ermitteln. Nicoletti et al. [41] und Collin et al. [42] erweitern die Zustandsbewertung um Sensordaten für die Struktursimulation und kombinieren sie mit historischen Daten, um die Entscheidung über Erhalt oder Instandhaltung zu unterstützen (siehe Beispiel in Abbildung 2-5). Die sichere Übertragung und effektive Verarbeitung von Sensordaten sind jedoch oft eine Herausforderung in der Anwendung von DZ. In der Studie von Gao et al. [43] wird die Zeitverzögerung von DZ-Diensten für Brücken auf der Grundlage von Kommunikations- und Rechenkomplexität untersucht. Ein AIoT (Artificial Intelligence of Things) unterstütztes DZ-Framework wurde vorgestellt und auf intelligente Brücken angewandt. Dabei wurde Zwei-Wege-Kommunikation unter Verwendung von Edge- und Cloud-Computing ermöglicht, um die Kommunikationskomplexität zu reduzieren, insbesondere für die Analyse großer Datenmengen. In der Studie wurde ein Prototyp dargestellt, der KI und die Datenaufnahme mittels des MQTT-Protokolls in eine webbasierte Plattform integriert. Die Ergebnisse zeigen, dass ein AIoT-informiertes DZ-Framework eine hohe Effizienz, eine geringe Latenzzeit und eine ausgezeichnete Fehlertoleranz aufweist, was zur Effizienz und Sicherheit des Brückenbetriebs und der Wartung beitragen kann, insbesondere unter kommunikationsbeschränkten Bedingungen.

Digitale Zwillinge für Tunnel

Für die Anwendung von DZ im Tunnelbetrieb und in der Tunnelerhaltung existieren verschiedene Vorarbeiten, in denen neben der Sensorik zur Zustandserfassung auch weitere Technologien eingesetzt werden, wie z. B. Extended Reality für immersive Simulation oder Semantic Web Technologien zur Strukturierung und Verarbeitung von vernetzten Daten.

Shen et al. [44] präsentieren ein umfassendes Framework zur Verbesserung der Tunnelbeleuchtungsumgebung durch einen holistischen Ansatz zur Anwendung von DZ. Grundlegend wird darin ein DZ verwendet, um die Tunnelbeleuchtung numerisch zu simulieren und mittels der Anwendung von Virtual Reality effektive Lösungen zu ermitteln. Als Ergebnis konnte das Framework erfolgreich implementiert werden, um Beleuchtungsszenarien zu optimieren und die Effizienz der Tunnelbeleuchtung zu verbessern, was auch zur verbesserter Sicherheit und Effizienz im Tunnelverkehr führt.

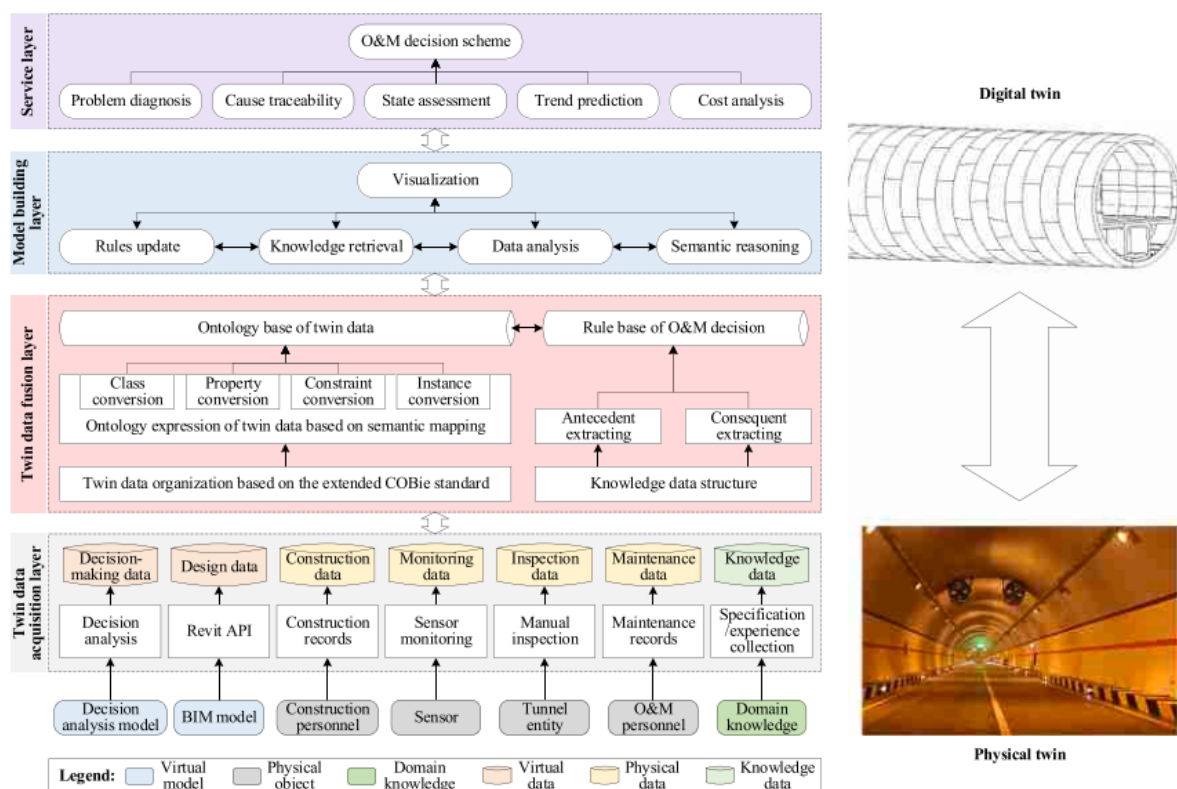


Abbildung 2-6. Schematische Darstellung des DZ für die Erhaltung von Tunneln [45].

Die Studie von Yu et al. [45] beschreibt ein entscheidungsanalytisches Framework für die Erhaltung von Tunneln, das auf dem Konzept eines DZ basiert (siehe Abbildung 2-6). Der Schwerpunkt liegt auf der Kombination des erweiterten COBie-Standards und semantischer Webtechnologien zur Integration verschiedener relevanter Tunneldaten. Auf diese Weise können die Fehlerursachen schnell analysiert und Instandhaltungsmaßnahmen ermittelt

werden. Aus praktischer Sicht ermöglicht dieser DZ-Ansatz die vorbeugende Wartung von Tunnelausrüstungen, um Ausfälle zu minimieren und die Lebensdauer von Tunneln zu verlängern. Um die Verkehrssicherheit in Tunneln zu erhöhen, wurde in der Studie von Yang et al. [46] ein DZ-basiertes Verfahren zur Betriebsüberwachung von Autobahntunneln mit Multisensoren vorgestellt. Durch den Einsatz einer multimodalen Technologie zur Informationsfusion ermöglicht sie genaue Betriebsüberwachungsdaten des Tunnelbetriebs und Analysen und unterstützt die Erkennung von Betriebsstörungen. Dies ermöglicht eine schnellere Reaktion auf Notfälle.

Digitale Zwillinge für Fahrbahnen

Die Anwendungen von DZ-Arbeiten für Fahrbahn sind vielfältig und reichen von der Herstellung der Fahrbahn [47], der Zustandsüberwachung der Fahrbahn [48], der Erhaltungsplanung [49] bis hin zur Verkehrssicherheit in Hinblick auf das automatisierte Fahren [50]. Jiang et al. [47] stellen einen Ansatz zur Erstellung des DZ einer Autobahn anhand von Kartendaten vor. Der virtuelle Teil des DZ besteht aus den primären Autobahnkomponenten, einschließlich der horizontalen und vertikalen Ausrichtung, dem Querschnitt, den Fahrspuren und den Mittelstreifen. Dadurch stellt die virtuelle Repräsentation des Autobahnabschnittes eine Basis für weitere DZ-Anwendungen dar. Ye et al. [48] präsentieren ein DZ-System für die Zustandsüberwachung der Fahrbahn. In dieser Studie wurde ein verteiltes und intelligentes Belagsüberwachungssystem mit IoT entwickelt, das ein Sensornetzwerk, eine Cloud-Plattform, ein Kommunikationsnetzwerk und ein Stromversorgungssystem umfasst (siehe Abbildung 2-7). Durch die technische Überwachung vor Ort sammelt und analysiert das System aktiv verschiedene Daten wie etwa den Energieverbrauch, die Temperatur und Luftfeuchtigkeit, den Umgebungslärm, die Windgeschwindigkeit und -richtung sowie Vibrationen der Fahrbahnstruktur. Die Daten können zur Unterstützung des Fahrbahndesigns, der Wartung und für Fahrzeug-Straßen-Interaktionen eingesetzt werden.

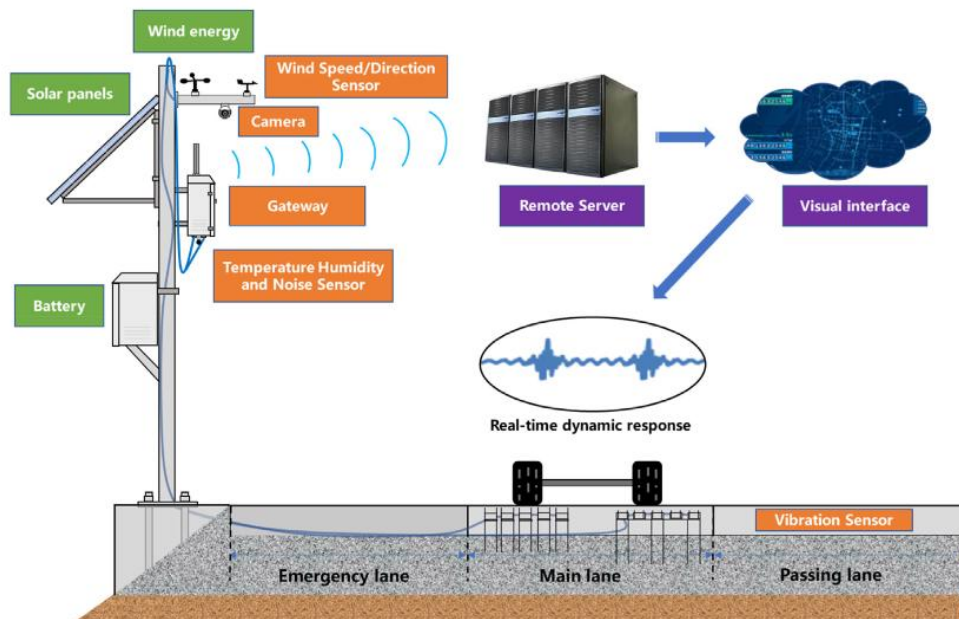


Abbildung 2-7. Schematische Darstellung des DZ für Fahrbahnüberwachung [48]

Consilvio et al. [49] stellen eine auf dem DZ basierende Systemarchitektur zur Unterstützung des Straßenbetreiber bei der Bewertung des Fahrbahnzustands und der Entscheidungsfindung für die Erhaltungsplanung von Straßen vor. Das konzeptionelle DZ-System umfasst hardwareseitig Videokameras und LIDAR Scanner zur Erfassung von Echtzeitdaten des Fahrbahnzustands auf Basis von Zustandsmerkmalen der Straßenoberflächen (Sideways Force Coefficient (SFC), International Roughness Index (IRI), visuelle Inspektionsdaten, terrestrische Inspektion mittels RGB-Kamera und Lidar sowie dynamischen Deflektometern). Mittels vordefinierter Prozesse für die Datenverarbeitung kann der Fahrzustand bewertet und die Erhaltungsmaßnahme ermittelt werden. Thonhofer et al. [50] beschäftigen sich mit der Entwicklung von DZ unter Verwendung von hochmodernen Sensortechnologien und Informationsintegration, um präzise digitale Repliken der Straßeninfrastruktur zu erstellen. Der DZ ermöglicht eine verbesserte Verkehrssicherheit durch Ansätze des kooperativen, vernetzten und automatisierten Fahrens und reaktive Maßnahmen durch Kommunikation zwischen Fahrzeugen und Infrastruktur. Darauf aufbauend können smarte Straßendienste und die Optimierung von Verkehrsflüssen in städtischen Umgebungen entwickelt werden.

2.2.2 Digitale Zwillinge im Infrastrukturbau:

Herausforderungen und Potenziale

Trotz der Vielzahl an Veröffentlichungen zu DZ im Infrastrukturbau konzentrieren sich viele Beiträge hauptsächlich auf die Zustandsbewertung [57]. Darüber hinaus beziehen sich ca. 30% der in [57] untersuchten Studien auf die Erstellung konzeptioneller DZ-Systeme, was darauf hindeutet, dass die praktische Umsetzung von DZ im Infrastrukturbereich bislang noch begrenzt ist. Weiterhin zeigen die Studien von Deng et al. [13] und Akanmu et al. [58], dass bei der Implementierung von DZ im Infrastrukturbau insbesondere die Integration bestehender Technologien und Methoden, wie beispielsweise die BIM-Methode und CPS für die Implementierung von DZ im Infrastrukturbau berücksichtigt werden.

In der Studie von Li et al. [51] wird eine dreistufige Entwicklung von DZ für die Bauwerksverwaltung und -erhaltung vorgeschlagen, wobei der Informationsumfang in enger Verbindung mit technischen, menschlichen, organisatorischen, sozialen und umweltbezogenen Aspekten steht. Die Stufe 1.0 umfasst das technische Asset Management, wie beispielsweise das Kostenmanagement von Erhaltungsmaßnahmen. Stufe 2.0 erweitert den Fokus auf eine technisch-humane Perspektive, etwa durch das Management der Arbeitssicherheit während der Erhaltungsarbeiten. Schließlich konzentriert sich Stufe 3.0 auf eine technisch-ökologische Sichtweise, einschließlich der nachhaltigen Entwicklung. Obwohl jede DZ-Stufe spezifische Problemfelder adressiert, zeigt sich deutlich, dass die Weiterentwicklung zu DZ 3.0 mit einem Schwerpunkt auf ökologische Aspekte ein offenes und komplexes Forschungsgebiet darstellt.

Hermann et al. [60] präsentieren eine Methode zur BIM-basierten Ökobilanzierung von Infrastrukturbauwerken, bei der GIS-Daten und ein Datenmodell der Ökobilanzierung mit dem BIM-Modell integriert werden, um die Analyse der CO₂-Emissionen durchzuführen und zu visualisieren. Durch diese Integration können Umweltauswertungen und CO₂-Reduktionsmaßnahmen bereits frühzeitig in die Planungsphasen des Infrastrukturbaus einbezogen werden. Raes et al. [29] stellen ein DZ-Framework vor, um verschiedene "Was-wäre-wenn"-Szenarien in Bezug auf Verkehr, Luftqualität oder Lärmbelastung im städtischen Bereich zu analysieren. Das Framework integriert Bauwerksmodelle, GIS- und Sensordaten in einer gemeinsamen Umgebung und ermöglicht dynamische Simulationen. Kaewunruen et al. [61–63] stellen lebenszyklusbasierte Nachhaltigkeitsbewertungen für den Infrastrukturbau für den schienengebundenen Verkehr und für Bahnstationsgebäude vor. Ein Ansatz zur Nachhaltigkeitsbewertung von Brückenbauwerken in der Betriebsphase auf der Grundlage eines DZ wird von Jäckel et al. [64] vorgeschlagen. Zusammenfassend ist festzustellen, dass

es insbesondere im Bereich der Straßeninfrastruktur weitere Untersuchungen und die Entwicklung von Ökobilanzen auf Basis von DZ erfordert.

2.2.3 Schlussfolgerungen für das Projekt

Diesem Forschungsprojekt wird die Definition eines DZ für das Bauwesen nach Boje et al. [2] zugrunde gelegt. Darin ist ein DZ in der Baudomäne als eine ganzheitliche, sozio-technische und prozessorientierte Darstellung von Bauwerken und deren Systemen definiert, die durch bidirektionale Datenflüsse zwischen physischen und digitalen Komponenten in Echtzeit aktualisiert wird und somit über die semantischen Möglichkeiten von BIM hinausgeht, indem dynamische Datenquellen, wie Sensor- und Steuerungssysteme, sowie urbane Artefakte integriert werden [2].

DZ bieten im Ingenieur- und Infrastrukturbau über den gesamten Lebenszyklus hinweg, von der Planung bis zum Rückbau, zahlreiche Vorteile, insbesondere durch die Prozessoptimierung und die Nutzung von Synergien mit BIM-Modellen. In der Planungsphase ermöglichen BIM-Modelle präzise Entwürfe und fundierte Entscheidungen. Während der Bauphase unterstützen DZ durch Echtzeitüberwachung und detaillierte Dokumentation des Baufortschritts, was eine verbesserte Kontrolle und Anpassung von Prozessen erlaubt. In der Nutzungsphase ermöglichen sie eine kontinuierliche Überwachung des Bauwerkszustands und eine gezielte Optimierung der Wartungsmaßnahmen. Im Rückbau bieten DZ schließlich Vorteile bei der effizienten Ressourcennutzung und der Planung von Abbruchprozessen.

Ein zunehmend wichtiger Aspekt ist die Integration von Nachhaltigkeitskonzepten, beispielsweise durch die Berechnung von CO₂-Bilanzen und die Modellierung umweltfreundlicher Bauszenarien. So können DZ dazu beitragen, Bau- und Infrastrukturbereiche effizienter, sicherer und nachhaltiger zu gestalten.

Um jedoch das volle Potenzial von DZ auszuschöpfen, sind weitergehende Entwicklungen und Standards erforderlich. Ein zentraler Forschungszweig ist dabei die tiefgreifende Einbindung von Nachhaltigkeitsaspekten, um langfristig sowohl die Akzeptanz als auch den Nutzen DZ zu steigern. Diese Aspekte werden im Folgenden weiter vertieft.

2.3 Nachhaltigkeitsbewertung für Ingenieurbauwerke

2.3.1 Grundlagen Nachhaltigkeitsanalysen

Ein Grundverständnis über die Entwicklung, die Hintergründe und Funktionsweisen von Nachhaltigkeitsanalysen ist erforderlich, um deren Anwendung im Rahmen von DZ konzeptionieren zu können. Der vorliegende Abschnitt führt in die wichtigsten Meilensteine ein und vermittelt die Denkansätze, die sich hinter den Begriffen „Nachhaltigkeit“, „nachhaltige Entwicklung“, und „Nachhaltigkeitsbewertung“ verbergen.

Die Darstellungen bauen auf der Übersicht in Zinke [52] auf und beziehen neuere Entwicklungen der letzten Jahre mit ein. Hier sind insbesondere Nachhaltigkeitsbewertungssysteme zu nennen, die einen Schwerpunkt auf die derzeit vorherrschenden politischen und gesellschaftlichen Schwerpunktthemen wie Klimaerwärmung, Kreislaufwirtschaft und Umweltberichtserstattung legen.

Die Grundlagen für das moderne Nachhaltigkeitsverständnis werden zwischen den Jahren 1970 und 1990 gelegt. In diesem Zeitraum kommt es durch umweltbezogene Forschungsprojekte, Ereignisse der Ressourcenknappheit (z. B. Ölkrise 1973) und vermehrte Umweltkatastrophen zu einer Steigerung des ökologischen Bewusstseins. Als Ergebnis dieser Entwicklung entstehen vielfältige Aktivitäten und Initiativen nicht staatlicher Organisationen und Gruppierungen. Begleitet wird dies durch unterschiedliche Regierungsinitiativen, die im Bereich der Umweltpolitik erste institutionelle Grundlagen legen, woraus sich erste umweltpolitische Instrumente entwickelt haben, wie z. B. die Umweltberichterstattung [53, 54].

In der gleichen Zeit wird der Bericht „Limits to Growth“ vom Club of Rome veröffentlicht. Der Club of Rome, 1968 in Rom gegründet, setzt sich aus Wirtschaftsführern, Politikern und Wissenschaftlern aus 53 Ländern zusammen. Die Hauptautoren Dennis und Donella Meadows und einige Wissenschaftler des Massachusetts Institute for Technology (MIT) beschreiben in ihrer Studie aus dem Jahr 1972 die Entwicklung des Systems Erde bis zum Jahr 2100. Die Prognose in dem Bericht besagt, dass die Ressourcen in den kommenden 100 Jahren verbraucht sein werden und die Weltwirtschaft zusammenbrechen wird [55]. Im Jubiläumsjahr 2022 wurde von Gaya Herrington diese Kernbotschaft bestätigt: „Ohne erhebliche Veränderungen in unseren Konsum- und Produktionsmustern wird die Menschheit voraussichtlich auf einen ökologischen Kollaps zusteuern, der bereits Mitte des 21. Jahrhunderts eintreten könnte, wenn die aktuellen Trends unverändert fortgesetzt werden“ [56].

Ab Mitte der 1980er Jahre findet eine Ausweitung der Betrachtungen statt. Als Ergebnis wird das Konfliktpotenzial zwischen den Industriestaaten und Entwicklungsländern beschrieben und die entstandenen bzw. prognostizierten sozialen und ökologischen Probleme werden in einen internationalen Kontext gestellt [53]. Hierdurch werden auch soziale Aspekte in die Betrachtungen integriert.

Die Weltkommission für Umwelt und Entwicklung (World Commission on Environment and Development, WCED) – gegründet im Jahr 1983 und unter dem Vorsitz von Gro Harlem Brundtland – veröffentlicht 1987 den sogenannten *Brundtland Bericht* [57]. Dieser Bericht trägt den Titel „Our Common Future“ und befasst sich u.a. mit dem Zusammenhang zwischen der Entwicklungs- und Umweltpolitik. In dem Bericht wird die erste allgemeingültige Definition für den Begriff der nachhaltigen Entwicklung genannt, die bis heute verwendet wird:

„Sustainable development is development that meets the needs of the present without compromising the ability of future generations to meet their own needs“.

Angetrieben durch den Brundtland Bericht, erfolgt im Jahr 1992 die Einberufung der Konferenz für Umwelt und Entwicklung der Vereinten Nationen in Rio. Auf der Konferenz sind Vertreter aus 178 Ländern anwesend. Hier findet eine Beratung über Umwelt- und Entwicklungsfragen zum 21. Jahrhundert statt. Die Konferenzergebnisse sind die Rio-Deklaration, die Agenda 21, drei verbindliche Konventionen zum Klimaschutz, zum Schutz der Biodiversität und zur Bekämpfung von Wüstenbildung beinhaltet. Die Agenda 21 ist ein Aktionsprogramm, welches die Armutsbekämpfung, die Energiepolitik, den Schutz der Ressourcen sowie politische Handlungsmöglichkeiten und Instrumente für eine nachhaltige Entwicklung behandelt [58]. Auf diese Weise wird das Zielbild des Erreichens einer nachhaltigen Entwicklung entworfen im Brundtland Bericht konkretisiert und mit spezifischen Maßnahmen versehen. Die Agenda 21 wird im Jahr 2002 beim Treffen der globalen Gemeinschaft in Johannesburg auf dem Weltgipfel für nachhaltige Entwicklung gestärkt und erweitert [59].

Die Bedeutung der Begrenzung von CO₂-Emission wurde u.a. in den beiden internationalen Umweltkonferenzen in Kyoto im Jahre 1997 und in Kopenhagen im Jahre 2009 adressiert. Hier werden politische Maßnahmen zur Senkung der schädlichen Auswirkungen auf die Umwelt beschlossen. Hiermit im Zusammenhang sollte auch der Bericht „The Economics of Climate Change“ von Nicolas Stern aus dem Jahr 2006 interpretiert werden. Hierin fand ein Vergleich der Folgen der Klimaveränderung in unterschiedlichen Szenarien mit dem Handeln „business as usual“ statt. Die zentrale Aussage des Berichts besagt, dass der internationale

Nutzen früh entschiedener Maßnahmen zur Minimierung der Auswirkungen des Klimawandels dessen Ausgaben bzw. den Aufwand übersteigt [60].

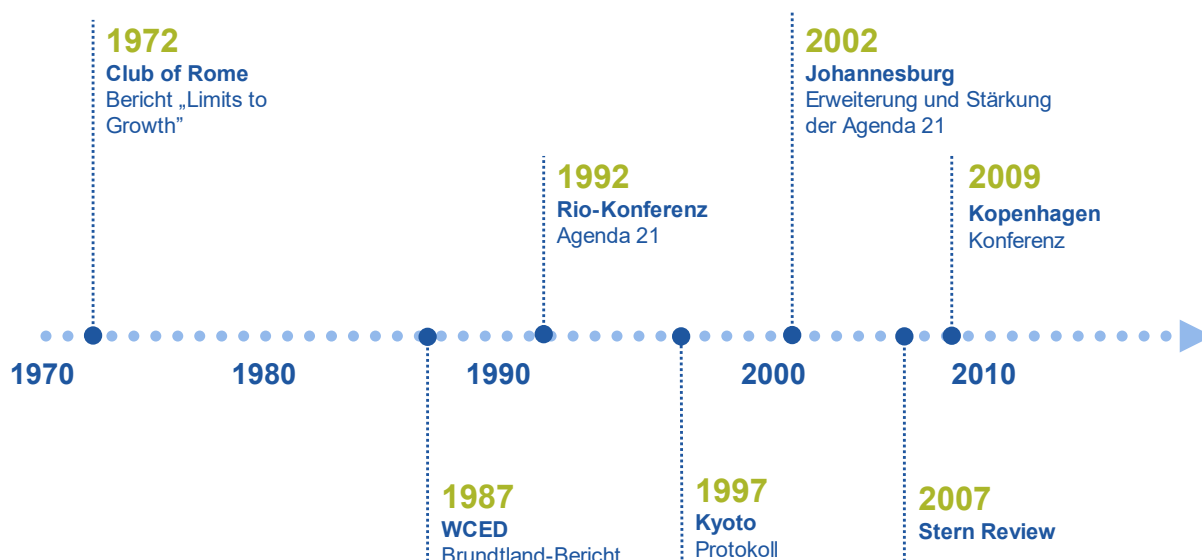


Abbildung 2-8. Meilensteine der übergeordneten Nachhaltigkeitsentwicklung in Bezug auf Konferenzen und Berichte

2.3.1.1 Definition Nachhaltigkeit und nachhaltige Entwicklung

Die im vorherigen Abschnitt beschriebenen politischen Initiativen und Aktivitäten haben einen organisatorisch-politischen Rahmen geschaffen, innerhalb dessen das Ziel der Nachhaltigkeit erreicht werden soll. Alle konkreten Maßnahmen, die zu diesem Ziel der Nachhaltigkeit beitragen, sind Bestandteil einer nachhaltigen Entwicklung. Eine nachhaltige Entwicklung ist damit ein Prozess, der mit spezifischen Aktivitäten bespielt werden muss [52].

Um Handlungsmaßnahmen definieren zu können, fand in den 1990er Jahren eine intensive Diskussion statt, wie das Zielbild Nachhaltigkeit konkretisiert werden kann. In diesem Rahmen initiiert der Verband der Chemischen Industrie ein Diskursprojekt, in dem die Idee der integrativen Betrachtung von wirtschaftlichen, ökologischen und sozialen Aspekten entwickelt wurde [61]. Die Konzeption von drei Nachhaltigkeitssäulen bzw. Nachhaltigkeitsdimensionen ist ebenfalls vom Sachverständigenrat für Umweltfragen adressiert worden [62]. Heutzutage ist das Dreisäulenmodell als international anerkanntes Instrument für Nachhaltigkeitsanalysen einzustufen und findet auch im Bauwesen Anwendung.

Das Bauwesen ist verantwortlich für einen großen Anteil des deutschen Ressourcenverbrauchs. Im Jahr 2021 entfielen 38 % des Rohstoffkonsums auf den Bausektor [63]. Aus diesem Grund können Maßnahmen im Bausektor, die zu der Umsetzung einer nachhaltigen Entwicklung beitragen, einen großen Beitrag zur nachhaltigen Entwicklung

leisten. Im Bauwesen sind für die einzelnen Bewertungsgegenstände (einzelne Bauwerke, Quartiere, Streckenzüge) individuelle Nachhaltigkeitsbewertungssysteme entwickelt worden, die die Anforderungen von Bauwerken und Infrastrukturen spezifisch berücksichtigen. Diese Instrumente werden für Hochbauten bereits standardmäßig eingesetzt, für Infrastrukturbauwerke ist die Verbreitung bisher sehr begrenzt. Die Funktionsweise der Nachhaltigkeitsbewertungssysteme wird in Abschnitt 2.3.2 beschrieben, die für Infrastrukturen existierenden Besonderheiten im nachfolgenden Abschnitt.

2.3.1.2 Besonderheiten der Nachhaltigkeitsanalyse von Infrastrukturbauwerken

Eine Nachhaltigkeitsbewertung kann grundsätzlich in allen Phasen des Lebenszyklus stattfinden. Es haben sich in den letzten zehn Jahren allerdings zwei Hauptbewertungszeitpunkte herauskristallisiert:

- Bewertung eines Assets in einer frühen Planungsphase zur Unterstützung der Entscheidungsfindung im Rahmen der Definition von Entwurfsgrundlagen und dem Vergleich von Entwurfsvarianten
- Bewertung eines Assets nach der Baufertigstellung mit dem Ziel der Vergabe eines Gütesiegels bzw. Labels, das die Qualität in Bezug auf die Erreichung von Nachhaltigkeitszielen einstuft.

Für Infrastrukturen, die sich in der Regel im Besitz der öffentlichen Hand befinden, erzeugt die Vergabe eines Gütesiegels nur geringfügige bis keine Vorteile. Dies wird insbesondere in BAST-Bericht V 271 [64] herausgestellt. Vorschläge von Nachhaltigkeitsbewertungssysteme wie von Graubner und Mieleke [65] haben sich folglich in der praktischen Anwendung nicht durchgesetzt. Daher ist die planungsbegleitende (und in Erweiterung die betriebsbegleitende) Nachhaltigkeitsanalyse und -bewertung zu forcieren und hierfür sind geeignete Indikatoren und Bewertungsmethoden einzusetzen.

Infrastrukturen sind i.d.R. in ein übergeordnetes Netz eingebunden und vor allem bei Verkehrsinfrastrukturen entstehen bei Maßnahmendurchführung immer Wechselwirkungen mit den Verkehrsteilnehmenden. Diese Randbedingungen führen dazu, dass zum einen die Systemgrenzen gegenüber einer reinen bauwerksbezogenen Analyse erweitert werden sollten. Es werden damit – je nach Bewertungsgegenstand – die direkt betroffenen Streckenzüge oder sogar ein Verkehrsnetz berücksichtigt. Auf diese Weise werden Verkehrsumlagerungseffekte, Staus, veränderte Reisezeiten, etc. in die Entscheidungsfindung einbezogen [66]. Die dabei verwendete Methodik basiert regelmäßig

auf der externen Kostenrechnung. Hierbei werden verschiedene Arten von externen Effekten von Baumaßnahmen auf den Verkehr, die Anwohnenden und die Gesellschaft monetarisiert und vergleichbar gemacht. Die Ergebnisse sind immer von den individuellen Standortbedingungen abhängig, weswegen immer eine einzelfallbezogene Analyse stattfinden sollte [67].

Vor allem das Vorliegen von externen Kosten, die die direkten, bauwerksbezogenen Kosten vor allem bei vielbefahrenen Autobahnen deutlich übersteigen können, erfordert eine gegenüber dem Hochbau angepasste Nachhaltigkeitsanalyse. Nur hierdurch können gesamtwirtschaftlich optimierte Planungsvarianten identifiziert werden.

Eine Methode zur BIM-basierten Ökobilanzierung für Infrastrukturbauwerke wurde von Hermann et al. [68] vorgestellt. Dabei werden GIS-Daten und ein Datenmodell der Ökobilanzierung mit dem BIM-Modell integriert, um die Analyse der Ökobilanz bezüglich der CO₂-Emission durchzuführen und zu visualisieren. So können die Auswertungen von Ökobilanzen und Umweltschutzmaßnahmen zur CO₂-Reduzierung frühzeitig in die Planungsphasen für den Infrastrukturbau integriert werden. Raes et al. [38] stellen ein DZ-Framework vor, um verschiedene "Was-wäre-wenn"-Szenarien in Bezug auf Verkehr, Luftqualität oder Lärmbelastung im städtischen Bereich zu analysieren. Das Framework integriert Bauwerksmodelle, GIS- und Sensordaten in einer gemeinsamen Umgebung und ermöglicht dynamische Simulationen. Kaewunruen et al. [69–71] stellen lebenszyklusbasierte Nachhaltigkeitsbewertungen für den Infrastrukturbau für den schienengebundenen Verkehr und für Bahnstationsgebäude vor. Ein Ansatz zur Nachhaltigkeitsbewertung von Brückenbauwerken in der Betriebsphase auf der Grundlage eines DZ wird von Jäckel et al. [72] vorgeschlagen. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass es insbesondere im Bereich der Straßeninfrastruktur weitere Untersuchungen und die Entwicklung von Ökobilanzen auf Basis von DZ erfordert.

Diesen Ansätzen zugrunde liegen jeweils die Operationalisierung über quantifizierbare Indikatoren, auf die im Folgenden noch eingegangen wird.

2.3.1.3 Existierende Normen im Bauwesen

Die Normungsaktivitäten im Bereich der übergeordneten Nachhaltigkeit finden vorwiegend auf internationaler Ebene (ISO-Normung) und auf europäischer Ebene (CEN-Normung) statt. Es hat sich in den letzten 15 Jahren eine Vielzahl an Normungsdokumenten entwickelt, die die Systematik der drei Nachhaltigkeitssäulen aufgreift und um technische und funktionale Aspekte ergänzt, um die Besonderheiten des Bauwesens besser abbilden zu können. Eine

Übersicht der wichtigsten Normungsdokumente mit einem direkten Bezug zur Nachhaltigkeitsbewertung findet sich in Abbildung 2-9.

Ebene des Rahmen-dokuments	Bewertung der Nachhaltigkeit			Technische Eigenschaften	Funktionalität
	prEN 15643 (Überarbeitungen von EN 15643-1...5) Nachhaltigkeit von Bauwerken — Allgemeine Rahmenbedingungen zur Bewertung von Gebäuden und Ingenieurbauwerken			Planung der Lebensdauer – Grundlagen ISO 15686-1	(Siehe Anmerkung 2)
Bauwerks-ebene	prEN 15978-1 (EN 15978 rev) Bewertung der umweltbezogenen Qualität von Gebäuden	prEN 15978-2 (EN 16309 rev) Bewertung der sozialen Qualität von Gebäuden	prEN 15978-3 (EN 16627 rev) Bewertung der ökonomischen Qualität von Gebäuden	EN ISO 52000 Energieeffizienz von Gebäuden	
	prEN 17680 Bewertung des Potentials zur nachhaltigen Sanierung von Gebäuden				
	prEN 17472 Bewertung der Nachhaltigkeit von Ingenieurbauwerken				
Produkt-ebene	EN 15804 + A2 Umweltproduktdeklarationen — Grundregeln für die Produktkategorie Bauprodukte			Verfahren zur Voraussage der Lebensdauer ISO 15686-2	
	prEN 15942 rev Kommunikationsformate zwischen Unternehmen			Rückmeldung aus der Praxis ISO 15686-7	
	prEN 15941 rev Datenqualität			Referenznutzungs-dauer und Bestimmung der Nutzungsdauer ISO 15686-8	
	prEN 17672 Kommunikationsformate von Unternehmen an Verbraucher				
	prEN ISO 22057 Datenvorlagen für die Verwendung von EPDs für Bauprodukte in BIM				
	CEN/TR 16790 Leitfaden für EN 15804				
	CEN/TR 17005 Zusätzliche Indikatoren				

Abbildung 2-9. Arbeitsprogramm CEN/TC 350 und Nennung von wichtigen ISO-Standards [73]

Es ist erkennbar, dass die Dokumente in drei Kategorien klassifiziert werden, wobei Rahmendokumente (Frameworkdokumente) sowie Standards zur Anwendung auf Bauwerksebene und Produktebene unterschieden werden. Hierdurch wird gleichzeitig eine Vorgabe für die Systemgrenzen, innerhalb derer die entsprechenden Standards verwendet werden sollen, vorgegeben.

Der schweizerische Ingenieur- und Architektenverein SIA stellt mit der Norm SIA 112/2 “Nachhaltiges Bauen - Tiefbau und Infrastrukturen” [74] ein Werk für den Tiefbau und den Infrastrukturbau zur Verfügung, das kompatibel mit einer ganzen Reihe an VSS und europäischen Normen ist (insbesondere SN EN 15804 sowie ISO 15686-1).

Normen geben Hinweise auf zu berücksichtigende Indikatoren sowie Berechnungsmethoden. Die konkrete Ausgestaltung von Nachhaltigkeitsbewertungssystemen wird nicht normativ vorgegeben, sondern von Systemanbietern erarbeitet. Aus diesem Grund wird im nächsten Abschnitt auf die Grundlagen der Ausbildung von Nachhaltigkeitsbewertungssystemen eingegangen.

2.3.2 Methodik der Nachhaltigkeitsanalyse und -bewertung

Grundsätzlich sind die beiden Begriffe der Analyse und Bewertung zu unterscheiden. Für nachhaltigkeitsrelevante Untersuchungen wird von einer Analyse gesprochen, wenn einzelne Indikatoren nach festgelegten Berechnungsmethoden berechnet und in die Entscheidungsfindung eingebunden werden. Erst wenn eine Gegenüberstellung der Berechnungsergebnisse mit einem Vergleichswert (Benchmark) stattfindet und auf einer vorab definierten Skala eingeordnet wird, erfolgt im eigentlichen Sinne eine Nachhaltigkeitsbewertung.

Nachhaltigkeitsbewertungen sind immer an einzelne Nachhaltigkeitsbewertungssysteme gebunden, die in sich eine feste Struktur besitzen. Eine Übersicht der für Infrastrukturen existierenden Nachhaltigkeitsbewertungssysteme findet sich in Abschnitt 2.3.3. Die dort aufgeführten Systeme verwenden die im Folgenden vorgestellte Systematik für die Erzeugung der Bewertungsergebnisse.

2.3.2.1 Indikatoren und Indikatorensysteme

Indikatoren werden im Bereich der Nachhaltigkeitsanalyse verwendet, um einen Sachverhalt in der realen Umwelt abzubilden und messbar zu machen, ohne die Kernaussage zu verfälschen [75]. Es existiert derzeit keine einheitliche Definition in baubezogenen Normen, die grundlegend beschriebenen Inhalte sind allerdings in den verschiedenen Normen vergleichbar (z. B. DIN EN ISO 14050 [76] und ISO 21929-1 [77]).

Im Rahmen dieses Forschungsprojekts wird folgende allgemeingültige Definition für einen Indikator verwendet, die auf den beiden genannten Normen aufbaut:

Ein Indikator ist eine Kenngröße, um einen komplexen Sachverhalt vereinfacht darzustellen und messbar zu machen, ohne die Kernaussage zu verfälschen.

Indikatoren erzeugen Kenngrößen, die jeweils einen Einzelaspekt abbilden. Um mehrere Einzelaspekte zusammen bewerten zu können, muss eine Zusammenführung von Einzelindikatoren erfolgen. Dies geschieht, indem die einzelnen Indikatoren in verschiedenen Klassen zusammengeführt werden; diese werden im deutschsprachigen Raum als Kriterien oder Kriteriengruppen beschrieben. Die einzelnen Kriterien einer Nachhaltigkeitsdimension können wiederum zu Dimensionsergebnissen aggregiert werden. Wenn alle Ergebnisse in den Nachhaltigkeitsdimensionen zu einem Gesamtergebnis (Index) zusammengeführt werden, entsteht ein Gesamtergebnis, das wiederum auf einer Skala (z. B. Gold, Silber,

Bronze) beurteilt werden kann [78]. Die Systematik der Zusammenführung mit den jeweils erforderlichen Aktivitäten ist in Abbildung 2-10 zusammengefasst.

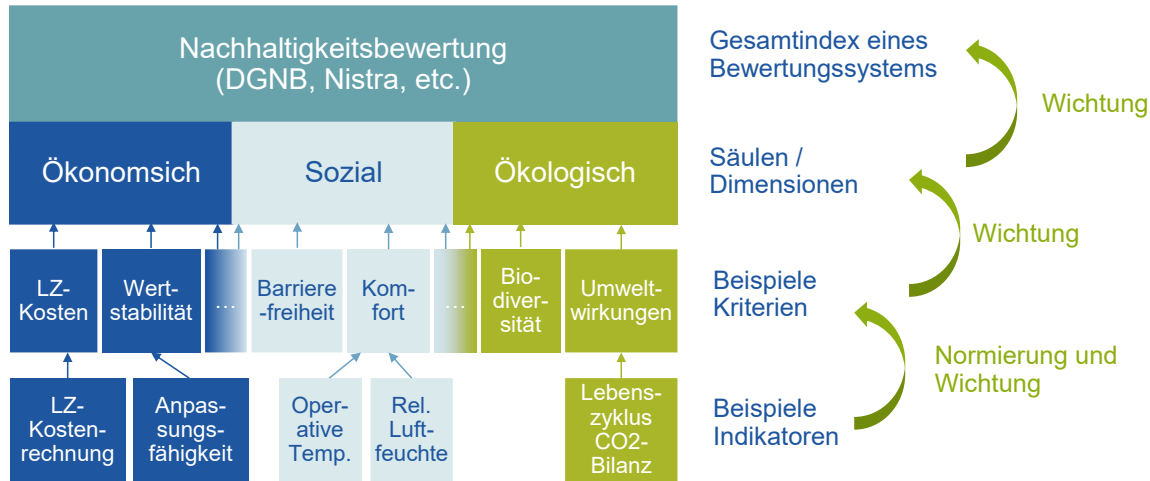


Abbildung 2-10. Qualitative Darstellung der Funktionsweise von Bewertungssystemen zur Berechnung von Indizes unter Verwendung von Indikatoren, Kriterien, Nachhaltigkeitsdimensionen

2.3.2.2 Lebenszyklus

Im Rahmen von Nachhaltigkeitsanalysen werden grundsätzlich die Auswirkungen im gesamten Lebenszyklus des Betrachtungsgegenstandes berücksichtigt, um alle relevanten Einflüsse zu erfassen und in die Bewertungen miteinzubeziehen. Ausnahmen hiervon sind zu dokumentieren und im Rahmen der Beschreibung der zeitlichen Systemgrenzen zu beschreiben. Der Lebenszyklusgedanke ist in den normativen Frameworkdokumenten verankert (z. B. DIN EN 15643 [73] und ISO/TS 21929-2 [79]). In Abbildung 2-11 ist die Systematik der Lebenszyklusphaseneinteilung zusammengefasst.

Es ist zu erkennen, dass drei grundsätzliche Lebenszyklusphasen verwendet werden, die je nach durchzuführenden Maßnahmen weiter untergliedert werden können. Die Untersuchungsschwerpunkte dieses Forschungsprojekts liegen in der Nutzungs- und Rückbau-/Entsorgungsphase.

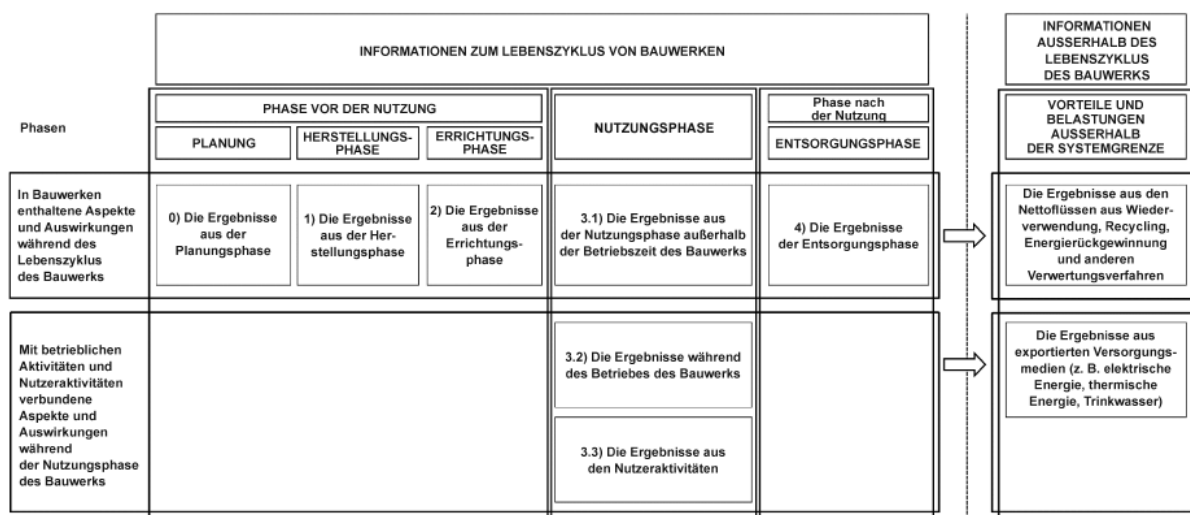


Abbildung 2-11. Gliederungssystematik für die Ergebnisdarstellung im gesamten Lebenszyklus eines Bauwerks [73]

Die Schweizer SIA normiert den Lebenszyklus eines Bauprojektes in den Normen SIA 103 und SIA 112 sowie verschiedenen VSS Normen. Die grundsätzliche Phasenzuordnung ist in Abbildung 2-12 dargestellt.

Phasen und Modulinhalte nach SIA 112 und SIA 103		Analog verwendete Phasenbezeichnungen		
		Bundesamt für Strassen (ASTRA)	Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS)	Eidg. Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation (UVEK)
6 Bewirtschaftung				
61 Betrieb	■ Massnahmen für Sicherstellung und Optimierung des Betriebs		Betriebsetappe (SN 640032)	
62 Überwachung, Überprüfung, Wartung	■ Massnahmen für die Wartung		Erhaltungs- etappe (SN 640032)	
63 Instandhaltung	■ Massnahmen für die Instandhaltung		Erhaltungs- etappe (SN 640032)	

Abbildung 2-12. Übertragung auf andere Phasengliederungen [74]

2.3.3 Bewertungsansätze für Infrastrukturen und Ingenieurbauwerke auf Projektebene

Die Bedeutung von Nachhaltigkeitsbewertungen in der Infrastruktur- und Bauindustrie wächst kontinuierlich. Rahmenwerke wie BREEAM, ENVISION und ISO 14001 sowie spezielle Systeme wie der CO₂-Fußabdruck oder der Hydropower Sustainability Standard setzen weltweit anerkannte Standards. Diese Bewertungssysteme berücksichtigen wirtschaftliche, soziale und ökologische Aspekte entlang des gesamten Bauwerkslebenszyklus. Die Verwendung einer Vielzahl an Einzelindikatoren in Nachhaltigkeitsbewertungssystemen und zentralen Leistungsindikatoren (Key Performance Indicators - KPI) in für spezifische Entscheidungsunterstützungsaufgaben ausgerichteten Ansätzen ermöglicht eine qualitative und teilweise quantitative Bewertung der Nachhaltigkeitsdimensionen. Die genaue Ausgestaltung eines Bewertungssystems oder einer Indikatorensammlung hängt von den Bewertungszielen und dem Projektkontext ab. Trotz variabler Ausgestaltung haben diese Ansätze gemeinsam, dass sie versuchen, die Komplexität der Nachhaltigkeit durch die Identifizierung stufenweiser Bereiche zu bewältigen.

In bestehenden Ansätzen verwendete Kategorien und Kriterien zur Nachhaltigkeitsbewertung von Infrastrukturprojekten sind in Tabelle 1 zusammengefasst. Es werden nur die etablierten und für den deutschsprachigen Raum relevanten Ansätze aufgeführt. Weitere existierende Ansätze verwenden keine zusätzlichen Kriterien, sondern jeweils eine Auswahl der in Tabelle 1 aufgeführten Kriterien.

Tabelle 1. Vergleich verwendeter Kategorien in internationalen Nachhaltigkeitsbewertungssystemen und -ansätzen

Hauptkategorie von Nachhaltigkeit	Beschreibung	DGNB Infrastruktur (DE)	BAST (DE)	ENVISION	BREEAM	Shen et al (2011)	NNBS	NISTRA	LCCO2 & LZ Infra
Ressourcen: Einsatz, Nutzung, Verbrauch (ökologische Nachhaltigkeit)	Optimierung der Ressourcennutzung, Prinzipien der Kreislaufwirtschaft, Minimierung der ökologischen Auswirkungen.	- Ökobilanz - Verantwortliche Ressourcengewinnung - Wasserkreislaufsysteme - Rückbau- und Recycling-freundlichkeit	- Ressourceninanspruchnahme und Abfallaufkommen	- Materialien - Wasser - Energie	- Ressourceneffizienz - Bauprodukten - Kreislaufwirtschaftliche Nutzung von Produkten - Beschaffung - Abfall - Energie- und Wasserverbrauch	- Erschöpfung der abiotischen Ressourcen - Wasserknappheit	- Rohstoffe, Energie und Boden	- Umwelt (Bodenversiegelung)	- Materialien - Wasser - Energie - Ressourcen - Bauprodukten - Kreislaufwirtschaft - Nutzung von Produkten - Beschaffung - Abfall
Natürliche Umwelt: Arten, Lebensräume, Biodiversität (ökologische Nachhaltigkeit)	Auswirkung auf Arten, Lebensräume, Arten und natürliche Systeme; Einsatz naturfreundlicher Technologien; Schadensbegrenzung	- Flächeninanspruchnahme - Biodiversität	- Wirkung auf die globale Umwelt - Risiken für die lokale Umwelt	- Standort - Naturschutz - Ökologie	- Landnutzung - Boden - Biologische Vielfalt - Landschaft - Kulturgüter - Wasserverschmutzung - Luft-, Lärm- und Lichtverschmutzung	- Versauerungspotenzial (AP) - Eutrophierungspotential (EP)	- Natur und Umwelt	- Umwelt (Lebensräume und Gewässer)	- Standort - Naturschutz - Ökologie
Klima und Resilienz (ökologische Nachhaltigkeit)	Klimaauswirkungen, Gefahrenprävention, Risikominderung	- Resilienz und Wandlungsfähigkeit - Umweltrisiken - Mikroklima	- Umnutzungsfähigkeit - Risiken für die lokale Umwelt	- Emissionen - Resilienz	- Reduktion Emissionen - Risk assessment and Minderung - Naturgefahren - Künftige Bedürfnisse	- Ozonabbaupotenzial (ODP) - GWP (Globales Erwärmungspotential) aus diversen Quellen	- Gefahrenprävention - Umwelt (Beeinträchtigung des Klimas)	- Umwelt (Klimabelastung)	- Umwelt (Klimabelastung)
Planung/Gestaltung für Nachhaltigkeit (sozio-ökonomische Nachhaltigkeit)	Planung finanzieller Aspekte, Innovation und Leadership, Alternativen-evaluation, Innovation, Raumplanung	- Lebenszykluskosten - Integration in die Umgebung - Smart Infrastructure - Integrale Planung - Baustelle / Bauprozess - Qualitätssicherung und Monitoring	- Direkte baubezogene Kosten im Lebenszyklus - Qualität der technischen Ausführung - Qualität der technischen Bauausführung	- Planung Ökonomie (Leadership)	- Nachhaltigkeit in der Führung - Umweltmanagement - Baumanagement - Lebenszykluskostenrechnung - Wirtschaftlicher Zusatznutzen		- Transversale Themen - Raumplanung und Siedlung - Betriebswirtschaft - Volkswirtschaft - Finanzierung	- Direkte Kosten - Siedlungsentwicklung - Realisierung und Kohärenz	- Lebenszykluskostenrechnung - Wirtschaftlicher Zusatznutzen
Stakeholder: Zusammenarbeit, Engagement, Gesundheit, Sicherheit (soziale Nachhaltigkeit)	Projektbeteiligte: Zusammenarbeit, Sicherheit, Gesundheit, Wohlbefinden, Mobilitätsbedürfnisse	- Emissionen / Immissionen - Barrierefreiheit - Komfort - Mobilitätsinfrastruktur - Partizipation	- Umweltauswirkungen infolge Verkehrsbeeinträchtigungen - Externe Kosten infolge von baubedingten Verkehrsbeeinträchtigungen - Lärmschutz, Komfort	- Wohlbefinden - Mobilität - Gemeinschaft (Quality of Life) - Zusammenarbeit	- Konsultation, Engagement - Sozialer Zusatznutzen - Verkehrsnetze - Baulogistik - Soziales für Personal und Lieferkette	- Human und andere Toxizitäten - Gesundheitsschädigende Wirkungen	- Gemeinschaft - Gesundheit und Sicherheit - Raumplanung und Siedlung	- Verkehrsqualität - Sicherheit - Umwelt (Lärm, Luftbelastung)	- Verkehrsqualität - Sicherheit - Umwelt (Lärm, Luftbelastung)

2.3.3.1 Internationale Ansätze

In der Infrastrukturbranche treibt ein Wandel hin zur Nachhaltigkeit, bedingt durch staatliche Vorgaben und das Engagement von Interessengruppen, die Standardisierung von Ansätzen für alle Projekte voran. Diverse Zertifizierungsprogramme und -standards zielen darauf ab, Umweltauswirkungen zu mindern, soziale Verantwortung zu fördern und wirtschaftlichen Nutzen zu maximieren. Diese Systeme bieten einen gemeinsamen Bewertungsmaßstab, fördern den Wissensaustausch und verbessern die Leistung. Durch die Integration von Nachhaltigkeitsprotokollen erleichtern führende Plattformen die Projektentwicklung und -überarbeitung. Internationale Leitfäden wie BREEAM, ENVISION, LEED und das Infrastructure Sustainability Rating berücksichtigen ökologische, soziale und wirtschaftliche Aspekte in allen Projektphasen. Bewertungsinstrumente bieten Projektteams entscheidende Unterstützung und bieten mehrere Vorteile:

- Erleichterung einer fundierten Entscheidungsfindung: Bereitstellung eines strukturierten Rahmens für den Dialog mit den Beteiligten, Beschleunigung der Umsetzung, Verringerung von Streitigkeiten und Förderung nachhaltiger Praktiken.
- Förderung von nachhaltigen Entscheidungen: Ermutigung zu ökologischer und sozialer Verantwortung und Förderung von kreativen Diskussionen innerhalb des Teams.
- Eine Schlüsselrolle bei der Kosten-Nutzen-Bewertung spielen: Während des gesamten Projektlebenszyklus, von der Standortwahl bis zur Stilllegung.
- Bereitstellung praktischer Anleitungen: Präsentation von realen Projekten und bewährten Praktiken im Bereich der Nachhaltigkeit.
- Verbesserung der Reputation: Unabhängige Bestätigung des Engagements für Nachhaltigkeitsziele.

BREEAM (Building Research Establishment Environmental Assessment Method)

BREEAM Infrastructure, zuvor bekannt als CEEQUAL, ist ein Nachhaltigkeitsbewertungs- und Ratingsystem des britischen Building Research Establishment [80]. Es bewertet wirtschaftliche, ökologische und soziale Aspekte von Tiefbauprojekten und -verträgen. Der Rahmen des Bewertungssystems unterstützt nachhaltige Praktiken in den Bereichen Entwurf, Strategie, Umsetzung und Management. Dabei legt es besonderen Wert auf die Entwicklung und Umsetzung einer nachhaltigen Strategie sowie auf kontinuierliche Verbesserungen.

Das Zertifizierungssystem erlaubt die Bewertung verschiedener Lebenszyklusphasen des Projekts und umfasst acht Nachhaltigkeitskategorien mit jeweiligem Gewicht.

Leistungsniveaus innerhalb jeder Kategorie werden definiert und anhand von Projektinformationen bewertet. Die erreichte Leistung bestimmt die Bewertung des Projekts.

Stärken von BREEAM Infrastructure sind folgende

- Flexibler Rahmen: Mit seinem dynamischen Ansatz verzichtet BREEAM Infrastructure auf starre Metriken und feste KPIs und legt den Schwerpunkt auf Flexibilität zur Anpassung an unterschiedliche Projektanforderungen. Durch die Betonung von SMART-Zielen für die Nachhaltigkeit bietet es maßgeschneiderte Anleitungen für jede Projektphase, von der Strategieformulierung bis zur Umsetzung, und gewährleistet die Ausrichtung auf spezifische Ziele und kontextbezogene Faktoren.
- Bezugnahme auf etablierte Standards: BREEAM Infrastructure stützt sich auf etablierte Rahmenwerke, um die Einhaltung und Ausrichtung zu gewährleisten. So werden beispielsweise für den Bereich "Luft, Lärm und Verschmutzung" praktische Umsetzungshilfen aus Quellen wie dem "CIRIA Environmental good practice on site guide" empfohlen. Auch für die Reduzierung der Kohlenstoffemissionen während der gesamten Lebensdauer wird die Einhaltung der PAS 2080 empfohlen, die das Kohlenstoffmanagement während des gesamten Lebenszyklus der Infrastruktur unterstützt.

Weitere Informationen und Angaben sind zugänglich über die Webseite von BREEAM Infrastructure [80].

Envision Certification

Das Envision Sustainability Framework [81], entwickelt vom US-basierten Institute for Sustainable Infrastructure (ISI), strebt an, Nachhaltigkeit, Widerstandsfähigkeit und Gerechtigkeit bei zivilen Infrastrukturprojekten zu verbessern. Ursprünglich in den USA und Kanada eingeführt, sind Envision-zertifizierte Projekte weltweit gefragt, mit derzeit 344 Projekten in verschiedenen Entwicklungsstadien. Die Zertifizierung erstreckt sich auf verschiedene Infrastrukturtypen wie Straßen, Brücken, Flughäfen und Dämme.

Dieser Rahmen dient als Leitfaden und bietet umfassende Kriterien und Ziele für Fachleute, Unternehmen, Regierungsbehörden und Bürger, die an der Entwicklung nachhaltiger Projekte beteiligt sind. Es umfasst Projektregistrierung, unabhängige Drittparteienüberprüfung und Zertifizierung. Anhand von 64 Nachhaltigkeitskriterien in fünf Kategorien - Lebensqualität, Führung, Ressourcennutzung, natürliche Umwelt sowie Klima und Risiken - bewertet Envision Bereiche wie menschliches Wohlbefinden, Mobilität, Energie, Wasser und

Widerstandsfähigkeit. Die Zertifizierungsstufen, von Verified bis Platin, basieren auf der Gesamtpunktzahl im Verhältnis zur maximal erreichbaren Punktzahl, mit zusätzlichen Anerkennungspunkten für Innovation oder außergewöhnliche Leistung.

Besondere Merkmale des Envision-Protokolls sind:

- **Stakeholder-Einbindung:** Envision legt großen Wert darauf, Interessengruppen wie Gemeindemitglieder, Branchenexperten und Projektbeteiligte während des gesamten Projektlebenszyklus einzubeziehen. Dies gewährleistet die Berücksichtigung verschiedener Perspektiven und führt zu sozial verantwortlichen und lokal akzeptierten Infrastrukturprojekten.
- **Leistungsorientierte Metriken:** Envision bietet klare Leistungsniveaus und präzise Anleitungen für Projektteams, um kreative Lösungen für Nachhaltigkeitsherausforderungen zu entwickeln und umzusetzen. Dieser Ansatz erleichtert die Verbesserung der Projektleistung, indem er von bloßer Verbesserung auf ein restauratives Niveau übergeht.

KLIMA UND RESILIENZ: EMISSIONEN

26

PUNKTE

ABSICHT

Treibhausgasemissionen während des Betriebs des Projekts reduzieren und damit den projektbezogenen Beitrag zum Klimawandel verringern.

KENNZAHL

Prozentuale Reduktion der operativen Treibhausgasemissionen gegenüber dem Referenzwert.

LEISTUNGSSTUFEN

8	13	18	22	26
VERBESSERT	ERWEITERT	HERVORRAGEND	BEWAHREND	REGENERATIV
A + B	A + B	A + B	A + B	A + B
(A) Mind. 10 % Reduktion Das Projektteam weist mindestens 10 % Reduktion der gesamten CO₂e-Emissionen über die Betriebsdauer des Projekts im Vergleich zum Referenzwert nach. Berechnungen sind in Tonnen CO₂e anzugeben.	(A) Mind. 25 % Reduktion Das Projektteam weist mindestens 25 % Reduktion der gesamten CO₂e-Emissionen über die Betriebsdauer des Projekts im Vergleich zum Referenzwert nach. Berechnungen sind in Tonnen CO₂e anzugeben.	(A) Mind. 50 % Reduktion Das Projektteam weist mindestens 50 % Reduktion der gesamten CO₂e-Emissionen über die Betriebsdauer des Projekts im Vergleich zum Referenzwert nach. Berechnungen sind in Tonnen CO₂e anzugeben.	(A) 100 % Reduktion Das Projektteam weist eine 100%ige Reduktion der gesamten CO₂e-Emissionen über die Betriebsdauer des Projekts im Vergleich zum Referenzwert nach. Berechnungen sind in Tonnen CO₂e anzugeben.	(A) Kohlenstoffnegativ Das fertiggestellte Projekt ist kohlenstoffnegativ (d. h. es bindet bzw. entfernt mehr CO₂e, als es während der Betriebsdauer erzeugt).
(B) Gesamtemissionen erfassen und berichten Das Projektteam erfasst und berechnet die gesamten jährlichen Treibhausgasemissionen des endgültigen Projektentwurfs zu Berichtszwecken. Dies umfasst direkte und indirekte Treibhausgasemissionen sowie projektbezogene Sequestrierungen. Berechnungen sind in Tonnen CO₂e anzugeben.				

Abbildung 2-13.

Beispiel einer smarten Metrik aus der Envision-Zertifizierung. Envision bietet auch smarte KPIs zur Reduzierung von Emissionen (siehe Abbildung 2-13).

Abbildung 2-13. Beispiel einer smarten Metrik aus der Envision-Zertifizierung. Envision bietet auch smarte KPIs zur Reduzierung von Emissionen (siehe Abbildung 2-13).

Abbildung 2-13. Beispiel einer smarten Metrik aus der Envision Zertifizierung

Envision bietet auch smarte KPIs zur Reduzierung von Emissionen (siehe Abbildung 2-13), die kurz- und langfristig zum Klimawandel und anderen Risiken beitragen könnten. Es umfasst zwei Berechnungen:

- Eine prozentuale Verringerung des Nettokohlenstoffs der Materialien (in Tonnen CO₂-Emissionen) über die Lebensdauer des Projekts im Vergleich zum Ausgangswert.

- Eine prozentuale Verringerung der Gesamt-CO₂-Emissionen während der Betriebsdauer des Projekts im Vergleich zur Basislinie Materialien (in Tonnen CO₂-Emissionen)

Weitere internationale Bewertungsansätze

FAST Infrastructure (früher: SuRe® (Sustainability Resilient)) der Global Infrastructure Basel Foundation (GIB, CH)

SuRe® ist ein globaler, freiwilliger Standard für nachhaltige und resiliente Infrastruktur, der im Rahmen eines Multi-Stakeholder-Ansatzes entwickelt wurde [82]. Er integriert Beiträge aus Industrie- und Schwellenländern und fördert die Einbeziehung von Nachhaltigkeits- und Resilienzaspekten in die Infrastrukturentwicklung und -modernisierung. SuRe® dient als gemeinsames Sprachwerkzeug für Entwickler von Infrastrukturprojekten, Finanziers und Institutionen des öffentlichen Sektors.

Die Zertifizierungs- und Akkreditierungsanforderungen von SuRe® basieren auf der ISO 17021 und spiegeln deren Überschriften wider.

Das Label wurde von einer Arbeitsgruppe mehrerer Interessengruppen unter der Leitung der Global Infrastructure Facility Basel (GIF) und Macquarie im Rahmen der FAST-Initiative entwickelt, die aus einer Zusammenarbeit zwischen HSBC, der OECD, der IFC, GIF und der Climate Policy Initiative (CPI) hervorgegangen ist und ist die Ablösung der SuRe® Initiative.

Australien: Infrastructure Sustainability Council: Rating Tool

Die australisch-neuseeländische Organisation ist erste Anlaufstelle für sämtliche Themen rund um das Thema Nachhaltigkeit im Bereich Infrastruktur. Der Anspruch der Organisation ist es, dafür zu sorgen, dass alle Infrastrukturen einen sozialen, kulturellen, ökologischen und wirtschaftlichen Nutzen bringen. Unter anderem zu diesem Zweck hat ISC ein Bewertungssystem entwickelt [83], mit dem Aspekte der Nachhaltigkeit einfach bewertet werden können (ISC-Rating).

US Federal Highway Association (FHWA): INVEST (Infrastructure Voluntary Evaluation Sustainability Tool)

Das vom FHWA entwickelte INVEST-Kompendium [84] ist eine praktische, webbasierte Sammlung freiwilliger bewährter Praktiken, sogenannter Kriterien, die Verkehrsbehörden dabei helfen sollen, Nachhaltigkeit in ihre Programme (Richtlinien, Prozesse, Verfahren und Praktiken) und Projekte zu integrieren. Dieses Kompendium enthält von Benutzern ausgewählte Kriterien aus INVEST 1.2 (Stand: September 2015). Es enthält Kriterien für die

Systemplanung für Staaten (SPS), die Systemplanung für Regionen (SPR), die Projektentwicklung (PD) und den Betrieb und die Instandhaltung (OM).

USA/International: Greenroads Rating System

Das Greenroads® Rating System [85] ist eine einfache Methode zur Messung und Verwaltung der Nachhaltigkeit von Verkehrsprojekten. Das Bewertungssystem ist das Kernstück des Greenroads-Projektbewertungsprogramms, das Projektteams dazu herausfordert, über die Mindestanforderungen an die ökologische, soziale und wirtschaftliche Leistung hinauszugehen, und Projekte durch unabhängige, sachverständige Prüfungen Dritter bewertet.

Daneben gibt es auch eine Reihe thematischer resp. spezifischer Ansätze u.a. zu Klimabilanzen oder Staudämmen.

2.3.3.2 Ansätze Deutschland

BAST Nachhaltigkeitsbewertungskriterien Infrastruktur

In den Jahren 2012 bis 2015 wurden von der Bundesanstalt für Straßen- und Verkehrswesen (BAST) mehrere Forschungsprojekte initiiert und durchgeführt, die das Ziel der Erarbeitung eines Vorschlags für ein nationales Nachhaltigkeitsbewertungs- und Zertifizierungssystem für Infrastrukturbauwerke verfolgten [86]. Die Anwendung soll sowohl für Neu- als auch Bestandsbauten erfolgen und es sollen die Bewertungsobjekte freie Strecke und Knotenpunkte, Brücken und Tunnel bewertet werden können [87].

Es wurden sowohl für Brückenbauwerke [86] und die freie Strecke [88] eine umfassende Indikatorensammlung inklusive detaillierter Indikatorenbeschreibung entwickelt und in einem Bewertungssystem zusammengeführt. Das System für Brückenbauwerke wurde in einer Pilotstudie auf seine praktische Anwendbarkeit überprüft [89] und so weiterentwickelt, dass auch eine Anwendbarkeit in frühen Planungsphasen möglich ist [90].

Die erarbeiteten Bewertungssysteme sind bisher nicht in eine praktische Umsetzung und standardmäßige Anwendung überführt worden. Die erarbeiteten Indikatoren liefern eine sehr gute Grundlage für die Nachhaltigkeitsbewertung von Infrastrukturen, sind aber in der vorliegenden Form als Forschungsindikatoren einzustufen.

DGNB

Die Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen e.V. hat zusammen mit der HOCHTIEF PPP mit Unterstützung der HOCHTIEF ViCon in den Jahren 2020 bis 2023 eine

Systemvariante für ein Nachhaltigkeitsbewertungssystem entwickelt, die auf Transportinfrastrukturprojekte spezialisiert ist. Die Entwicklung fand für das ÖPP-Projekt BAB A6 zwischen der AS Wiesloch/Rauenberg und dem AK Weinsberg (mit einer Streckenlänge von insgesamt 47 km) im Rahmen eines Pilotprojekts statt.

Die Systemgestaltung ist auf die spezifischen Anforderungen und Herausforderungen des Infrastruktursektors ausgelegt und orientiert sich an der Struktur des DGNB-Hochbausystems. Es fanden umfassende Anpassungen bezüglich der einzubeziehenden Indikatoren und Indikatorenbeschreibungen statt, um die Randbedingungen von Infrastrukturen abzubilden. Dabei gingen bestehende Ansätze wie die BAST-Indikatoren und Forschungsprojekte (u.a. Fogib [91], Kuhlmann et al. [92] und Hess et al. [88]) in die Systemgestaltung ein. Derzeit erfolgt eine Systemfreigabe innerhalb der DGNB-Gremien, im Anschluss eine Veröffentlichung der erarbeiteten Indikatoren und Systemauslegung.

2.3.3.3 Ansätze Schweiz

Nachhaltigkeits-Indikatoren für STRasseninfrastrukturprojekte (NISTRA)

NISTRA [93], ein Instrument des Schweizerischen Bundesamts für Strassen (ASTRA), ermöglicht die Beurteilung der Auswirkungen von Straßeninfrastrukturprojekten unter Berücksichtigung von Nachhaltigkeitszielen, insbesondere sozioökonomischer Natur. Das Excel-basierte Analysetool verwendet monetarisierbare, quantifizierbare und qualitative Inputdaten, die in einer Kosten-Nutzen-Analyse (KNA), einer Kosten-Wirksamkeits-Analyse (KWA) und einer ergänzenden qualitativen Analyse ausgewertet werden. Dabei werden die Auswirkungen der Infrastruktur (Betrieb) in ökonomischer, sozialer und ökologischer Hinsicht bewertet, während Aussagen für den Bau nicht getroffen werden können.

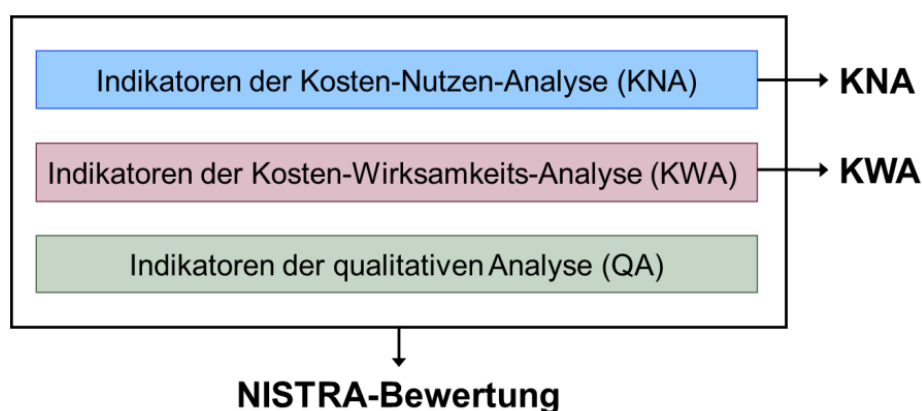


Abbildung 2-14. Einbettung der KNA und der KWA in die NISTRA-Bewertung [93]

NISTRA ist seit 2003 im Einsatz, verhältnismäßig viel Erfahrung konnte damit gesammelt werden, insbesondere in der Abschätzung der sozioökonomischen Auswirkungen (KNA und KWA). Die ökologische Dimension wird primär über Emissionen im Betrieb beurteilt.

Die Analyse erfolgt über ein Exceltool, das Informationen zu den 42 Indikatoren erfasst. Diese bilden die Grundlage für Entscheidungen und beinhalten die Monetarisierung sowie die qualitative Bewertung von Verkehrs- und Sicherheitsaspekten. Darüber hinaus werden Auswirkungen auf die Siedlungsentwicklung und die Umwelt berücksichtigt und die Umsetzung sowie Kohärenz der Projekte bewertet.

Hauptmenü			eNISTRA 2022
1. Inputblätter 5 Verkehrsmodell Indikatorenliste Bewertungssätze KNA Gewichtungen und Annahmen KWA Inputdaten Infrastrukturbudget	4. Sicherheit SI1n Unfälle SI1w Unfälle SI2 Betriebsqualität, Betriebssicherheit SI3n Polizeiliche Verkehrsregelung SI3w Polizeiliche Verkehrsregelung	8. Outputblätter Tableau Zusammenfassung KNA Zusammenfassung KWA und QA Detailergebnisse KNA Sensitivitätsanalyse Sozioökonomische Teilbilanzen Kommentare Abbildungen Klima Export KNA Export KWA und QA	Klicken Sie auf den Namen eines Tabellenblattes, um auf das entsprechende Blatt zu springen. Farbcode für KNA relevant für KWA relevant für QA relevant für KNA und KWA relevant für KWA und QA relevant Eingabe durch Benutzer Vorgabewerte aus BASIC Hinweifarbe (Vorsicht!)
2. Direkte Kosten DK1 Baukosten DK2 Ersatzinvestitionen DK3 Landkosten DK4 Betriebs- und Unterhaltskosten Strasse	5. Siedlungsentwicklung SE1 Wohnlichkeit SE2 Potenzial für Siedlungsentwicklung SE3 Erreichbarkeit Siedlungsschwerpunkte SE4 Orts- und Landschaftsbild		
3. Verkehrsqualität VQ1n Reisezeit Stammverkehr VQ1w Reisezeit Stammverkehr VQ2n Zuverlässigkeit VQ2w Zuverlässigkeit VQ3n Betriebskosten Fahrzeuge Stammverkehr VQ3w Betriebskosten Fahrzeuge Stammverkehr VQ4n Auswirkungen auf den ÖV VQ4w Auswirkungen auf den ÖV VQ5 Streckenredundanz VQ6 Entlastung nachgelagertes Netz VQ7.1 MWST-Einnahmen ÖV VQ7.2 Nettonutzen Mehrverkehr VQ7.3 Einnahmen Steuer und Maut Mehrverkehr VQ7w Nutzen durch Mehrverkehr VQ8 Einnahmen Steuer und Maut Stammverkehr VQ9 Externe Gesundheitsnutzen FV / VV	6. Umwelt UW1n_Luft Luftbelastung UW1n_Lärm Lärmbelastete Personen UW1w Lärm- und Luftbelastung UW2 Lebensräume und Gewässer UW3n Bodenversiegelung UW3w Flächenbeanspruchung und Boden UW4n Klimabelastung UW4w Klimabelastung UW5 Belastung während der Bauphase UW6 Vor- und nachgelagerte Prozesse	7. Realisierung und Kohärenz QI1 Kostenrisiko, bautechnisches Risiko QI2 Etappierbarkeit QI3 Kohärenz mit Gesamtverkehrskonzepten QI4 Kohärenz mit Raumplänen QI5 Langfristige Ausbaufähigkeit, Aufwärtskompatibilität	

Im «Handbuch NISTRA 2022» finden Sie Hilfestellungen zu den nötigen Eingaben in den einzelnen Tabellenblättern.
Das Handbuch kann hier heruntergeladen werden: <https://www.nistra.ch>

Abbildung 2-15. Handbuch NISTRA 2022

Tabelle 2. Beispiel einer Kosten-Nutzen-Analyse (KNA)

Indikator	Mengeneffekt im Jahr 2025	Annuität (Mio. CHF)	Nettobarwert (Mio. CHF)
Direkte Kosten		-20.13	-508.77
DK1 Baukosten	---	-15.05	-380.44
DK2 Ersatzinvestitionen	---	-2.56	-64.81
DK3 Landkosten	---	-0.09	-2.34
DK4 Betriebs- und Unterhaltskosten Strasse	---	-2.42	-61.18
Verkehrsqualität		20.26	512.11
VQ1n Reisezeit Stammverkehr	2.22 Mio. h	18.25	461.25
VQ2n Zuverlässigkeit	---	0.97	24.43
VQ3n Betriebskosten Fahrzeuge Stammverkehr	80 Mio. Fzkm	6.20	156.73
VQ4n Auswirkungen auf den ÖV	---	-6.31	-159.35
VQ7n Nutzen durch Mehrverkehr	---	0.46	11.67
VQ9 Externe Gesundheitsnutzen FV / VV	2.3 Mio. pkkm	0.69	17.37
Sicherheit		3.93	99.41
SI1n Unfälle	---	3.77	95.29
SI3n Polizeiliche Verkehrsregelung	---	0.16	4.13
Umwelt		0.15	3.85
UW1n_Luft Luftbelastung	-0.1 t PM10	-1.75	-44.14
UW1n_Lärm Lärmbelastete Personen	---	4.18	105.64
UW3n Bodenversiegelung	35.2 ha	-0.14	-3.62
UW4n Klimabelastung	1255 t CO2	-0.22	-5.62
UW6 Vor- und nachgelagerte Prozesse	4787 t CO2	-1.92	-48.41
Total		4.22	106.61

Netzwerk Nachhaltiges Bauen Schweiz (NNBS)

Der Standard des Netzwerks Nachhaltiges Bauen Schweiz (NNBS) [94] besteht aus einer Reihe von Kriterien und Leitlinien, die darauf abzielen, nachhaltiges Bauen in der Schweiz zu fördern. Die enthaltenen Aspekte Energieeffizienz, Ressourcennutzung, Umweltauswirkungen, soziale Verantwortung, Kostenverhältnisse und transversale Themen sind über insgesamt 72 Indikatoren operationalisiert. Der Ursprung, respektive die äußerst breit abgestützte Trägerschaft besteht aus Bund (Bundesämter), Kantonen, Forschungseinrichtungen (Fachhochschulen), Verbänden, Bau- und Ingenieurfirmen aus der Schweiz.

Von den drei dokumentierten NNBS-Standards operationalisiert jener für Infrastrukturen die SIA-Norm 112/2 „Nachhaltiges Bauen – Tiefbau und Infrastrukturen“ [74] und ist kompatibel zu SuRe [82] und NISTRA [93] (siehe oben) oder NIBA (Eisenbahn-, resp. Schienenanlagen):



TRANSVERSALE THEMEN

der Rahmen für ihre Beurteilung klar definiert, Synergien und Zielkonflikte früh erkannt, Potenziale genutzt und andere bestehende oder geplante Projekte miteinbezogen werden



RAUMENTWICKLUNG UND SIEDLUNG

sie mit den Zielen der Raumplanung korreliert und Lebensqualität sowie lokale Entwicklungspotenziale fördert.



BETRIEBSWIRTSCHAFT

ihre Kosten und Nutzen über den Lebenszyklus optimiert sind und sie sich flexibel an neue Nutzungen anpassen lässt.



ROHSTOFFE, ENERGIE UND BODEN

sie ressourcenschonend erstellt, betrieben, unterhalten wird und erneuerbare Energien effizient nutzt.



GEMEINSCHAFT

die Interessen der Gesellschaft früh einbezogen werden und Kosten, Nutzen sowie Risiken solidarisch verteilt sind.



VOLKSWIRTSCHAFT

sie die lokale und regionale Wirtschaft stärkt und vorhandene Strukturen nutzt.



NATUR UND UMWELT

sie Klima und Landschaft schützt, die Biodiversität fördert und Emissionen minimiert.



GESUNDHEIT UND SICHERHEIT

sie die Gesundheit der Menschen fördert und ihre Sicherheit garantiert.



FINANZIERUNG

die langfristige Finanzierung über den gesamten Lebenszyklus inklusive Risiken gesichert ist.



GEFAHRENPRÄVENTION

ihr Standort, ihre Bau- und Betriebsweise die Risiken durch Naturgefahren und Störfälle vermindern.

Abbildung 2-16. Bewertungskriterien aus 10 Bereichen [94]

Die Stärke der SNBS-Infrastruktur liegt in seiner integralen Betrachtung der Bereiche Gesellschaft, Wirtschaft und Umwelt, von denen jeder anhand von drei Themen beurteilt

werden. Zudem werden transversale Themen (u.a. Synergien, Zielkonflikte) mit einbezogen, womit auch Aspekte der Projektleitung und -organisation sowie übergeordnete Teilziele beurteilt werden [95]. Das System ermöglicht eine sehr einfache Bewertung, da es lediglich drei Ausprägungen pro Indikator gibt: erfüllt (grün, 2), teilweise erfüllt (gelb, 1) und nicht erfüllt (rot, 0). Das excelbasierte Bewertungstool umfasst insgesamt 72 Indikatoren über alle Projektphasen in qualitativer Form. Die verarbeitete Werte können unmittelbar in Spinnendiagrammen dargestellt werden (vgl. Abbildung 2-17).

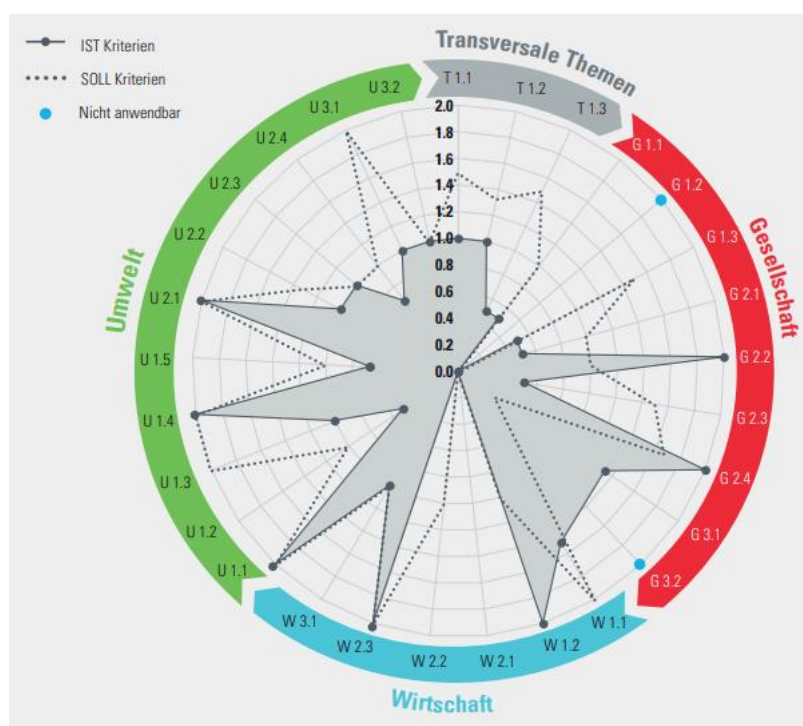


Abbildung 2-17. Auswertungen im Tool „SNBS“ in Form eines Spinnendiagramms [95]

2.3.3.4 Ansätze Österreich

Der Austrian Sustainability Council hat verschiedene Forschungsprojekte durchgeführt, Arbeitsgruppen eingerichtet und Richtlinien erarbeitet mit Fokus auf Nachhaltigkeit. Hierzu gehören Arbeiten zu einem Bewertungsmodell mit vereinheitlichten Methoden für den Tiefbau über die gesamte Lebensphase und die praxisgerechte Erforschung von THG-Einsparungen durch Baustoffrecycling. Der Österreichischer Betonverein ÖBV beschäftigte sich ebenfalls mit Zertifizierungen und Ökobilanzierungen. Die Arbeitsgruppe „Nachhaltigkeit/Ökologisierung im Bauwesen“ hat im Jahr 2022 den Bericht „Sachstand – Ökologisierung/Nachhaltigkeit im Bauwesen“ [96] im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt veröffentlicht.

Zu den aktuellen Forschungs- und Pilotprojekten im Bereich der Ökologisierung/Nachhaltigkeit gehören zum Beispiel: „Breakthrough-Technologie am Standort Österreich (C2PAT)“, „VIF2021-Projekt ERESCON: Neue energie- und ressourcenoptimierte Betone für den Infrastrukturbereich“ [97], „Berechnungsprogramm für die Betondecken im Straßenbau (zukünftiges Zuschlagskriterium der ASFINAG). Folgende Normen und Zertifizierungen kommen z. B. in Österreich zur Anwendung: ISO/TC207 „Umweltmanagement“; ISO/TC 59/SC17 „Nachhaltigkeit von Gebäuden und Ingenieurbauwerken“; CEN/TC350 „Nachhaltigkeit von Bauwerken“; „Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG1996)“; „Recycling-Baustoffverordnung-RBV“; ÖNORM B 1801-4 „Bauprojekt- und Objektmanagement – Teil 4 Lebenszykluskosten“. Trotz vorhandener Ansätze zeigt sich in der Praxis noch weitgehend eine Zurückhaltung, was deren Einsatz angeht, mit der Folge, dass Praktiken im Ingenieurbau noch zögerlich und weit unter ihren Möglichkeiten Erkenntnisse aus Nachhaltigkeitsanalysen berücksichtigen. Eine Weiterentwicklung dieser Praxis ist aber aufgrund der erwähnten Aktivitäten bemerkbar.

LCCO2 - Nachhaltigkeitstool für den Infrastrukturbau in Österreich:

Das VIF 2020 Forschungsprojekt DECARBONISATION FIRST [98] verfolgte den Gedanken, dass zukünftige Entscheidungsfindungen für Baumaßnahmen im Tiefbau auf einer deutlich stärkeren Gewichtung der Kosten infolge CO₂-Fußabdrucks erfolgen und gleichzeitig die Akzeptanz der damit einhergehenden Primärkosten gehoben wird. Ein für die Branche allgemein anwendbares Tool zur Berechnung der damit einhergehenden Umweltfolgekosten gibt es derzeit nicht. Dazu wurde zunächst eine Datenbank mit für Österreich repräsentativen CO₂-Äquivalenten („Cradle to Grave“) für die relevanten Baustoffe von 6 definierten Assetkategorien, Brücken, Straßenoberbau, Dämme, Stützmauern, Wannenbauwerke, Lärmschutzwände, erstellt.

LZinfra – Lebenszyklustool für den Infrastrukturbau in Österreich:

Das Lebenszyklustool „LZinfra“ [99] soll zur Nachhaltigkeitsbewertung von Verkehrsinfrastrukturen auf den Ebenen Bestandstrassen und Trassenvarianten (Korridorebene), Bauwerksoptimierungen (Planungsphase/ Bauwerksebene) bzw. Bauabwicklung (Vergabephase/ Baustellenebene) dienen. Ziel der Tool-Entwicklung bzw. dessen Anwendung ist die flexible und unkomplizierte Ermittlung und Beurteilung ökologischer und ökonomischer Optimierungspotentiale von Konstruktionen, Materialien, Bau- und Sanierungsprozessen bzw. der Trassenfindung und Netzwerksentwicklung. Die im „LZinfra“-Tool implementierten Ökobilanz- und Lebenszykluskosten-Rechner können individuell, flexibel

und einfach auf verschiedenen Bewertungsebenen (Projektphasen) für die betrachtete Verkehrsinfrastruktur eingesetzt werden. Mit dem entwickelten Bewertungswerkzeug können somit aufwandsreduzierte sowie einheitliche, transparente und österreichweit abgestimmte Nachhaltigkeitsbewertungen für einzelne Rohstoffe, Bauprodukte, Bauwerke, Projektabwicklungen und Trassenoptionen durchgeführt und nicht aufeinander abgestimmte Einzelstudien bzw. -bewertungen vermieden werden.

ÖBV Nachhaltigkeitsprojekte für den Infrastrukturbau in Österreich:

Neben den oben skizzierten Tools und Projekten hat die Österreichische Bautechnik Vereinigung (ÖBV) folgende Nachhaltigkeitsprojekte initiiert [100]: (a) TempOptLowCarb; (b) Zielsichere Herstellung von Bauteilen mit Temperatur- CO₂- optimierten Betonen; (c) „LZ-Infra“ Bewertung der Nachhaltigkeit von Ingenieurbauwerken; (d) Upcycling&CO₂storage; (d) Green Infrastructures – Weiße Wanne.

2.3.4 Entwicklungen und Vorgaben European Green Deal

Der EU-Green Deal basiert auf zwei Hauptinitiativen. Die Vereinten Nationen haben bereits im Jahr 2015 die Sustainable Development Goals (SDG) beschlossen, zu deren Anwendung sich auch die DACH-Staaten (Deutschland, Österreich, Schweiz) verpflichtet haben [101]. Im Übereinkommen von Paris („**Pariser Klimaabkommen**“) auf der Weltklimakonferenz im Jahr 2015 stimmten 195 Staaten zu, „den Klimawandel einzudämmen und die Weltwirtschaft klimafreundlich umzugestalten.“ Dabei wurden in Artikel 2 drei Hauptziele definiert:

1. den Anstieg der weltweiten Durchschnittstemperatur zu beschränken,
2. die Emissionen zu senken und Anpassungen an den Klimawandel vorzunehmen und
3. Finanzmittel im Einklang mit den Klimaschutzzielen zu lenken.

Das Pariser Klimaabkommen sieht die Treibhausgas-Neutralität konkret für die zweite Hälfte des Jahrhunderts vor [102].

Der **europäische Green Deal** (auch „Grüner Deal“ genannt) ist die Strategie der Europäischen Union (EU) zur Umsetzung der Ziele des Pariser Klimaabkommens und wurde im Jahr 2019 von der Europäischen Kommission ins Leben gerufen. Er basiert auf den SDGs [101] und wird beschrieben als „ein Paket politischer Initiativen, mit dem die EU auf den Weg gebracht werden soll, einen grünen Wandel zu vollziehen, um schließlich ihr Ziel zu erreichen, bis 2050 klimaneutral zu werden“ [103].

Der Green Deal ist in den Bereichen Klima, Umwelt, Energie, Verkehr, Industrie, Landwirtschaft und nachhaltige Finanzen umzusetzen. Der umzusetzende Wandel soll neben der Klimaneutralität 2050 eine moderne, ressourceneffiziente und wettbewerbsfähige Wirtschaft der EU gewährleisten [103].

Insgesamt wird der Green Deal mit mehreren europäischen Initiativen spezifiziert, die in der folgenden Tabelle 3. Initiativen des europäischen Green Deals zusammengefasst werden [103]. Die fett gedruckten Initiativen haben dabei direkte Auswirkungen auf die Bereiche Infrastrukturbau, -erhalt und -betrieb und sind für dieses Forschungsprojekt von Bedeutung.

Tabelle 3. Initiativen des europäischen Green Deals

Initiative	Zentrale Inhalte und Beschreibung
Fit for 55	Einbeziehung der Klimaziele in die aktuelle Gesetzgebung und Überarbeitung der Rechtsvorschriften in den Bereichen Klima, Energie und Verkehr. Der Name verdankt die Initiative dem zentralen Einsparziel des Europäischen Klimagesetz, das nachfolgend erläutert wird.
Europäisches Klimagesetz	Gültigkeit seit 2021 und Verpflichtung der EU und seiner Mitgliedstaaten, „die Netto-Treibhausgasemissionen in der EU bis zum Jahr 2030 um mindestens 55% gegenüber 1990 zu senken“.
EU-Strategie zur Anpassung an den Klimawandel	Zeithorizont bis 2050; Maßnahmenpaket, wie die EU klimaresistent werden kann, um auf die jetzt schon unvermeidbaren Folgen des Klimawandels vorbereitet zu sein.
EU-Biodiversitätsstrategie für 2030	Verfolgung der Ziele einer höheren biologischen Vielfalt und Adressierung des Sachverhalts, dass die Mitgliedstaaten verpflichtet werden sollen, bis 2030 Wiederherstellungsmaßnahmen für mindestens 20% der Land- und Meeresgebiete der EU einzuleiten.
Waldstrategie und Entwaldung	Ergänzung der Biodiversitätsstrategie und Bildung eines Schwerpunkts des Green Deals. Neben der Vergrößerung der Waldfläche und einer Verbesserung der biologischen Vielfalt soll die Waldbewirtschaftung nachhaltiger und umweltfreundlicher gestaltet werden, wofür finanzielle Anreize gesetzt werden.
Aktionsplan für die Kreislaufwirtschaft	Entkopplung des Wirtschaftswachstums von der Ressourcennutzung und Entwicklung hin zu einem kreislauffähigen Wirtschaftssystem.
Batterien und Altbatterien	Grundlage für die Batterie-Verordnung und Förderung des Ziels der Förderung der Kreislaufwirtschaft.
Nachhaltigkeitsstrategie für Chemikalien	Verfolgung des Ziels, die menschliche Gesundheit zu schützen, die Wettbewerbsfähigkeit der Industrie zu stärken und zu einer schadstofffreien Umwelt beizutragen, um langfristig ein „Null-Schadstoff-Ziel“ zu erreichen.
Ein gerechter Übergang	Initiative zur Unterstützung von Regionen, die am stärksten von der CO ₂ -Reduktion betroffen sind.
Saubere, erschwingliche und sichere Energie	Sektorenübergreifende Förderung der Ziele sauberer Energiequellen sowie Energieeffizienz und erneuerbare Energien.

Laut buildingSMART Switzerland werden die Maßnahmen, die sich aus Fit for 55 ergeben, erhebliche Auswirkungen auf den Bau- und Immobiliensektor haben, da sich daraus zum einen

eine Überarbeitung der „Richtlinie über die Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden, der Energy Performance of Buildings Directive (EPBD)“ ergibt und zum anderen eine Anpassung der der Bauprodukte-Verordnung, der Construction Products Regulation (CPR)“ erforderlich ist [101]. Außerdem hat die EU-Kommission einen **Referenzansatz für den ökologischen Fußabdruck** von Produkten und Organisationen geschaffen, der im Rahmen des Lebenszykluskonzepts folgende vier Hauptkriterien identifiziert:

- Einbezug des gesamten Lebenszyklus entlang der Wertschöpfungskette (Anfangen bei der Ressourcengewinnung über Verarbeitung, Vertrieb, Nutzung bis hin zu Entsorgung und Verwertung,
- Ermöglichung multikriterieller Umweltbewertung (und nicht nur einer Dimension wie z. B. CO₂-Äquivalente),
- Verbesserung der Reproduzierbarkeit und Vergleichbarkeit von Nachhaltigkeitsanalysen, damit Vergleichsstudien entstehen können sowie
- Analyse der Material- und Energieressourcen entlang der Lieferketten von Organisationen.

Die **EU-Taxonomie** wurde am 18. Juni 2020 [104] erlassen und stellt eine „Nachhaltigkeitstaxonomie für das Europäische Finanzwesen“ dar, die auf den Empfehlungen einer Sachverständigengruppe für nachhaltiges Finanzwesen basiert. Ziel dabei ist es, Kapitalflüsse hin zu nachhaltigen Investitionen zu bewegen [105]. Schon 2018 veröffentlichte die EU-Kommission ihren Aktionsplan „Finanzierung nachhaltigen Wachstums“, welcher in der EU-Taxonomie ebenfalls in Artikel 6 thematisiert wird, wobei die EU-Kommission konkretisiert, dass „die Einführung eines einheitlichen Klassifikationssystems für nachhaltige Tätigkeiten [...] die wichtigste und dringlichste Maßnahme [...] im Aktionsplan“ [104] ist.

Ob eine Wirtschaftsaktivität EU-Taxonomie-konform ist, wird anhand von sechs Umweltzielen gemessen, wobei zu zwei Umweltzielen ein wesentlicher Beitrag geleistet wird und für die restlichen Mindeststandards erfüllt sein müssen [105, 106]. Sechs Umweltziele sind [105, 107]:

1. Klimaschutz,
2. Anpassung an den Klimawandel,
3. Nachhaltige Nutzung und Schutz von Wasser und Meeresressourcen,
4. Übergang zu einer Kreislaufwirtschaft,
5. Vermeidung und Verminderung der Umweltverschmutzung,
6. Schutz und Wiederherstellung von Biodiversität und Ökosystemen.

Laut Forschenden der Universitäten Hamburg und Augsburg hängt das Erreichen dieser Umweltziele „von der Umsetzung auf Unternehmensebene und der daraus resultierenden Offenlegungsqualität bezüglich nichtfinanzieller Unternehmensleistungen ab“ [105]. Seitens der EU existiert bereits die CSR-Richtlinie (auch CSRD, Corporate Sustainability Reporting Directive) [113, 114], die in deutsches nationales Recht überführt wurde und die Kapitalgesellschaften zu nichtfinanziellen Lageberichten verpflichtet, wodurch insgesamt „Greenwashing“ entgegengewirkt werden soll [112]. Die Berichte der Unternehmen müssen dabei nach den Europäischen Standards für die Nachhaltigkeitsberichterstattung (European Sustainability Reporting Standards ESRS) erstellt werden [115, 116].

Die EU-Taxonomie spielt somit für den Betrieb und auch den Bau von Infrastrukturbauwerken der öffentlichen Hand eine untergeordnete Rolle, lässt sich aber beispielsweise für die Wirtschaftsaktivitäten von Baustoffherstellern anwenden, wie Gräf und Weidner [106] zeigen.

2.3.5 Zusammenfassung und Ansatz der Nachhaltigkeitsbewertung im Projekt

Ausgelöst durch die Ölkrise in den 1970er Jahren hat sich die Diskussion um Nachhaltigkeit über verschiedenen im Text erwähnte Meilensteine zum heutigen Fokus auf die CO₂-Reduktion und den Klimawandel geführt. Diese Fokussierung auf Teilaspekte der Nachhaltigkeit birgt das Risiko, dass das gesamte Konzept der drei Säulen der Nachhaltigkeit (ökonomisch, ökologisch, sozial) in den Hintergrund tritt. Nachhaltigkeitsanalysen sind ein zentrales Instrument zur Bewertung der ökologischen, sozialen und ökonomischen Auswirkungen von Bauprojekten.

Im Zusammenhang mit der Nachhaltigkeitsbewertung ist besonders die Integration von BIM und DZ zu erwähnen, mit denen präzise und umfassende Nachhaltigkeitsanalysen durchgeführt werden können. Durch die Verbindung von GIS-Daten und Ökobilanzen mit diesen digitalen Modellen können Umweltauswirkungen schon in der Planungsphase bewertet werden. Gleichzeitig wird deutlich, dass es noch Herausforderungen gibt, etwa bei der breiten praktischen Anwendung von Nachhaltigkeitsbewertungssystemen im Infrastrukturbereich.

Um das große Potenzial der Anwendung von BIM und DZ, insbesondere im Bereich der Infrastrukturbauten nutzen zu können bedarf es aber weiterer Forschungsanstrengungen und der Entwicklung geeigneter Indikatoren und Bewertungssysteme. Außerdem sollte der Fokus auf die Nutzungsphase und den Rückbau von Bauwerken gelegt werden, um deren gesamten

Lebenszyklus nachhaltig zu gestalten. Normen und Standards spielen dabei eine Schlüsselrolle für die breitere Anwendung dieser Methoden.

Die gut etablierten internationale Bewertungsstandards für Nachhaltigkeit in der Infrastruktur warten noch auf ihre breite Anwendung im deutschen Sprachraum. Existierende Standards wie BREEAM und Envision bieten flexible und gut strukturierte Rahmenbedingungen, die auf unterschiedliche Projekte und Regionen anwendbar sind

Verschiedene internationale und nationale Ansätze zur Nachhaltigkeitsbewertung in der Infrastrukturbranche zeigen unterschiedliche, im Kern aber vergleichbare Vorgehen für die Bewertung der Nachhaltigkeit im Infrastrukturbereich. Zertifizierungsprogramme wie BREEAM, Envision, FastInfra (SuRe), und das Infrastructure Sustainability Rating bieten Bewertungsrahmen für ökologische, soziale und wirtschaftliche Aspekte von Projekten. Diese Standards unterstützen Projektteams bei der Entscheidungsfindung, verbessern die Leistung und fördern nachhaltige Praktiken. Nationale Ansätze, wie das deutsche BAST-System oder das schweizerische NISTRA, sind speziell auf Infrastrukturen angepasst, werden jedoch teilweise noch nicht breit umgesetzt. Die zunehmende Bedeutung des European Green Deals und der EU-Taxonomie werden in den kommenden Jahren verstärkt die Richtung für nachhaltige Bau- und Infrastrukturprojekte vorgeben. Eine stärkere Integration dieser Ansätze in nationale Programme ist erforderlich, um die ambitionierten Klimaziele zu erreichen und gleichzeitig die Nachhaltigkeit in der Bau- und Infrastrukturbranche zu fördern.

DZ bieten großes Potenzial für den Ingenieur- und Infrastrukturbau, indem sie den gesamten Lebenszyklus eines Bauwerks von der Planung bis zum Rückbau begleiten und optimieren. Sie ermöglichen Echtzeitüberwachung, prädiktive Wartung und eine bessere Ressourcenplanung. Besonders im Bereich Brücken, Tunnel und Fahrbahnen werden sie bereits zur Zustandsüberwachung und Optimierung der Wartung eingesetzt. BIM bildet dabei die Grundlage, während IoT, KI und maschinelles Lernen die Effizienz und Flexibilität der DZ erhöhen.

Obwohl der Nutzen der Anwendung von DZ im Bauwesen, besonders auch in Verbindung mit Nachhaltigkeitsbewertungssystemen unschwer erkennbar ist, befindet sich dessen Adaption im Infrastrukturbereich noch in einer frühen Phase. Die laufend wachsende Bedeutung von Nachhaltigkeit in der Infrastrukturentwicklung unterstreicht die Wichtigkeit. Diverse internationale und nationale Standards bieten bereits praxistaugliche Ansätze, die jedoch noch nicht flächendeckend im deutschen Sprachraum umgesetzt sind. Der European Green Deal

und die EU-Taxonomie geben der Branche klare Richtlinien, um die ambitionierten Klimaziele zu erreichen.

Um den Infrastrukturbereich nachhaltig zu transformieren, muss der Lebenszyklen von Bauwerken effizienter und nachhaltiger gestalten werden. Die Integration von BIM und Nachhaltigkeitsbewertungssystemen unterstützen dies, CO₂-Emissionen und andere Umweltfaktoren können so bereits frühzeitig berücksichtigt werden und in der Entscheidungsfindung Einzug finden.

3 Anforderungen und Anwendungsfälle

Aufbauend auf dem Stand der Technik zu DZ und existierenden Prozessen und Methoden zu Nachhaltigkeitsanalysen fokussiert sich dieses Kapitel auf die Beschreibung von vier Anwendungsfällen, um die beiden Themenbereiche miteinander zu verschmelzen. Viele der im letzten Kapitel beschriebenen Ansätze sind bereits auf dem Markt etabliert und bieten Möglichkeiten und Herangehensweisen für die praktische Umsetzung von Nachhaltigkeitsanalysen. Allerdings beziehen sich vor allem Nachhaltigkeitsanalysen derzeit vorwiegend auf die Lebenszyklusphase der Planung und des Baus von Bauwerken. Eine Überführung in die nachfolgende Lebenszyklusphase der Nutzung und der dazugehörigen Prozesse und Methoden zur Bauwerkserhaltung wird hingegen nicht standardmäßig umgesetzt. Genau hier setzt die Zielsetzung dieses Forschungsvorhabens an.

Die nachfolgenden Abschnitte beschreiben, mit welchen Methoden die Anwendungsfallentwicklung erfolgt und liefert eine Anwendungsfallbeschreibung in Steckbriefen.

3.1 Methodisches Vorgehen

Zu Beginn der Anwendungsfallentwicklung wird unter Beteiligung verschiedener Projektbeteiligter, die aus unterschiedlichen Domänen stammen und unterschiedliche Kompetenzen einbringen, ein einheitliches Verständnis für den Umfang und die Herangehensweise zum Aufsetzen der Demonstratoren der GreenInfraTwins geschaffen. Jeder Konsortialpartner kann auf viele Jahre Erfahrung in seinem Expertengeschäftsfeld zurückblicken, in der die konzeptionelle Ausarbeitung und demonstratorgestützte Umsetzung von DZ für die Betriebsphase mit Fokus auf die Nachhaltigkeitsanalyse als transdisziplinäre Aufgabenstellung verstanden wird.

Die Anwendungsfallentwicklung erfolgt auf Basis der folgenden Fragen:

- Welche bestehenden Geschäftsprozesse sollen im Rahmen von Nachhaltigkeitsanalysen mit den DZ unterstützt werden?
- Inwiefern kann die Berechnung der in den Anwendungsfällen erforderlichen Indikatoren mit Hilfe digitaler Methoden umgesetzt werden?
- Welcher Nutzen wird durch die Anwendungsfälle geschaffen und welche Herausforderungen müssen bei der Umsetzung gelöst werden?

Die verwendete grundsätzliche Herangehensweise zur Formulierung und Definition von Anwendungsfällen basiert auf einem „Top-Down Ansatz“. Dieser beginnt mit der Formulierung

eines oder mehrerer genereller Ziele, welche mit einem Geschäftsprozess übergeordnet erreicht werden sollen. Jedes Ziel wird heruntergebrochen in verschiedene Teilprozesse, deren Umsetzung für die Zielerreichung relevant sind. Genau dies sind die Anwendungsfälle, die im Rahmen der Ausformulierung spezifiziert werden. Für diese Umsetzung bedarf es spezifischer Methoden (Indikatoren), die wiederum entsprechende Softwareapplikationen, Tools oder andere Hilfsmittel benötigen, um tatsächlich durchgeführt werden zu können. Im Allgemeinen funktioniert diese Herangehensweise auch in die andere Richtung als „Bottom-Up Ansatz“. In diesem Fall wird zuerst einmal inventarisiert, welche Softwareapplikationen, Tools oder andere Hilfsmittel vorhanden sind, um darauf basierend Methoden zu identifizieren, die im Unternehmen umgesetzt werden können. Dies lässt dann Rückschlüsse zu, welche Prozesse darauf basierend umgesetzt werden können und welches Geschäftsziel damit unterstützt werden kann.

Kriterien- gruppe (Ziel)	Anwendungs- fall (Prozess)	Indikatoren	Methoden	Tools, Software, Hilfsmittel
Ökologische Qualität	Zustandserfassung	Rückbaufreundlichkeit	Checkliste	Excel
Ökonomische Qualität	Erfassung Verkehrsdaten	Integrales Energiekonzept	Erläuterungsbericht	PDF Dokument
Soziokulturelle und funktionale Qualität	Zustandsbewertung	Biodiversitätsstrategie	Messungen	Sensor
Prozessqualität	...	Lebenszykluskostenopti- mierung	Kostenermittlung	Kamera
Standortqualität		Straßenverkehrslärm	DGNB Ökobilanz-Methode	Autodesk Revit
Technische Qualität		Verkehrskonzept		
		...		

Abbildung 3-1. Übersicht der Faktoren für den Top-Down Ansatz

Die Partner des Konsortiums sind zu Beginn dieses Forschungsvorhabens zu einem gemeinsamen Workshop zusammengekommen, um auf Basis des „Top-Down Ansatzes“ Anwendungsfälle zu definieren, die als Basis für die technische Umsetzung dienen. Dabei wurde das übergeordnete Ziel des Forschungsvorhabens berücksichtigt: Entscheidungsunterstützung für Maßnahmen in der Nutzungs- und Rückbauphase von Brücken durch Nachhaltigkeitsanalysen. Nachhaltigkeitsanalysen verwenden dazu Indikatoren im Bereich der ökologischen, ökonomischen und soziokulturellen Qualität. Darüber hinaus werden häufig drei als Querschnittsqualitäten zu bezeichnenden Gruppen für die Einordnung von Indikatoren verwendet, siehe Abbildung 3-1 erste Spalte. Mit diesem Verständnis können die Anwendungsfälle tiefergehend beschrieben werden, relevante Indikatoren identifiziert und erforderliche Maßnahmen auf Umsetzbarkeit analysiert werden.

Für die Berechnung der Indikatoren werden dann verschiedene Methoden angewendet, wobei i. d. R. Softwareprodukte (Tools, Hilfsmittel) zum Einsatz kommen.

Die einzelnen Schritte sind in Abbildung 3-1 beispielhaft mit Inhalten versehen, wobei diese Inhalte nicht vollständig für alle Kriteriengruppen und Indikatoren ausgefüllt wurden.

Die Herausforderung für die Anwendungsfalldefinition besteht in der Identifikation und Benennung der maßgebenden Indikatoren unter Einbindung verschiedener Sichtweisen und Arbeitsdomänen. Es muss ein einheitliches Verständnis für die relevanten Geschäftsprozesse geschaffen werden, wobei zwei grundlegende Herangehensweisen gewählt werden können (siehe Abbildung 3-2). Auf der einen Seite existieren aus **Sicht des Erhaltungsmanagements** verschiedene Key Performance Indikatoren (KPI), die einer Entscheidungsfindung dienen. Basierend auf dem Zustand eines Bauteils oder des Gesamtbauwerks werden erforderliche Maßnahmen veranlasst, um die Zuverlässigkeit, Verfügbarkeit und Betriebssicherheit des Bauwerks zu erhalten oder wiederherzustellen. Diese drei Indikatoren sind relevant, um generell ein effektives Erhaltungsmanagement sicherzustellen. Für Nachhaltigkeitsanalysen wird häufig eine Ergänzung um weitere Indikatoren durchgeführt, wie Ökobilanzierung oder Lebenszykluskostenrechnung.

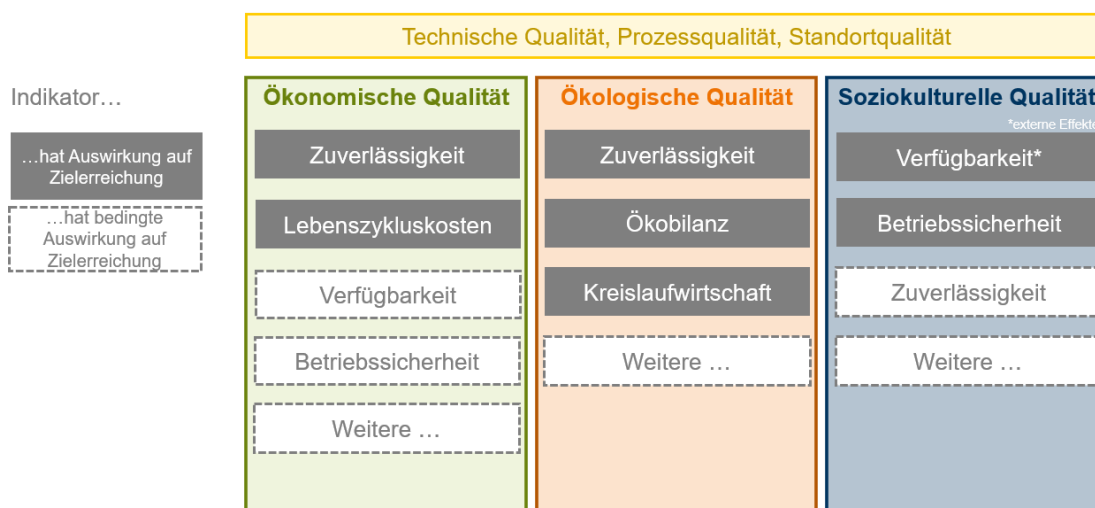


Abbildung 3-2. Beispielhafte Auflistung von Indikatoren mit ihrer Relevanz für Zielerreichung in den drei Nachhaltigkeitsqualitäten

Auf der anderen Seite existiert die **Sicht der Nachhaltigkeitsexperten**, deren Arbeitsfundament die drei Qualitäten Ökonomie, Ökologie und Soziales bildet. Für die Berechnungen werden verschiedene Indikatoren eingesetzt, die sich allerdings häufig von den KPI des Erhaltungsmanagements unterscheiden. Aspekte der Zuverlässigkeit, Verfügbarkeit und Betriebssicherheit tragen als Eingangsdaten dazu bei, die Nachhaltigkeitsindikatoren zu

berechnen. So haben Aspekte der Zuverlässigkeit Auswirkungen auf die Nutzungsdauern von Bauteilen und führen damit zu unterschiedlichen Nutzungsdauern

eransätzen im Rahmen der Lebenszykluskostenrechnung und Ökobilanzierung.

Die KPI's des Erhaltungsmanagements werden seit Jahrzehnten in der Betriebsphase für die Entscheidungsunterstützung im Ingenieurbau verwendet. Hier gibt es durch die Einführung digitaler Methoden und Nutzung von Technologien wie den DZ zwar ebenfalls Optimierungspotenzial, diese werden aber nicht weiter im Rahmen dieses Forschungsvorhabens berücksichtigt. Vielmehr sollen die bestehenden Ansätze zielführend in das Konzept von Nachhaltigkeitsanalysen unter Verwendung von DZ integriert werden.

Auf Grundlage des Verständnisses des Umgangs verschiedener Disziplinen mit Indikatoren werden im nächsten Schritt die Geschäftsprozesse identifiziert, die durch DZ unterstützt werden sollen. Auch hier kommt das Prinzip des Top-Down-Ansatzes zum Tragen, indem der Gesamtprozessablauf des Managements der Nutzungsphase in sich abgeschlossene Teilprozesse zerlegt wird. Es können vier grundsätzliche Prozesse der Nutzungs- und Rückbauphase identifiziert werden, die im Weiteren als Grundlage für die Anwendungsfallentwicklung dienen. Hiermit wird eine realistische und handhabbare Basis für eine Implementierung des DZ geschaffen. Jeder dieser identifizierten Prozesse der Nutzungsphase kann verschiedene Ausprägungen oder Durchführungsschwerpunkte beinhalten, die auch von länderspezifischen Vorgaben und Strategien abhängig sind. Folgende vier Prozesse für DZ werden identifiziert:

1. Betriebsaufgaben
 - z. B. Reinigungs-, Wartungs- und Räumungsarbeiten
2. Instandhaltung/-setzungen
 - periodische Zustandserfassung (Österreich)
 - freie Zustandserfassung (Deutschland/Schweiz)
 - Durchführung von Instandsetzungs- und Erneuerungsmaßnahmen
3. Lebensdauerverlängerung
 - Verstärkung von Bauteilen
 - Einsatz von Monitoring
4. Rückbau
 - Kenntnis der Materialien, Schadstoffe und als Basis für selektive und vollständige Rückbaumaßnahmen
 - Basis für eine Kreislaufwirtschaft

Auf dieser Basis werden die im Forschungsprojekt GreenInfraTwins umzusetzenden Anwendungsfälle weiter ausformuliert. Das Vorgehen hierzu wird im nachfolgenden Kapitel beschrieben.

Eine zeitliche Einordnung der Anwendungsfälle in Bezug auf durchzuführende Maßnahmen in der Nutzungs- und Rückbauphase sorgt für ein besseres Verständnis der möglichen Anwendungsgebiete, siehe Abbildung 3-3. Es ist zu erkennen, dass eine Anwendung zu verschiedenen Zeitpunkten erfolgt und sich auf unterschiedliche Maßnahmenarten bezieht. Beispielsweise fallen Betriebsaufgaben mindestens jährlich in der gesamten Nutzungsphase an und umfassen wiederkehrende Maßnahmen, die für die Aufrechterhaltung der Betriebstauglichkeit und die Verlangsamung des Abnutzungsvorrats erforderlich sind. Instandsetzungsmaßnahmen oder Maßnahmen zur Verlängerung der Lebensdauer werden nur in größeren Zeitabständen bzw. am Ende des Lebenszyklus durchgeführt.

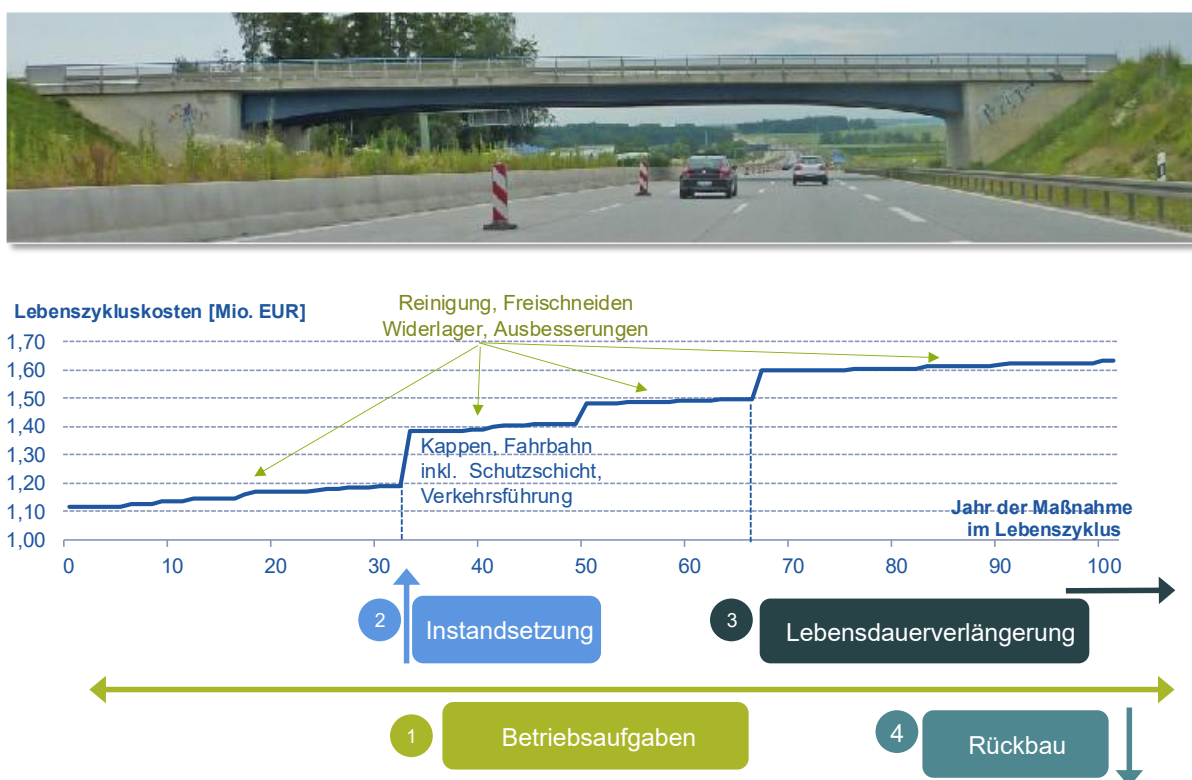


Abbildung 3-3. Zeitliche Verortung der Anwendungsfälle im Lebenszyklus

3.2 Ausformulierung der Anwendungsfälle

Mithilfe der Methodik der Anwendungsfallbeschreibung in Steckbriefen lassen sich die zu Grunde liegenden Prozesse inklusive der Motivation für deren Durchführung unter Verwendung von DZ in einheitlicher Form darstellen. Diese Aufbereitungsform ermöglicht es, die erforderlichen prozessualen und technischen Anforderungen als Basis für die Entwicklung von Demonstratoren zu identifizieren. Durch die genaue Beschreibung von Anwendungsfällen wird ein gemeinsames Verständnis aller am Projekt Beteiligten geschaffen, wie DZ für spezifische Aufgaben eingesetzt werden sollen und welche Informationen dafür angewendet werden müssen. Jeder Anwendungsfall beschreibt damit eine abgegrenzte, zu erbringende Leistung für die Gesamtzielerreichung.

Bevor mit der ausführlichen prozessualen und technischen Entwicklung der Anwendungsfälle für DZ gestartet werden kann, werden im ersten Schritt übersichtliche Steckbriefe der Anwendungsfallbeschreibung erstellt. Als Vorlage dienen die Aktivitäten im Rahmen der Entwicklung der BIM-Methode im Infrastrukturbau bzw. für Bundesfernstraßen. In diesem Kontext wurden durch BIM Deutschland standardisierte Mustersteckbriefe von BIM-Anwendungsfällen bezogen auf die Planungs- und Bauphase entwickelt [108]. Die Grundlage hierfür bildeten die zuvor bereits entwickelten Mustersteckbriefe seitens BIM4INFRA2020. Allerdings beziehen sich diese Vorlagen aktuell schwerpunktmäßig auf die Lebenszyklusphasen der Planung und des Baus eines Bauwerks, die Nutzungsphase wird nur mit einem Anwendungsfall grob beschrieben. Basierend auf den Ausführungen im vorherigen Abschnitt 3.1 werden im Folgenden Steckbriefe für vier Anwendungsfälle bereitgestellt:

- AwF 1 Betriebsaufgaben
- AwF 2 Instandhaltung/-setzung
- AwF 3 Lebensdauerverlängerung
- AwF 4 Rückbau

Als Strukturierungselemente werden das Ziel des Anwendungsfalles, eine kurze inhaltliche Beschreibung, der entstehende Nutzen, Voraussetzungen für die Umsetzung und üblicherweise bestehende Herausforderungen verwendet. Auf diese Weise wird ein Verständnis für den jeweiligen Anwendungsfall erzeugt. Auf eine Darstellung des auf dem aktuellen Regelwerk basierenden Prozessablaufes wird an dieser Stelle hingegen verzichtet, da nicht die technische Umsetzung der bestehenden Geschäftsprozesse in diesem Forschungsvorhaben betrachtet wird, sondern die Integration von Nachhaltigkeitsanalysen in die identifizierten Aufgabenbereiche.

Durch die erforderliche Anwendbarkeit der Ergebnisse für Deutschland, Österreich und die Schweiz können auch unterschiedlich geartete, länderspezifische Umsetzungen des Anwendungsfalles erforderlich werden. Dies führt zu unterschiedlichen Ausprägungen im Prozessablauf sowie zu damit verbundenen unterschiedlichen Anforderungen an den Daten- In- und Output. Auf diese Differenzierung wird im Rahmen der Beschreibung der Demonstratorprojekte in den nachfolgenden Kapiteln eingegangen.

3.3 Anwendungsfallsteckbriefe

Die nachfolgenden Abschnitte stellen eine allgemeine Beschreibung der Anwendungsfälle im Steckbriefformat bereit. Durch die einheitliche Darstellung soll gewährleistet werden, dass die zentralen Inhalte strukturiert, schnell und vergleichend erfassbar sind.

3.3.1 Anwendungsfall 01 – Betriebsaufgaben

AwF-Nr.	01	AwF-Name	Betriebsaufgaben		
Projekt-/Lebenszyklusphase	Betriebliche Unterhaltung	Wartung (D)/ Instandhaltung (A/CH)	Erhaltungsplanung	Instandsetzung Projektplanung	Rückbau
	x	x			
Definition	Maßnahmen im Rahmen der betrieblichen Unterhaltung bzw. Wartung/Instandhaltung des Bauwerks, um den Abnutzungsvorrat einzelner Bauteile zu verlangsamen. Beispiele für Maßnahmen sind das Spülen von Entwässerungsleitung, die Reinigung der Fahrbahnoberflächen, der Freischnitt von betriebsrelevanten Anlagen und Bauteilen (z. B. Widerlager), wetterbedingte Räumungsarbeiten (z. B. Schnee), die Ausbesserung des Korrosionsschutzes von Stahlbauteilen sowie das Aufbringen von Schmierstoffen bei technischen Anlagen (z. B. Brückenlager). Durchführung der Maßnahmen auf Basis eines strukturierten Wartungs-/Instandhaltungsplans sowie Dokumentation der eingesetzten Energie- und Ressourcenverbräuche inkl. Durchführungszeiten.				
Ziel	Optimierung aller Maßnahmen als Basis für die Erhaltung des IST-Zustandes und Verlangsamung der Degradation des Bauwerks.				
Nutzen	- Planungsoptimierung der erforderlichen Maßnahmen in Bezug auf alle einzusetzenden Ressourcen - Basis für die Ausformulierung von Anforderungen in Ausschreibungen - Möglichkeit zur Bereitstellung von Entscheidungshilfen, z. B. in Bezug auf die einzurichtenden Verkehrsführungen und Kombination von Maßnahmen - Vorliegen von Daten für die Analyse von Beeinträchtigung (Lärm/Verkehr) der umliegenden Wohnbebauung, Flora und Fauna				
Voraussetzungen	- Analyse vorhandener Wartungs-/Inspektionsarbeiten und deren Dokumentation - Inventarisierung relevanter Bauteile und Anlagen sowie der erforderlichen Wartungs- und Instandhaltungsprozesse - Kontinuierliche Erfassung aller Energie- und Stoffflüsse innerhalb der Systemgrenzen - Koordination Terminplan, inkl. Maßnahmen zu Sicherheit und Umweltschutz				
Herausforderungen	- Einbindung unterschiedlicher Beteiligten und Ausführenden, die die Daten erheben und weitergeben müssen - Unzureichende oder fehlende Dokumentation - Integration zusätzlicher Anforderungen in bestehende Verträge - Motivation der Beteiligten				

3.3.2 Anwendungsfall 02 – Instandhaltung/-setzung

AwF-Nr.	02	AwF-Name	Instandhaltung/-setzung		
Projekt-/ Lebenszyklusphase	Betriebliche Unterhaltung	Wartung (D)/ Instandhaltung (A/CH)	Erhaltungsplanung	Instandsetzung Projektplanung	Rückbau
			x	x	
Definition	Der Anwendungsfall umfasst die Planung und Ausführung aller enthaltenen Maßnahmen. Periodische Instandsetzung: Durchführung von zeitlich vordefinierten (periodischen) Instandsetzungs- und Erneuerungsmaßnahmen für klassische Brückenbauwerke als auch für integrale Strukturen. Zustandsbasierte Instandsetzung: Zustandsbasierte (flexible) Durchführung von Instandsetzungs- und Erneuerungsmaßnahmen, z. B. Erneuerung von Lagern, Randbalken und Korrosionsschutzergebnissen auf Basis von Prüfergebnissen (unter Beachtung der Tragsicherheit, Gebrauchstauglichkeit und Dauerhaftigkeit).				
Ziel	Periodisch: Identifikation der Auswirkungen von unterschiedlich langen vorgegebenen Perioden auf die Ergebnisse der Nachhaltigkeitsindikatoren, Schaffung einer Entscheidungshilfe für die Beurteilung der Vorteilhaftigkeit von periodisch durchgeführten Instandsetzungsmaßnahmen. Zustandsbasiert: Optimierung der Steuerung zustandsbasierter Instandsetzung- und Erneuerungsmaßnahmen durch Integration von Nachhaltigkeitsindikatoren.				
Nutzen	- Optimierung von Zeiträumen periodischer/zustandsbasierter Instandsetzungs- und Erneuerungsmaßnahmen - Steuerung von Verkehrsbeeinträchtigungen, Verminderung CO₂-Ausstoß - Sicherstellung der Betriebssicherheit - Schaffung einer Vergleichsmöglichkeit verschiedener Erhaltungsszenarien - Reduktion bauwerksbezogener Lebenszykluskosten - Planung finanzieller Ressourcen (inkl. Schaffung einer Planungssicherheit) - Grundlage für Empfehlung hinsichtlich der Optimierung von Stoffflüssen, Transporten, Recycling- und Re-Use-Vorgängen				
Voraussetzungen	- Vorhandene und strukturierte Erhaltungsstrategie - Berechnung der Lebenszykluskosten auf Basis existierender Richtlinien, Zugriff auf LCCO2 Tools (Österreich) - Kenntnis über Schwellenwerte, ULS/SLS-Zustände zur Erkennung von Abweichung von der Norm - Einheitliche Festlegungen für Systemgrenzen und Berechnungsvorschriften (innerhalb eines Landes)				
Herausforderungen	- Verfügbarkeit und Aktualität von Daten, z. B. zu Schwellenwerten - Sicherstellung der Datenqualität und -konsistenz über verschiedene Datenquellen hinweg - Berücksichtigung von Alterungseffekten und Materialermüdung in Simulationen und Modellen, inklusive Validierung der Simulationen - Identifikation der mit Maßnahmen verbundenen Energie- und Stoffflüsse - Sicherstellung der Anpassung von Berechnungsvorschriften an Vorgaben der gültigen Normen und Standards - Berücksichtigung der Auswirkungen von technischen Fortschritten (Produktentwicklungen) auf die verwendeten Eingangsdaten				

3.3.3 Anwendungsfall 03 – Nutzungsdauerverlängerung

AwF-Nr.	03	AwF-Name	Lebensdauerverlängerung		
Projekt-/Lebenszyklusphase	Betriebliche Unterhaltung	Wartung (D)/ Instandhaltung (A/CH)	Erhaltungsplanung	Instandsetzung Projektplanung	Rückbau
			x	x	
Definition	Der Anwendungsfall ist relevant für Bauwerke, die in den nächsten Jahren das Ende ihrer Nutzungsdauer erreichen werden. Ermittlung des Instandhaltungsbedarfs auf der Grundlage einer Auswertung vorhandener klassischer Inspektionsdaten bzw. eines probabilistischen Nachweiskonzeptes (Nachrechnung der Stufe III). Integration einer Nachhaltigkeitsbewertung im Hinblick auf notwendige Maßnahmen, z. B. Verstärkungsmaßnahmen, Integration eines zusätzlichen Monitoringsystems und vertieften Analyseverfahrens				
Ziel	Verlängerung der Nutzungsdauer des Bauwerks durch Optimierung der Erhaltungsplanung				
Nutzen	- Erweiterung des Handlungsspielraums für die koordinierte Erhaltungsplanung - Wiederherstellung der Sicherheit/Funktionalität des Bauwerks - Vergleichsmöglichkeit zwischen Maßnahmen zur Lebensdauerverlängerung und der Erneuerung - Optimierung von Zeiträumen periodischer/zustandsbasierter Wartungs- und Erhaltungsmaßnahmen - bessere Steuerung von Verkehrsbeeinträchtigungen, Aufrechterhaltung des Verkehrs, Verminderung CO₂ Ausstoß - Sicherstellung der Betriebssicherheit - Reduktion bauwerksbezogener Lebenszykluskosten - konstante Planung der Aufwendungen für das Bauprogramm, Budgetplanung über mehrere Jahrzehnte				
Voraussetzungen	- Bauwerk am Ende der Nutzungsdauer - Überblick über den Instandhaltungsbedarf und die entsprechenden Maßnahmen (Umfang, Art, Zeitpunkt) - Vollständige Materialinformationen - Geeignetes Analyse-Berechnungsverfahren - Vorhandensein von weiteren Überwachungssystemen (z. B. SHM) - Ergebnisse der Nachrechnung				
Herausforderungen	- Verfügbarkeit und Aktualität der Daten - Unzureichende oder fehlende Dokumentation (z. B. fehlende Materialinformationen) - Fehlen von zusätzlichen Überwachungssystemen - Ungewissheit über die Zustandsentwicklung - Identifikation der mit Maßnahmen verbundenen Energie- und Stoffflüsse - Sicherstellung der Anpassung von Berechnungsvorschriften an Vorgaben der gültigen Normen und Standards				

3.3.4 Anwendungsfall 04 - Rückbau

AwF-Nr.	04	AwF-Name	Rückbau		
Projekt-/Lebenszyklusphase	Betriebliche Unterhaltung	Wartung (D)/ Instandhaltung (A/CH)	Erhaltungsplanung	Instandsetzung Projektplanung	Rückbau
			x	x	x
Definition	Der Anwendungsfall Rückbau kommt zur Anwendung, sobald das Lebensdauerende einzelner Bauteile oder des gesamten Bauwerks erreicht ist. Es erfolge eine durchgehende Erfassung und Dokumentation des Bestandes auf Basis des Ist-Zustands. Die Ergebnisse zu verbauten Materialien, Schadstoffbelastungen, Kreislauffähigkeit, etc. einzelner Bauteile, Bauteilgruppen oder des gesamten Bauwerks können in aktueller Form jederzeit zugänglich.				
Ziel	Datenbereitstellung für die Durchführung von selektiven Rückbaumaßnahmen im Rahmen von Instandsetzung- und Erneuerungsmaßnahmen sowie einem Rückbau am Ende des Lebenszyklus. Schließen von Materialkreisläufen und Förderung einer Kreislaufwirtschaft.				
Nutzen	- Schaffung von Vergleichsmöglichkeiten einzelner Maßnahmen - Vermeiden von maßnahmenveranlassten Nacherhebungen - Durchführen von Portfolioanalysen - Grundlage für amtliche Statistik - Basis für die Erfüllung der Anforderungen nach § 13 Klimaschutzgesetz				
Voraussetzungen	- Einheitliche Kategorisierung muss verwendet werden - Strukturierte Übersicht zu verbauten Materialien und Mengen - Fortlaufende Dokumentation von Veränderungen am Bauwerk				
Herausforderungen	- Verfügbarkeit und Aktualität der Daten - unzureichende oder fehlende Angaben in Bestandsdokumenten (z. B. fehlende Materialinformation) - Änderungen/Anpassungen der Umweltauflagen und Dokumentationspflichten, die zu einer Nacherhebung von Daten führen - Zugänglichkeit zum Bauwerk im Rahmen von Bestanderfassungen				

3.4 Weiteres Vorgehen auf Basis der Anforderungsdefinition

Die in diesem Kapitel identifizierten Anwendungsfälle und die bereitgestellten Steckbriefe bilden die Grundlage für deren Umsetzung. Der Fokus liegt hierbei auf der Schaffung eines gemeinsamen Strukturierungsrahmens und einer Basis für die Auswahl von passenden Indikatoren, sodass eine Verwendung für alle drei Demonstratoren erfolgen kann. Bei der Anwendungsfalldefinition wird dafür der zu erwartende Nutzen durch die Umsetzung des Anwendungsfalles den bestehenden Herausforderungen gegenübergestellt.

Es wird entgegen der üblichen Herangehensweise bei der Definition von Anwendungsfällen darauf verzichtet, eine detaillierte Übersicht der erforderlichen Eingangsinformationen (Inputs) zu erstellen und die relevanten Ausgabeinformationen (Outputs) zu erstellen. Grund hierfür ist die Abhängigkeit der Inputs und Outputs von der softwarespezifischen Architektur der DZ, die erst in Kapitel 5 festgelegt wird. Die identifizierten Anwendungsfälle sind daher an dieser Stelle übergeordnet beschrieben. Darüber hinaus können länderspezifische (und damit auch demonstratorenspezifische) Anforderungen dazu führen, dass die Umsetzung der Anwendungsfälle unterschiedlich ausgeprägt sein wird, auch wenn die übergeordnete Zielstellung und Definition dieselbe ist.

Für die Nachhaltigkeitsanalyse ist es erforderlich, innerhalb der Anwendungsfälle zu berechnende Indikatoren für die drei Nachhaltigkeitsqualitäten festzulegen. Diese werden im nächsten Schritt konkretisiert und basieren auf existierenden Bewertungssystemen. Viele Indikatoren sind jedoch im deutschsprachigen Raum noch nicht standardisiert und erfordern eine Vielzahl an Eingangsdaten und darauf abgestimmte Algorithmen. Zudem müssen bestehende Indikatoren an die Bedingungen dieses Projekts angepasst werden, da sie sich meist auf die Planungs- und Bauphase fokussieren.

Nicht alle berechenbaren Indikatoren werden in den Demonstratoren umgesetzt. Stattdessen werden Schlüsselaspekte hervorgehoben, um eine praxisorientierte Grundlage für Nachhaltigkeitsanalysen in der Nutzungsphase von Brückenbauwerken mithilfe digitaler Zwillinge zu schaffen.

4 Konzept zur Nachhaltigkeitsbewertung

Die Bewertung der Nachhaltigkeit muss sicherstellen, dass Betriebsphase und Rückbau von Ingenieurbauwerken charakterisiert, systematisiert und kategorisiert und mit DZ umgesetzt werden können. Zu diesem Zweck werden Performance-Indikatoren der Nachhaltigkeit (NPI) inklusive zugehöriger Elemente, Werkzeuge und Modelle (EWM) eingesetzt und bestehende Erhaltungsmanagementkonzepte (Qualitätskontrollpläne) und Datenbanken der DACH-Länder miteinbezogen. Der in den vorherigen Abschnitten erarbeitete Wissensstand wird dabei berücksichtigt. Die Festlegung von Maßnahmenoptionen und deren Bewertung in Bezug auf die Nachhaltigkeit erfolgte stufengerecht. Je nach Zeithorizont werden die Maßnahmenoptionen sehr grob festgelegt (Kosten, Dauer). Dies spiegelt sich auch in der Abschätzung der NPI wider. Die Kategorisierung der NPI und der EWM erfolgte sowohl auf Basis durchgeführter Feldstudien als auch abgestützt auf Expertenwissen aus Gremien und Normungsarbeiten der Partner. Die kategorisierten NPI und die zugehörigen EWM werden mit den Entscheidungsprozessebenen (EPE) (Qualitätskontrollpläne) und Datenbanken der DACH-Länder verknüpft und für die Entwicklung des DZ im folgenden Abschnitt aufbereitet. Zu diesem Zweck wurden messbare, bewertbare Vergleichsgrößen (Grenzwerte) erarbeitet und Fallbeispiele gemeinsam mit den DACH-Betreibern/Kunden analysiert, um das Verständnis für die NPI und den dazugehörigen EWM zu entwickeln. Für eine effiziente Entscheidungsfindung wird auch eine Bewertung der Eingangsdaten aus den NPI und EWM für den DZ vorgenommen. Fehlende Eingangsdaten oder unzureichende Datenqualitäten werden gekennzeichnet und bei Bedarf mit Experten diskutiert. Systematisierte und kategorisierte Tabellen zur Bewertung der Nachhaltigkeitsperformance von Ingenieurbauwerken und für deren Begleitung mittels DZ wurden sowohl für die Betriebsphasen als auch für den Rückbau in Form von Performance-Indikatoren einschließlich zugehöriger Elemente, Werkzeuge und Modelle entwickelt. Fallstudienbasierte Nachhaltigkeitskontrollpläne und ein Gesamtkonzept zur Integration von Nachhaltigkeitsaspekten in das Erhaltungsmanagement wurden erstellt.

In diesem Kapitel wird unterschieden in die *Bestimmung und Berechnung der Nachhaltigkeitsindikatoren (Abschnitt 4.1)*, in die *Unterstützung von Entscheidungsprozessen (Abschnitt 4.2)* und in die *Integration in digitale Zwillinge (Abschnitt 4.3)*. Zusammengefasst lässt sich damit sagen, dass (noch) nicht alle Indikatoren digitalisierbar sein werden. Die nachfolgende Tabelle 4 soll unter Berücksichtigung dieser Herausforderungen eine Übersicht geben, welche Indikatoren für das Forschungsvorhaben und für das Aufsetzen des DZ grundsätzlich betrachtet werden können.

Tabelle 4. Übersicht Nachhaltigkeitsindikatoren als Basis für die Umsetzung in DZ

Qualität Nachhaltigkeit	Indikatorengruppe	Indikator	Einheit
1 Ökologische Qualität	1.1 Kreislaufwirtschaft / Ressourcen	1.1.1 Materialität des Bauwerks	Masse-%
		1.1.2 Monetärer Materialwert	EUR
		1.1.3 Schad- u. Risikostoffe	kg
		1.1.4 Demontagefähigkeit	qualitativ und Masse-%
		1.1.5 Materialverwertung – Potentiale Kreislauffähigkeit	qualitativ und Masse-%
	1.2 Risiken für die lokale Umwelt	Fläche des ökologisch gestörten Lebensraums durch Lärmbeeinträchtigung der Fauna	m ²
	1.3 Flächeninanspruchnahme	Flächeninanspruchnahme Bauwerk (dauerhaft) und Bauprozesse (vorübergehend)	gewichtete m ²
	1.4 Externe Umwelteffekte	Verkehrsbedingte Emissionen infolge betrieblicher und baubedingter Verkehrsbeeinträchtigungen (CO ₂ , NO _x , PM _{2.5} , PM ₅ , PM ₁₀)	Masse
	1.5 Ökobilanz	1.5.1 Globales Erwärmungspotential (GWP)	kg CO ₂ -Äquiv.
		1.5.2 Eutrophierungspotential (EP)	kg PO ₄ ³⁻ -Äquiv.
		1.5.3 Ozonschichtabbaupotential (ODP)	Kg R11-Äquiv.
		1.5.4 Versauerungspotential (AP)	kg SO ₂ -Äquiv.
		1.5.5 Ozonbildungspotential (POCP)	kg C ₂ H ₄ -Äquiv.
		1.5.6 Kumulierter Energieaufwand (KEA)	MJ
2 Ökonomische Qualität	2.1 Bauwerks-bezogene Lebenszykluskosten	Materialkosten, prozessbezogene Kosten	EUR
	2.2 Externe Kosten (monetarisierter externe Effekte)	Kosten aufgrund von Zeitverlusten, Umleitungen und erhöhten Fahrzeugbetriebskosten	EUR
3 Sozio-kulturelle und funktionale Qualität	3.1 Schutzgut Mensch	3.1.1 Lärmbeeinträchtigung von Menschen	dB / pax
		3.1.2 Arbeitssicherheit	Anzahl
	3.2 Verfügbarkeit	Reisezeitverluste	h
4 Technische Qualität	4.1 Zuverlässigkeit	Zuverlässigkeitsindex	–

4.1 Bestimmung und Berechnung der Nachhaltigkeitsindikatoren

Die Auswahl der Nachhaltigkeitsindikatoren erfolgt auf Basis der Literaturrecherche im vorherigen Kapitel und des Expertenwissens der Projektbearbeitenden. Im Folgenden werden die Beschreibung sowie die Ermittlungs- und Berechnungsmethoden für die Nachhaltigkeitsindikatoren vorgestellt, die im Rahmen von DZ verwendet werden können.

4.1.1 Indikatoren Bereich Ökologie

Indikatorengruppe 1.1 Kreislaufwirtschaft

Da derzeit allgemein gültige Indikatoren für die Nachhaltigkeitsbewertung im Infrastrukturbereich noch fehlen, wird für diese Indikatorengruppe auf Arbeiten der DGNB aus dem Hochbau zurückgegriffen (DGNB 2024). Es werden fünf Indikatoren verwendet, die zum einen die verbauten Materialien spezifizieren sowie die zukünftige Kreislauffähigkeit bewerten:

- Indikator „**Materialität des Bauwerks**“: Es werden die im gesamten Bauwerk verbauten Materialien in Massen-Prozenten (Masse-%) aufgeführt. Wenn als Grundlage für die Berechnung ein BIM-Modell verwendet wird, kann eine bauteilbezogene Aufstellung erfolgen.
- Indikator „**Monetärer Materialwert**“: Auf Basis der Materialität kann unter Verwendung von materialspezifischen Kostenansätzen der bauteil- und bauwerksbezogene Materialwert in Euro berechnet werden. Die Kostenansätze müssen in Abhängigkeit des Bezugsjahres definiert werden.
- Indikator „**Schad- und Risikostoffe**“: Die Auflistung der in einem Bauwerk verbauten Schad- und Risikostoffe in kg und nach Möglichkeit mit Angabe des Einbauortes stellt eine Grundlage für strukturierte Demontageprozesse dar. Es handelt sich hierbei um eine Dokumentationsaufgabe.
- Indikator „**Demontagefähigkeit**“: Die Einstufung der Demontagefähigkeit von Bauteilen oder Bauteilkomponenten erfolgt qualitativ auf einer vorab definierten Skala. Mit Hilfe dieser Skala wird ausgewiesen, wie viel Masse-% des Gesamtbauwerks in die einzelnen Kategorien fallen.
- Indikator „**Materialverwertung – Potentiale Kreislauffähigkeit**“: Die möglichen Potentiale, die bei einer Materialverwertung am Lebenszyklusende entstehen können, werden durch diesen Indikator abgeschätzt. Dazu wird angegeben, wie viele Masse-% des Gesamtbauwerks wiederverwendet, recycelt, verwertet (z. B. durch Verbrennung)

oder deponiert werden können. Die Abschätzung erfolgt auf Basis der zum Bewertungszeitpunkt vorhandenen Technologien, ein zukünftiger Bewertungszeitpunkt kann aufgrund eines technologischen Fortschritts zu abweichenden Ergebnissen führen.

Indikatorengruppe 1.2 Risiken für die lokale Umwelt

Als Indikator für die Beschreibung der Risiken für die lokale Umwelt wird die Fläche (in m²) des durch Lärmbeeinträchtigung der Fauna gestörten Lebensraums verwendet. Es werden dabei alle Flächen berücksichtigt, die oberhalb eines Immissions-Grenzwerts liegen, der sich in Abhängigkeit der Bauwerkslage aus geltenden Vorschriften ergibt. Grundlage für die Bewertung sind Lärmkarten, die erstellt werden müssen.

Weitere Indikatoren, die Risiken auf die lokale Umwelt (Flora und Fauna) bewerten, beziehen sich auf Aspekte auf Netzebene (Vernetzung von Biotopen, Zerschneidungseffekte), die auf Einzelbauwerksebene nicht bewertbar sind und aus diesem Grund hier nicht weiter betrachtet werden. Daher wird für die Indikatorengruppe „Risiken für die lokale Umwelt“ in diesem Forschungsprojekt nur ein Indikator angewendet.

Indikatorengruppe 1.3 Flächeninanspruchnahme

Im Rahmen des Kriteriums Flächeninanspruchnahme wird die durch das Bauwerk und die Bau- und Nutzungsprozesse in Anspruch genommene Fläche gewichtet berechnet. Die Quantifizierung der Flächen erfolgt auf Basis der jeweiligen Vornutzungsart (z. B. Verkehrsfläche, Waldfläche oder Betriebsfläche), der Nutzungsdauern und der Versiegelungsarten. Auf dieser Grundlage kommen Auf- und Abschlagsfaktoren zur Anwendung, mit denen die Größe der Flächen in m² multipliziert wird. Das Verfahren wird in dem BAST-Dokument V 361 beschrieben.

Indikatorengruppe 1.4 Externe Umwelteffekte

Der Indikator "Externe Umwelteffekte" erfasst die Umweltauswirkungen von verkehrsbedingten Emissionen bei Infrastrukturprojekten. Er betrachtet dabei sowohl temporäre Belastungen während der Bauphase, wie etwa durch Umleitungen und Staus, als auch dauerhafte Veränderungen nach Fertigstellung des Projekts, beispielsweise durch neue Verkehrsführungen oder veränderte Knotenpunkte.

Gemessen werden dabei verschiedene Emissionen: Kohlendioxid (CO₂) als Treibhausgas, Stickoxide (NO_x) als Luftschadstoffe sowie Feinstaub in den Größenklassen PM_{2.5}, PM₅ und PM₁₀. Durch diese Messungen können verschiedene Planungsvarianten verglichen und Maßnahmen zur Emissionsminimierung entwickelt werden, was eine ganzheitlichere Bewertung der Umweltauswirkungen ermöglicht.

Das Berechnungsverfahren erfolgt analog zu dem der externen Kostenberechnung, allerdings findet keine Monetarisierung der externen Effekte statt. Die Erläuterungen zu den externen Kosten finden sich in Kap. 9.1.8 .

Indikatorengruppe 1.5 Ökobilanz

Die Ökobilanzierung ist ein in der Normenreihe der DIN EN ISO 14040 beschriebenes und seit über 20 Jahren etabliertes Verfahren zur Quantifizierung von Umweltwirkungen. Im Bauwesen werden standardmäßig fünf Umweltkategorien verwendet, die auch in diesem Projekt Anwendung finden:

- Indikator Globales Erwärmungspotential (GWP)
- Indikator Eutrophierungspotential (EP)
- Indikator Versauerungspotential (AP)
- Indikator Ozonschichtabbaupotential (ODP)
- Indikator Ozonbildungspotential (POCP)

Die Berechnung der fünf Indikatoren erfolgt auf Grundlage derselben Berechnungsvorschrift, wobei für die einzelnen Wirkungskategorien angepasste Charakterisierungsfaktoren verwendet werden. Als Beispiel ist im Folgenden die Berechnungsmethode für das Globale Erderwärmungspotenzial (GWP = Global Warming Potential) aufgeführt.

Der Indikator GWP wird in [kg CO₂-Äquivalente] angegeben und die Berechnung erfolgt auf Basis von vorbilanzierten und tabellarisch aufbereiteten Werten der Umweltwirkung bezogen auf eine funktionelle Einheit, die i.d.R. auf das Materialvolumen bezogen ist. Die Werte werden in Datenbanken wie der ökobau.dat oder in Umweltproduktdeklarationen (Environmental Product Declarations – EPD) für verschiedene zeitliche Systemgrenzen (z. B. Materialherstellung, Transport, zeitliche Module der Nutzungsphase, Rückbauprozesse) bereitgestellt. Die Berechnung des Indikators erfolgt nach der in Kap. 9.1.9 dargestellten Berechnungsformel. Wenn die Werte für GWP_{total} nicht in der EPD vorhanden sind, müssen diese vom Benutzer bereitgestellt werden.

Zusätzlich zu den Umweltwirkungen können verschiedene Indikatoren zur Ressourcennutzung zum Einsatz kommen. Hier wird nur ein Ressourcen-Indikator verwendet, der den kumulierten Energiebedarf (Cumulative Energy Demand – CED) quantifiziert. Dieser Indikator wird in [MJ] angegeben und bezieht sich auf die Gesamtenergie, die bei der Herstellung oder dem Abbruch von Materialien verbraucht wird. Die tabellarischen Eingangswerte pro Material und Lebenszyklusphase (Module Herstellung, Nutzung, Rückbau) und Gutschriften sind auch in Datenbanken und EPD angegeben, wo sie sich auf die Grundeinheit des Materials (z. B. m^3) und die Module (z. B. A1-3 - Herstellung, A4-Transport, A5-Einbau, C1-Abbruch, C2-Transport, C3-Recycling) beziehen. Die allgemeingültige Berechnungsformel für diesen Indikator ist in Kap. 9.1.14 enthalten.

4.1.2 Indikatoren Bereich Ökonomie

Indikatorengruppe 2.1 Bauwerksbezogene Lebenszykluskosten

Die **Lebenszykluskostenrechnung** ist als Methode in der ISO 15686-5 beschrieben und wird in der DIN EN ISO 15643 referenziert. Für die Berechnung dieses Indikators werden alle Kosten innerhalb der Systemgrenzen aufsummiert. Auf diese Weise können die Kosten für die Materialherstellung, den Transport und den Einbau sowie die Erhaltungs- und Rückbaukosten der zu untersuchenden Variante jeweils in Euro [€] bestimmt und auf eine funktionale Einheit (i.d.R. m^2 Brückenfläche) bezogen werden. Die Werte werden durch die Eingabe des Anwenders festgelegt. Für die Erhaltungskosten können beispielsweise Angaben zu den Lebenszykluskosten nach RVS 5.11.15 herangezogen werden, auch das Dokument B 125 der BAST enthält grobe Kostenkennzahlen für die Nutzungsphase. Die Baukosten in Euro [EUR] je Untersuchungsvariante werden anhand der Summe der berücksichtigten Kosten ermittelt.

Des Weiteren können die Planungskosten miteinbezogen werden, wenn diese als innerhalb der Systemgrenzen liegend definiert werden. Bei der Bestimmung der Planungskosten werden die für die Planung der Verstärkungsvariante anfallenden Personalkosten in €/h inkl. einem Zuschlag für Sachkosten in % sowie die Planungsdauer in Stunden [h] berücksichtigt. Die Input-Daten werden durch den Anwender ermittelt und festgelegt.

Es kann je nach Anwendungsfall und im Demonstrator abzubildender Maßnahme zur Entscheidungsunterstützung erforderlich sein, unterschiedliche Systemgrenzen zu definieren. Die Festlegung muss nutzerseitig erfolgen und kann nicht systemseitig vordefiniert werden. Darüber hinaus müssen in verschiedenen Jahren anfallende Kosten auf einen Zeitpunkt (i.d.R. das Jahr der Baumaßnahme und größerer Instandsetzungsmaßnahmen) bezogen werden,

indem eine Diskontierung durchgeführt wird. Das Berechnungsverfahren sowie Vorschläge für geeignete Diskontierungsfaktoren liefern die oben erwähnten Standards und Richtlinien.

Indikatorengruppe 2.2 Externe Kosten

Es handelt sich hierbei um externe monetarisierte Effekte, wie z.B. Kosten, die aufgrund von Zeitverlusten, Umleitungen und erhöhten Fahrzeugbetriebskosten entstehen. Es ist sicherzustellen, dass monetarisierte Effekte nicht in mehreren anderen Indikatorengruppen doppelt in die Gesamtbewertung miteingehen.

4.1.3 Indikatoren Bereich soziokulturelle und funktionale Qualität

Indikatorengruppe 3.1 Schutzgut Mensch

Die Auswirkungen von verschiedenen Maßnahmen in der Nutzungs- und Rückbauphase von Brückenbauwerken auf Menschen lassen sich vor allem in die drei Bereiche Lärm und Arbeitssicherheit einordnen. Für diese drei Bereiche können Indikatoren definiert werden.

- Indikator „**Lärmbeeinträchtigung von Menschen**“: Die Berechnung dieses Indikators erfolgt anhand zweier Parameter: des Lärmpegels [dB] und der Anzahl der betroffenen Personen [Personenanzahl]. Durch den Indikator soll die Lärmbelastung für die Bevölkerung, die aufgrund der baulichen Umsetzung der jeweiligen Variante entsteht, festgestellt werden. Der Lärmpegel, der durch die bauliche Umsetzung der Verstärkungsvarianten entsteht, sowie die Anzahl der betroffenen Personen müssen vom Anwender definiert werden. Die Ergebnisgröße wird in Dezibel je Personenanzahl [dB/pax] angegeben.
- Indikator „**Arbeitssicherheit**“: Die Arbeitssicherheit erfasst die Anzahl der Unfälle, die während der Bauphase auftreten, und spiegelt die Sicherheit für die am Bau beteiligten Personen wider. Der zur Bewertung dieses Indikators angewandte Ansatz wurde im Rahmen des InfraROB-Projekts¹ entwickelt und basiert auf einer Monte-Carlo-Simulation der Tätigkeiten innerhalb des Baustellenbereiches unter Einbeziehung des fließenden Verkehrs.

Indikatorengruppe 3.2 Verfügbarkeit

Die **Verfügbarkeit** beschreibt die Auswirkungen der Bauarbeiten auf die Nutzer des Bauwerks, insbesondere in Bezug auf Zeitverluste bzw. zusätzliche Reisezeiten und Umwege,

¹ InfraROB Projektwebseite <https://infrarobproject.com>, letzter Zugriff: 28.09.2024

die durch die Baumaßnahmen verursacht werden. Eine schnelle und effiziente Bauweise, die die Verkehrsbeeinträchtigungen minimiert, ist aus sozio-kultureller Sicht von großer Bedeutung. Bspw. kann die Wahl der Betongüte die Bauzeit direkt beeinflussen und somit Auswirkungen auf den Verkehrsfluss und die Nutzerfreundlichkeit haben. Eine Betongüte, die schneller verarbeitet werden kann oder weniger häufige Instandhaltungsmaßnahmen erfordert, verbessert die Verfügbarkeit der Brücke und minimiert die damit verbundenen, negativen Folgen für die Nutzer.

Der Indikator „Reisezeitverlust“ wird in Stunden [h] für alle Verkehrsteilnehmenden, die das Bauwerk aufgrund einer administrativen Maßnahme entlang des Baustellenbereichs mit reduzierter Geschwindigkeit befahren, bewertet. Es wird davon ausgegangen, dass es während den Bauarbeiten auf dem Bauwerk zu keinen Verkehrsstaus aufgrund der reduzierten Kapazität kommt.

4.1.4 Indikatorenbereich Technische Qualität

Indikatorengruppe 4.1 Zuverlässigkeit

Zuverlässigkeit ist die Wahrscheinlichkeit, dass eine Anlage (z. B. ein Brückenbauwerk) während ihrer Lebensdauer funktionsfähig bleibt. In der ingenieurtechnischen Praxis ist es zweckmäßig, sich mit dem Gegenteil zu befassen, d. h. mit der Versagenswahrscheinlichkeit. Diese Wahrscheinlichkeit bezieht sich auf verschiedene Arten von Versagen, die strukturell, betrieblich oder durch Vorschriften des Eigentümers/Betreibers der Infrastruktur oder durch Normen und Standards definiert sind. Der **Zuverlässigkeitsindex** β wird üblicherweise verwendet, um die Zuverlässigkeit eines Bauwerks zu bewerten. Die Schwellenwerte des Zuverlässigkeitsindex β für den Grenzzustand der Tragfähigkeit und den Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit sind in Normen (z. B. Eurocode, SIA) angegeben.

In der traditionellen Entscheidungsfindung für Verkehrsinfrastrukturen bestimmen dieser Indikator und wirtschaftliche Faktoren (z. B. Budget), wie häufig die Maßnahmen durchgeführt werden müssen. Die Instandhaltungs-, Instandsetzungs- und Erneuerungsmaßnahmen werden einmal oder mehrmals während der Lebensdauer eines Bauwerks geplant und durchgeführt, je nach den bei Inspektionen festgestellten Schäden und den Prognoseergebnissen der Zustandsänderungen von Bauwerksteilen. In einigen Fällen (z. B. beim Austausch von Lagern) werden die Bauwerksteile alle x Jahre zustandsunabhängig instandgesetzt bzw. ersetzt.

Die Berechnung der β -Werte auf Basis von bei Inspektionen beobachteten Schäden ist komplex und standortspezifisch. Für die Seitenhafenbrücke wurde eine Analyse der Querkrafttragfähigkeit im kritischen Anschlussbereich der Stahlrohrstützen zu den gevouteten Plattenbereichen unter Anwendung des Zuverlässigkeitsindex-Verfahrens (β -Werten) durchgeführt. Eine Reduktion der Bügelbewehrungsfläche um 20% wurde berücksichtigt. Grundlage der Analyse waren die Querkraftnachweisformulierung des Eurocodes EN 1992-2 sowie die Lastkombinationen der Normeneinwirkungsmodelle der Ursprungsstatik, welche auch aus tatsächlich überwachten Verkehrsprozessen abgeleitet werden können, um einen realitätsnäheren β -Index zu bestimmen. Der Zuverlässigkeitsindex ergab einen Wert von 4,65, was gemäß der Schadensfolgeklasse CC3n eine Nutzungsdauer von 83 Jahren impliziert. Nach Verstärkung stieg der Zuverlässigkeitsindex auf 5,3, was eine verlängerte Nutzungsdauer von 125 Jahren zur Folge hatte.

Für die Berechnung des Zuverlässigkeitsindex β auf Querschnittsebene wurden die Methoden nach Basler und Cornell sowie die Latin Hypercube Sampling Methode nach Strauss (2024) angewendet. Die Bestimmung der Nutzungsdauer auf Basis des vorhandenen Zuverlässigkeitsindex β erfolgte entsprechend dem Verfahren nach EN 1990 und Strauss & Bergmeister (2022).

Zuverlässigkeitsanalyse mit Grenzzustandsfunktionen

Im Rahmen der Zuverlässigkeitstheorie wird Sicherheit nicht nur über feste Teilsicherheitsbeiwerte oder deterministische Nachweise beschrieben, sondern als Wahrscheinlichkeitsproblem verstanden. Grundlage dieser Betrachtung ist eine Grenzzustandsfunktion G , welche den Zustand eines Systems oder Bauteils in Abhängigkeit von Zufallsvariablen $X_1, X_2, \dots, X_n$ beschreibt. Dabei kennzeichnet $G > 0$ einen sicheren Zustand, während $G < 0$ einen Versagensfall beschreibt. Ziel ist es, die Versagenswahrscheinlichkeit $p_f = P(G < 0)$ zu bestimmen und daraus das Sicherheitsniveau eines Systems quantitativ abzuleiten. Die zentrale Herausforderung besteht darin, dass die Zufallsvariablen häufig streuen und Grenzzustandsfunktionen sowohl linear als auch nichtlinear sein können. Aus diesem Grund wurden verschiedene Verfahren entwickelt, die je nach Problemstellung unterschiedliche Genauigkeit, Rechenaufwand und Interpretierbarkeit bieten.

Monte-Carlo-Methode und Sicherheitsbewertung über p_f und β

Die Monte-Carlo-Methode zählt zu den am einfachsten verständlichen Verfahren der Zuverlässigkeitsanalyse und ist besonders im Ingenieurwesen weit verbreitet, da sie ohne komplexe analytische Herleitungen auskommt. Grundidee ist es, eine Grenzzustandsfunktion G , die von mehreren Zufallsvariablen abhängt, nicht direkt über Integrale oder geschlossene Lösungen auszuwerten, sondern sie sehr häufig mit zufällig erzeugten Eingangswerten zu berechnen. Eine typische Grenzzustandsfunktion wird dabei in allgemeiner Form als $G = G(a_0, X_1, X_2, \dots, X_n)$ beschrieben. Das System gilt als sicher, solange $G > 0$, während ein Versagensfall auftritt, wenn $G < 0$.

Im Rahmen der Simulation wird für jede Zufallsvariable X_i eine Realisation x_{ik} erzeugt, wobei der Index k für die jeweilige Simulation steht. Jeder vollständige Satz dieser Realisationen liefert einen Funktionswert $g_k = G(a_0, x_{1k}, x_{2k}, \dots, x_{nk})$. Zentrale Voraussetzung ist dabei ein Zufallsgenerator, der Zahlen im Intervall $[0, 1]$ erzeugt. Diese Zufallszahlen werden als Werte der jeweiligen Verteilungsfunktion interpretiert und anhand der bekannten Verteilungen in konkrete Realisationen der Zufallsgrößen umgerechnet. Auf diese Weise entsteht eine große Anzahl von Funktionswerten g_k , die das Verhalten der Grenzzustandsfunktion statistisch abbilden.

Die Versagenswahrscheinlichkeit wird anschließend frequentistisch bestimmt, indem die Anzahl der Versagensfälle gezählt wird. Als Versagensfälle gelten alle Simulationen, bei denen $g_k < 0$ ist. Wird die Anzahl dieser Fälle mit z_0 bezeichnet und die Gesamtzahl der Simulationen mit z , ergibt sich die Versagenswahrscheinlichkeit näherungsweise zu $p_f \approx z_0/z$. Je kleiner die reale Versagenswahrscheinlichkeit ist, desto größer muss die Anzahl der Simulationen gewählt werden, um eine ausreichend geringe statistische Unsicherheit zu erhalten. Gerade im Bereich sehr kleiner Werte von p_f steigt der Rechenaufwand stark an, weshalb Monte-Carlo-Simulationen für sehr hohe Sicherheitsniveaus in der Praxis rasch sehr viele Stichproben benötigen.

Grenzzustandsfunktion $G = R - S$ als Grundmodell der Zuverlässigkeit

Eine zentrale Rolle in der Zuverlässigkeitstheorie spielt die Grenzzustandsfunktion $G = R - S$. Dabei beschreibt R den Widerstand eines Tragwerks oder Bauteils und S die einwirkende Beanspruchung. Das Versagen tritt dann ein, wenn der Widerstand kleiner als die Beanspruchung wird, also $R < S$. In diesem Fall wird die Grenzzustandsfunktion negativ, $G < 0$, während $G > 0$ den sicheren Bereich kennzeichnet. Aufgrund ihrer einfachen Struktur ist

diese Funktion historisch wie technisch besonders bedeutsam und dient als Ausgangspunkt für viele weiterführende Methoden der Zuverlässigkeitsanalyse.

Klassischer probabilistischer Ansatz über das Konvolutionsintegral

Die Versagenswahrscheinlichkeit für das Grundproblem $G = R - S$ lässt sich formal exakt bestimmen, indem die Wahrscheinlichkeit $P(R < S)$ berechnet wird. Der klassische Ansatz beschreibt diesen Zusammenhang über ein Integral, das die Verteilungen von Widerstand und Beanspruchung miteinander verknüpft. Dazu wird die Dichtefunktion $f_S(x)$ der Beanspruchung mit der Verteilungsfunktion $F_R(x)$ des Widerstands kombiniert und über alle möglichen Werte integriert. Dieses sogenannte Faltungs- oder Konvolutionsintegral ist formal einfach formuliert, führt aber nur in Spezialfällen zu geschlossenen Lösungen.

In der praktischen Anwendung wird dieses Integral daher meist numerisch ausgewertet. Allerdings ist es in bestimmten Fällen, etwa bei Rechteckverteilungen oder anderen einfachen Verteilungstypen, möglich, die Integration analytisch durchzuführen. Das Konvolutionsintegral verdeutlicht in seiner Struktur sehr anschaulich, dass Versagen immer dort entsteht, wo die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten einer Beanspruchung $S=x$ mit der Wahrscheinlichkeit kombiniert wird, dass der Widerstand gleichzeitig kleiner als dieser Wert ist. Damit liefert dieser Ansatz eine theoretisch saubere Grundlage, die zugleich erklärt, warum viele technische Probleme trotz einfacher Form der Grenzzustandsgleichung rechnerisch schnell komplex werden können.

Sicherheitsindex nach Basler/Cornell und Zusammenhang zu μ_f

Um schneller zu Ergebnissen zu gelangen, wurde für das Problem $G = R - S$ ein besonders effizientes Verfahren entwickelt, das auf Mittelwert und Standardabweichung der Zufallsgrößen basiert. Basler führte dazu die Sicherheitsmarge $M = R - S$ ein, die als Differenz zweier Zufallsvariablen wiederum selbst eine Zufallsvariable ist. Wenn R und S unabhängig und normalverteilt sind, ist auch M normalverteilt. Der Mittelwert der Sicherheitsmarge ergibt sich aus der Differenz der Mittelwerte, $\mu_M = \mu_R - \mu_S$, und die Streuung folgt aus der Wurzel der Quadratsumme der Standardabweichungen, $\sigma_M = \sqrt{(\sigma_R^2 + \sigma_S^2)}$.

Auf Basis dieser Sicherheitsmarge lässt sich der Sicherheitsindex β besonders anschaulich interpretieren. Er gibt an, wie viele Standardabweichungen zwischen dem Mittelwert der Sicherheitsmarge und der Versagensgrenze $M = 0$ liegen. Formal ergibt sich $\beta = \mu_M / \sigma_M$. Je größer dieser Wert ist, desto weiter liegt die mittlere Sicherheitsreserve vom Grenzbereich

entfernt und desto kleiner ist die Versagenswahrscheinlichkeit. Unter der Annahme einer Normalverteilung kann die Versagenswahrscheinlichkeit direkt über die Standardnormalverteilung bestimmt werden, typischerweise mit $p_f = \Phi(-\beta)$. Dieses Ergebnis verbindet eine sehr kompakte Sicherheitskennzahl mit einer quantitativen Wahrscheinlichkeit und macht damit eine objektivere Bewertung möglich als eine rein deterministische Faktorbetrachtung.

Für eine vertiefende Behandlung von Zuverlässigkeitsproblemen mit mehreren Basisvariablen sowie nichtlinearen Grenzzustandsfunktionen (inklusive weiterführender FORM-Ansätze, numerischer Verfahren und praktischer Anwendungsbeispiele) wird an dieser Stelle auf die einschlägige weiterführende Literatur verwiesen.

Rechenunterstützung und Umgang mit Korrelationen

Mit steigender Anzahl von Variablen und wachsender Komplexität der Grenzzustandsfunktionen wird deutlich, dass die beschriebenen Methoden praktisch nur noch mithilfe von Computerprogrammen effizient durchführbar sind. Insbesondere die Kombination aus Iterationen, Ableitungsberechnungen und Tail Approximation führt zu Rechenschleifen, die händisch nicht sinnvoll beherrschbar sind. Aus diesem Grund werden spezialisierte Programme eingesetzt, die unterschiedliche Verfahren wie Monte Carlo, FOSM oder FORM implementieren und die Ergebnisse zusätzlich grafisch aufbereiten können, etwa über Histogramme, Dichtefunktionen oder Darstellungen des Bemessungspunktes.

Ein weiterer Aspekt ist die mögliche Korrelation zwischen Variablen. Korrelationen können die Versagenswahrscheinlichkeit sowohl erhöhen als auch verringern, je nachdem, ob die Variablen positiv oder negativ gekoppelt sind. Positiv korrelierte Größen können beispielsweise dadurch entstehen, dass mehrere Qualitätsmerkmale auf einer Baustelle gemeinsam schlechter werden, während negative Korrelationen auftreten können, wenn sich zwei Einwirkungen gegenseitig ausschließen. Obwohl die mathematische Berücksichtigung prinzipiell möglich ist, wird sie in vielen Anwendungen weggelassen, weil Korrelationskoeffizienten häufig nicht zuverlässig bekannt sind und die Eingabe einer vollständigen Korrelationsmatrix aufwendig ist. In der Praxis wird daher oft empfohlen, den Einfluss möglicher Abhängigkeiten über Vergleichsrechnungen und Sensitivitätsstudien abzuschätzen, anstatt unsichere Korrelationswerte pauschal anzunehmen.

4.2 Unterstützung der Entscheidungsprozesse

Im Folgenden werden aus den Anwendungsfällen begleitete Entscheidungsprozesse skizziert. Diese werden genutzt, um ein Gesamtkonzept für Nachhaltigkeitsindikatoren für die DZ zu erstellen. Die Prozessanalysen sind auf die definierten Anforderungen und beschriebenen Anwendungsfälle abgestimmt und werden daher als Grundlage für die Konzeptualisierung der DZ im nächsten Abschnitt verwendet. Eine wichtige zu erfüllende Randbedingung war die Fokussierung auf Aufgaben und Prozesse in der Betriebs- und Rückbauphase. Die in diesen Lebenszyklusphasen vorhandenen oder zu erhebenden Daten bilden die Grundlage für alle Berechnungen, die zuvor beschrieben und ausgewertet wurden. Dabei wurden auch die jeweils verwendeten zeitlichen und räumlichen Systemgrenzen berücksichtigt.

AwF 1 Betriebsaufgaben

In der kompletten Nutzungsphase von Infrastrukturbauwerken ist die Durchführung von verschiedenen Betriebsaufgaben erforderlich und die Durchführung wird jeweils vom Infrastrukturbetreiber veranlasst. Die ökologischen Auswirkungen und die pro Maßnahme entstehenden Kosten von Betriebsaufgaben sind im Vergleich zu Instandsetzungsmaßnahmen gering, allerdings ist die Durchführungshäufigkeit durch die i.d.R. jährlich oder mehrmals jährlich stattfindenden Maßnahmen sehr hoch.

Es handelt sich bei Betriebsaufgaben um Prozesse wie das Freischneiden von Widerlagern, die Spülung der Entwässerung oder die Säuberung von Lagern. In der deutschen RPE-ING werden diese Aufgaben als betriebliche Unterhaltung klassifiziert. Auch der Winterdienst und die Beseitigung von Unfallschäden sind als Betriebsaufgaben einzuordnen, allerdings werden diese Aufgaben für einen Streckenzug durchgeführt und es erfolgt keine Durchführung auf Einzelbauwerksebene. Daher findet diese Maßnahmenart im Weiteren keine Berücksichtigung.

Als Indikatoren werden die Kosten in der Nutzungsphase (als Teil der Lebenszykluskosten), ökobilanzielle Auswirkungen, die Bewertung der Arbeitssicherheit sowie Lärmemissionen verwendet. Die Ergebnisse der Indikatorenberechnung werden jährlich erfasst.

Die Kostenberechnung und die Berechnung der Ökobilanz finden auf Grundlage der im vorherigen Abschnitt beschriebenen Berechnungsmethoden für alle im Rahmen der einzubeziehenden Betriebsaufgaben erforderlichen Prozesse statt. Als Grundlage dienen die Energie- und Stoffflüsse sowie die zur Durchführung erforderlichen Arbeitszeiten inkl. Vor- und Nachbereitung.

Die Berücksichtigung von Lärmbelästigung wird durchgeführt, da Lärm die Lebensqualität der betroffenen Personen in der unmittelbaren Umgebung erheblich beeinflussen kann. Ausgedrückt wird die Lärmbeeinträchtigung durch zwei Parameter: den Lärmpegel und die Anzahl der betroffenen Personen. Im vorliegenden Anwendungsfall werden die Baumaschinen, die für die Umsetzung der Varianten notwendig sind, als Lärmquelle herangezogen. Hierzu gibt es keine Werte aus Datenbanken, weshalb diese aus Produktdatenblättern entnommen oder bei Herstellern angefragt werden müssen. Weiters muss die Anzahl der betroffenen Bevölkerung vom Anwender definiert werden. Im Vergleich der beiden Varianten wird somit die Intensität des erzeugten Lärms untersucht, um die Auswirkungen der durchgeführten Maßnahmen zu identifizieren.

Die Ergebnisse können als jährliche Einzelergebnisse oder als Summenlinie für jeden Indikator dargestellt werden. Eine Entscheidungsunterstützung erfolgt durch den Vergleich von Jahresergebnissen oder durch einen Bezug auf einen vorgegebenen Zielwert. Auf diese Weise können Optimierungen angestoßen werden, z. B. indem die Maßnahmendurchführung von verschiedenen Dienstleistern miteinander verglichen wird oder die eingesetzten Geräte, Anfahrtswege und Prozesse auf ihren Ergebnisbeitrag geprüft und angepasst werden.

Bezugnehmend auf Tabelle 4 sind im Folgenden die für die Bearbeitung des Anwendungsfalles 1 berücksichtigten Indikatoren zusammengefasst:

- Ökologische Qualität: Risiken für die lokale Umwelt:
 - o Fläche des ökologisch gestörten Lebensraums durch Lärmbeeinträchtigung der Fauna (Indikator 1.2)
- Ökologische Qualität: Externe Umwelteffekte:
 - o Verkehrsbedingte Emissionen (Indikator 1.4)
- Ökologische Qualität: Ökobilanz
 - o GWP (Indikator 1.5.1)
 - o EP (Indikator 1.5.2)
 - o ODP (Indikator 1.5.3)
 - o AP (Indikator 1.5.4)
 - o POCP (Indikator 1.5.5)
 - o KEA (Indikator 1.5.6)
- Ökonomische Qualität:
 - o Bauwerksbezogene Lebenszykluskosten (Indikator 2.1)
 - o Externe Kosten (monetarisierete externe Effekte) (Indikator 2.2)

- Sozio-kulturelle u. funktionale Qualität: Schutzgut Mensch
 - o Lärmbeeinträchtigung von Menschen (Indikator 3.1.1)

AWF 2 Instandhaltung/-setzung

Die Ergebnisse des Vergleichs zweier Betongüten hinsichtlich der Nachhaltigkeit für die Lebensdauerverlängerung eines Brückenbauwerks spielen eine zentrale Rolle im Entscheidungsprozess. Um diese Ergebnisse effektiv in die Entscheidungsfindung zu integrieren, werden die ökologischen, ökonomischen und sozio-kulturellen Aspekte gleichermaßen berücksichtigt.

Der kumulierte Energieverbrauch (CED) der beiden Betongüten wird analysiert, um festzustellen, welche Betongüte über den gesamten Lebenszyklus der Brücke weniger Energie benötigt. Hierzu werden nicht nur die Herstellung, sondern auch Transport, Bauprozess und potenzielles Recycling bewertet. Die Betongüte mit dem geringeren Ressourcenverbrauch könnte in der Bewertung favorisiert werden, da sie eine geringere Umweltbelastung und eine bessere Energieeffizienz bietet. Dies kann ein ausschlaggebendes Kriterium sein, wenn der Fokus auf einer ökologisch nachhaltigen Lösung liegt.

Das Global Warming Potential (GWP) gibt Auskunft über die CO₂-Emissionen, die bei der Herstellung und Verarbeitung des Betons entstehen. Ein direkter Vergleich der Emissionen beider Betongüten gibt Aufschluss darüber, welche die geringeren Treibhausgasemissionen verursacht. Die Betonmischung mit dem geringeren GWP könnte im Entscheidungsprozess bevorzugt werden, insbesondere wenn ein klimafreundliches Bauen im Vordergrund steht. Diese Ergebnisse könnten auch dazu verwendet werden, Fördermittel oder Zertifizierungen für nachhaltiges Bauen zu sichern.

Die Kosten der Baumaßnahmen sind ein wesentlicher Entscheidungsfaktor. Die Ergebnisse der Kostenanalyse geben Aufschluss darüber, welche Betongüte wirtschaftlicher ist, einschließlich der Beschaffungskosten, Verarbeitungskosten und Instandhaltungskosten über die Lebensdauer. Im Entscheidungsprozess kann die Betongüte bevorzugt werden, die eine niedrigere Kostenschätzung aufweist, sofern sie nicht zu signifikanten Nachteilen in anderen Nachhaltigkeitsbereichen führt. Gegebenenfalls können Kosteneinsparungen in einer Betongüte mit höheren ökologischen oder sozio-kulturellen Belastungen durch höhere Nachhaltigkeit in anderen Bereichen kompensiert werden.

Die Ergebnisse bezüglich der Verfügbarkeit bewerten, wie stark der Verkehrsfluss durch die Instandsetzungsmaßnahmen beeinträchtigt wird. Wenn eine Betongüte eine kürzere Bauzeit oder weniger nachträgliche Instandhaltungsmaßnahmen benötigt, kann dies positive Auswirkungen auf die Verkehrsverfügbarkeit haben. Eine Betongüte, die eine geringere Bauzeit ermöglicht und damit die Verfügbarkeit der Brücke für die Nutzer erhöht, könnte bevorzugt werden. In Fällen, in denen die Minimierung von Verkehrsunterbrechungen entscheidend ist (z. B. bei einer hoch belasteten Brücke), kann dies der wichtigste Entscheidungsfaktor sein.

Die Ergebnisse zur Beurteilung der Arbeitssicherheit geben Aufschluss über das Unfallrisiko während der Bauphase. Eine Betongüte, die sicherer zu verarbeiten ist und geringere Unfallraten verursacht, könnte langfristig zu weniger Ausfallzeiten und geringeren Versicherungskosten führen. Eine Betonmischung mit einem geringeren Unfallrisiko könnte bevorzugt werden, um die Sicherheit der Arbeitenden zu erhöhen, wobei diese stets oberhalb der gesetzlich vorgegebenen Mindeststandards liegen muss.

AwF 2&3 Instandhaltung/-setzung & Lebensdauerverlängerung:

Periodische Instandsetzung

Der Anwendungsfall 2 beschäftigt sich mit der Optimierung von Instandhaltungsmaßnahmen im Bereich der Nachhaltigkeit. In Österreich wird von der RVS ein Alterungsmodell festgelegt, das eine standardisierte Erhaltungsplanung in vier Erhaltungszeitpunkten während der Betriebsphase beschreibt (nach 20, 40, 60 und 80 Jahren). Die Bauteile werden je nach Lebensdauer instandgehalten, instandgesetzt bzw. erneuert. Diese Intervention wird in Prozent angegeben, wobei eine Erneuerung 100 % entspricht. Die Fahrbahnübergangskonstruktion ist das einzige Bauteil, das zu jeder Betriebsphase komplett ausgetauscht werden muss. Für die Optimierung der notwendigen Instandhaltungsmaßnahme wurden zwei Szenarien entwickelt, um die Bauausführung in Bezug auf die Nachhaltigkeit zu verbessern. Während der Wartungsarbeiten muss die Straße gesperrt werden. Bei **Variante 1** ist eine komplette Straßensperre über die gesamte Dauer der Bauausführung geplant. Dafür soll es für den Straßenverkehr eine Umleitung geben. Als Alternative (**Variante 2**) wären Nacharbeiten möglich, um so tagsüber einen ungehinderten Straßenverkehr zu erlauben, während nachts der Austausch stattfindet. Um die Nachhaltigkeit der Varianten zu bestimmen, werden **ökologische, ökonomische und soziokulturelle Qualitäten** gleichermaßen berücksichtigt und verglichen, um zu einer Entscheidungsfindung zu kommen.

Als ökologischer Indikator wurden die **CO₂-Emissionen** gewählt, um die Mehremissionen infolge von baubedingter Verkehrsbeeinträchtigung zu berücksichtigen. Dieser Indikator wird als kg CO₂-Äquivalente pro durchschnittliche tägliche Verkehrsstärke (DTV) angegeben. Als Grundlage für die Berechnung werden die Bewertungskriterien der BAST verwendet. Als Parameter fließen unter anderem die Zeitverzögerung aller betroffenen Fahrzeuge infolge der Instandsetzungsmaßnahme im Jahr, die CO₂-Emissionen pro Staustunde und Kfz infolge des Kraftstoffmehrverbrauchs und die Verkehrsdichte mit ein.

Als Indikator für die ökonomische Qualität wurden die anfallenden **externen Jahreskosten infolge einer Umleitung des Verkehrs** von der betrachteten Fahrstrecke gewählt. Dieser Indikator wird in Euro pro DTV angegeben und kann erst ab einer Umleitungsstrecke von 5 km in Betracht gezogen werden. In die Kalkulation fließen die Länge der Umleitungsstrecke, die Dauer der Sperrung, die prognostizierte durchschnittliche tägliche Verkehrsmenge auf der gesperrten Strecke und ein Kostenfaktor. Der letzte Parameter wird €/km*Kfz. Angegeben, um so einen monetarisierten Indikator zu erreichen.

Im Bereich der sozio-kulturellen Qualität wurden zwei Indikatoren ausgewählt. Einmal der **Zeitverlust**, der durch die Wartungsarbeiten und die dadurch entstehende Geschwindigkeitsreduzierung zurückzuführen ist. Dieser Indikator wird in Stunden angegeben. Als zweiten soziokulturellen Indikator wurde **die Lärmbelästigung** auf die Bevölkerung gewählt, da ein erhöhter Lärmpegel durch die Bauarbeiten zu berücksichtigen ist. Parameter, die für die Berechnung beachtet werden, sind die Dauer der Wartungsarbeiten, der Lärmpegel der Gerätschaften und Maschinen sowie die Anzahl der davon betroffenen Personen.

Bezugnehmend auf Tabelle 4 sind im Folgenden die für die Bearbeitung des Anwendungsfalles 2 berücksichtigten Indikatoren zusammengefasst:

- Ökologische Qualität: Kreislaufwirtschaft:
 - o Materialität des Bauwerks (Indikator 1.1.1)
- Ökologische Qualität: Ökobilanz:
 - o Globales Erwärmungspotential (GWP) (Indikator 1.5.1)
 - o Kumulierter Energiebedarf (Indikator 1.5.6)
- Ökonomische Qualität: Bauwerksbezogene Lebenszykluskosten:
 - o Materialkosten, prozessbezogene Kosten (Planungs-, Baukosten etc.) (Indikator 2.1.1)
- Soziokulturelle und funktionale Qualität:

- Lärmbelästigung v. Menschen: Lärmpegel/ Anzahl vom Lärm betroffene Personen (Indikator 3.1.1)
- Soziokulturelle und funktionale Qualität: Schutzgut Mensch
 - Arbeitssicherheit (Indikator 3.1.3)
- Soziokulturelle und funktionale Qualität: Verfügbarkeit
 - Reduktion der zeitbezogenen Kapazität (Indikator 3.2)

AwF 3 Lebensdauerverlängerung: Verstärkung kritischer Zonen

Im Anwendungsfall 3 soll die verbleibende Lebensdauer bewertet und durch Maßnahmen wie Verstärkungen oder zusätzliche Monitoring-Systeme eine Verlängerung der Nutzungsdauer erzielt werden. Die Entscheidungsfindung umfasst somit im Allgemeinen zwei Optionen: (a) eine Verstärkung des Bauwerks oder (b) die Einführung eines Monitoring-Systems, um den Zustand des Bauwerks zu überwachen.

In der vorliegenden Bearbeitung des Anwendungsfalles werden zwei unterschiedliche Varianten von Verstärkungsmaßnahmen an einer integralen Brückenstruktur hinsichtlich ihrer Nachhaltigkeit miteinander verglichen. Als Maßnahme wird die Querkraftverstärkung untersucht, wodurch eine Lebensdauerverlängerung des Tragwerkes erreicht werden soll.

Bei **Variante 1** erfolgt die nachträgliche Querkraftverstärkung der Spannbetonbauteile mit Hilfe von Verbundankerschrauben. Das System besteht aus einer jeweils produktspezifischen Betonschraube, Keilsicherungsscheibe, Druckverteilungsscheibe und Injektionsmörtel sowie Mutter und Hutmutter. Die Montage erfolgt durch das Eindrehen der Betonschrauben in ein hergestelltes Bohrloch, welches zuvor mit einem Injektionsmörtel gefüllt wurde [109]. Bei **Variante 2** erfolgt die Querkraftverstärkung durch kohlenstoffaserverstärktes Gewebe. Das Gewebe wird auf die vorbereitete Betonoberfläche in Schichten mit Hilfe eines Klebemittels aufgeklebt. Bei der Wahl der Verstärkungsvarianten wurde die Verfügbarkeit der Brückenstruktur für den Verkehr berücksichtigt. Die Vorteile der gewählten Varianten ergeben sich durch die Aufrechterhaltung des Betriebs während der Bauausführung. Für die Analyse der Varianten werden Input-Daten zu den beiden Varianten bezogen auf Bauwerk, Aktivität und Arbeitszone festgelegt. Diese Input-Daten dienen als Grundlage für die Untersuchung der Varianten auf ihre Nachhaltigkeit hin.

Hierfür wird ein indikatorgestütztes Verfahren herangezogen, das darauf abzielt, die Nachhaltigkeit beider Varianten zu vergleichen. Dabei werden Indikatoren aus den Bereichen

"ökologische Qualität", "ökonomische Qualität" und "sozio-kulturelle Qualität" berücksichtigt, um die Auswirkungen der Verstärkungsmaßnahmen ganzheitlich zu erfassen.

Im Bereich der **ökologischen Qualitäten** wird als Indikator das **Global Warming Potential (GWP)** gewählt, wodurch das Treibhauspotenzial eines Materials oder Bauteils quantifizierbar wird. Die Berücksichtigung der GWP-Werte in der Nachhaltigkeitsanalyse ermöglicht eine Aussage von potenziellen Auswirkungen auf die Erderwärmung, die durch den Einsatz bestimmter Materialien über ihren gesamten Lebenszyklus hinweg verursacht werden. Durch die Untersuchung des Indikators soll der Beitrag der zwei Varianten zum Klimawandel verglichen werden, um die Maßnahme mit den geringeren Auswirkungen zu identifizieren. Ziel ist es, die ökologische Belastung zu minimieren und somit zum Erreichen von Klimaschutzzielen beizutragen. Die produktspezifischen GWP-Werte können in der Regel aus den sogenannten Umweltproduktdeklarationen (EPD) entnommen werden. Für die untersuchten Verstärkungsmaßnahmen sind derzeit jedoch noch keine spezifischen EPDs zu den verwendeten Produkten vorhanden. Dies stellt eine Herausforderung dar, da die exakte Ermittlung der GWP-Werte ohne diese Daten erschwert wird. Für die Bearbeitung des Anwendungsfalles werden Werte zu den verwendeten Materialien der zwei Systeme herangezogen und mit den errechneten Volumen bzw. Flächen in Verbindung gebracht, um zumindest eine grobe Schätzung der GWP-Werte vorzunehmen. Es ist zu berücksichtigen, dass die Genauigkeit der Analyse dadurch allerdings eingeschränkt ist. Im Entscheidungsprozess kann unter Berücksichtigung der ökonomischen und sozio-kulturellen Qualitäten die Variante mit den geringeren Emissionen favorisiert werden, da sie zu einer geringeren Umweltbelastung beiträgt.

Im Bereich der **ökonomischen Qualität** werden **bauwerksbezogene Lebenszykluskosten** berücksichtigt. Der Indikator umfasst die Kosten für die Materialherstellung, den Transport, den Einbau sowie die Erhaltungskosten der beiden Varianten. Da Kosten in der Realisierung von Bauprojekten eine zentrale Rolle spielen, sind sie auch für die Nachhaltigkeitsanalyse von Bedeutung. Auf diese Weise kann eine wirtschaftlich optimierte Lösung identifiziert werden, die im Einklang mit ökologischen und sozio-kulturellen Indikatoren steht. Für die Analyse des vorliegenden Anwendungsfalles wurden neben den kurzfristigen Investitionskosten für die Bauausführung, auch die langfristigen Erhaltungskosten nach RVS 13.05.11 [110] berücksichtigt, um sicherzustellen, dass die gewählte Variante über den gesamten Lebenszyklus hinweg wirtschaftlich vorteilhaft ist. Im Entscheidungsprozess kann die kostengünstigere Variante favorisiert werden, wodurch eine Reduktion der Gesamtkosten

erzielt wird, ohne die strukturelle Qualität negativ zu beeinflussen. Neben den Kosten müssen jedoch auch die ökologischen und sozio-kulturellen Aspekte berücksichtigt werden, um eine ganzheitliche Entscheidung zu gewährleisten. Darüber hinaus können die **Planungskosten** als Indikator für die Lebenszykluskosten herangezogen werden. Die Planungskosten setzen sich aus den Lohnkosten sowie den Zuschlägen für Sachkosten zusammen. Durch den Vergleich des finanziellen Aufwands für die Planung beider Varianten kann die kosteneffizientere Option identifiziert werden. Darüber hinaus kann im Entscheidungsprozess und durch das Aufsummieren der ökologischen Qualitäten (Baukosten + Planungskosten) die Variante mit den geringeren Gesamtkosten bevorzugt werden, vorausgesetzt, dass keine nachteiligen Auswirkungen auf die ökologischen oder sozio-kulturellen Qualitäten festgestellt werden. Somit kann eine ganzheitliche, kostenbewusste Entscheidung getroffen werden, die dennoch den Anforderungen an Nachhaltigkeit und soziale Verträglichkeit gerecht wird.

Für die Berücksichtigung von **sozio-kulturellen Qualitäten** in der Nachhaltigkeitsanalyse wird die **Lärmbelästigung** untersucht. Dieser Indikator ermöglicht es, die Lärmbelastung, die während der baulichen Umsetzung der Maßnahmen entsteht, zu erfassen und deren Auswirkungen auf die betroffene Bevölkerung zu bewerten. Die Berücksichtigung von Lärmbelästigung in einer Nachhaltigkeitsanalyse ist von besonderer Bedeutung, da Lärm die Lebensqualität der Anwohner und Menschen in der unmittelbaren Umgebung erheblich beeinflussen kann. Ausgedrückt wird die Lärmbeeinträchtigung durch zwei Parameter: den Lärmpegel und die Anzahl der betroffenen Personen. Der Einbau der Verstärkungen hat keine Auswirkungen für den Verkehr zur Folge, da die beiden Varianten während des fortlaufenden Brückenbetriebs umgesetzt werden können. Im vorliegenden Anwendungsfall werden die Geräte, die für die Durchführung der Verstärkungen notwendig sind, als Lärmquelle betrachtet. Hierzu gibt es keine Werte aus Datenbanken, weshalb diese aus Produktdatenblättern entnommen oder bei Herstellern angefragt werden müssen. Weiters muss die Anzahl der betroffenen Bevölkerung vom Anwender definiert werden. Im Vergleich der beiden Varianten wird somit die Intensität des erzeugten Lärms untersucht, um die Maßnahme mit der geringsten Beeinträchtigung der Anwohner zu identifizieren. Im Entscheidungsprozess kann die Variante mit den geringeren Auswirkungen unter Berücksichtigung der ökologischen sowie ökonomischen Indikatoren, favorisiert werden, da sie sich bei der Umsetzung der Maßnahme die Lärmbelästigung für die betroffenen Personen minimiert.

Bezugnehmend auf Tabelle 4 sind im Folgenden, die für die Bearbeitung des Anwendungsfalles 3 berücksichtigten Indikatoren zusammengefasst:

- Ökologische Qualität: Ökobilanz:
 - Globales Erwärmungspotential (GWP) (Indikator 1.5.1)
- Ökonomische Qualität: Bauwerksbezogene Lebenszykluskosten:
 - Materialkosten, prozessbezogene Kosten (Planungs-, Baukosten etc.) (Indikator 2.1.1)
- Soziokulturelle und funktionale Qualität:
 - Lärmbelästigung v. Menschen: Lärmpegel/ Anzahl vom Lärm betroffene Personen (Indikator 3.1.1)

AwF 4 Rückbau

Die Dokumentation der in Brückenbauwerken verbauten Materialien, der Verbindungsarten, der sich daraus ergebenden Demontagemöglichkeiten, der Wiederverwendungs- und Recyclingpotentiale sowie der enthaltenen Schad- und Risikostoffe kann als ein Bauwerkskataster verstanden werden, das als Basis für alle bauwerksbezogenen Instandsetzungs- und Modernisierungsmaßnahmen genutzt werden kann. Darüber hinaus ist es Grundlage für die Integration in die Kreislaufwirtschaft am Ende des Bauwerkslebenszyklus.

Der AwF 4 ist damit auch Grundlage für selektive Rückbaumaßnahmen, die im Rahmen von Instandsetzungsmaßnahmen oder Lebenszyklusverlängerungsmaßnahmen (AwF 2 und 3) durchgeführt werden. Der AwF 4 kann damit als Grundlage für andere AwF des DZ eingeordnet werden. Um auf aktuelle Daten zurückgreifen zu können, ist es erforderlich, dass im Fall von Veränderungen am Bauwerk diese dokumentiert und in die DZ eingepflegt werden.

Derzeit wird in der Bauwirtschaft intensiv über die Einführung von Materialpässen und die Nutzung von Digital Building Logbooks diskutiert. Unabhängig von der spezifischen Namensgebung für diese Instrumente haben alle Ansätze gemeinsam, dass Informationen über die Bauwerkszusammensetzung bereitgestellt werden, die als Grundlage für eine Reduzierung von Bauabfällen und das Schließen von stofflichen Kreisläufen genutzt werden sollen. Die Integration des AwF 4 in die DZ stellt eine Implementierung der beschriebenen Ansätze dar.

Gängige Indikatoren im Rahmen einer bauteilbasierten Bauwerksdokumentation sind der wiederverwendbare Massenanteil, der Recyclinganteil, der Abfallanteil inkl. enthaltener Schad- und Risikostoffe sowie der Materialwert. Die Indikatorergebnisse können in Listenform dargestellt oder über Einfärbungen von Bauelementen eines verlinkten Bauwerksmodells visualisiert werden. Für die Ausführung von selektiven Rückbaumaßnahmen und dem

Rückbau am Lebenszyklusende sind diese Werte eine Grundlage für die Durchführung der Maßnahmen sowie der anschließenden Weiterbehandlung der Bauteile bzw. Materialien. Auf diese Weise können Rückbauprozesse geplant und eine kreislaufgerechte Materialverwendung erfolgen.

Bezugnehmend auf Tabelle 4 sind im Folgenden, die für die Bearbeitung des Anwendungsfalles 4 berücksichtigten Indikatoren zusammengefasst:

- Ökologische Qualität: Kreislaufwirtschaft / Ressourcen:
 - Materialität des Bauwerks (Indikator 1.1.1)
 - Monetärer Materialwert (Indikator 1.1.2)
 - Schad- und Risikostoffe (Indikator 1.1.3)
 - Demontagefähigkeit (Indikator 1.1.4)
 - Materialverwertung – potenzielle Kreislauffähigkeit (Indikator 1.1.5)
- Ökologische Qualität: Flächeninanspruchnahme:
 - Flächeninanspruchnahme Bauwerk und Bauprozess (Indikator 1.2)

4.3 Integration in die digitalen Zwillinge

AwF 1: Betriebsaufgaben

Wie in Abschnitt 4.2 beschrieben, dienen alle Inputs der Prozesse für die Betriebsaufgaben als Basis für die Berechnung der Kosten in der Nutzungsphase sowie der ökobilanziellen Auswirkungen. Hierfür werden alle durch die zu untersuchenden Prozesse entstehenden Energie- und Stoffflüsse verwendet sowie für die Kostenberechnung die Arbeitszeiten herangezogen.

In dem Demonstrator des DZ wird beispielhaft nur die Betriebsaufgabe des Freischneidens der Widerlager (Grünschnitt) implementiert. Für alle weiteren genannten Betriebsaufgaben kann eine analoge Umsetzung erfolgen. Die Berechnung der ökologischen und ökonomischen Auswirkungen erfolgt innerhalb des DZ, es findet keine Ergebnisbereitstellung durch einen externen Service statt. Dies macht es erforderlich, alle Inputdaten für die prozessbezogenen Energie- und Stoffflüsse durch den Anwender bereitzustellen. Dafür kann eine Eingabe über eine Oberfläche oder der Datenimport über eine Schnittstelle erfolgen. Für den vorliegenden Anwendungsfall wird der Weg über einen dateibasierten Datenimport realisiert. Hierfür muss eine Datenstruktur im Vorfeld definiert werden.

Die Berechnung der systemgrenzenabhängigen Lebenszykluskosten sowie der Ökobilanz findet auf Grundlage der in Abschnitt 4.1 beschriebenen Berechnungsvorschriften statt. Die zu verwendenden Kostenansätze sowie die Charakterisierungsfaktoren für die Ökobilanz sind im Demonstrator fest im System hinterlegt, bei Implementierung einer entsprechenden Bearbeitungsmöglichkeit kann eine benutzergesteuerte Wertefestlegung umgesetzt werden.

AwF 2: Instandhaltung/-setzung

Der Prozess der Verstärkung einer Brücke zur Verlängerung ihrer Lebensdauer beinhaltet mindestens zwei aufeinanderfolgende Aktivitäten, die als Abriss/Entfernung der vorhandenen (beschädigten) Elementteile oder ganzer Elemente und Einbau neuer Materialien/Teile definiert werden können.

Diese Aktivitäten haben nicht die gleichen Auswirkungen auf die Phasen (A, B, C, D) des Lebenszyklus. Es wird angenommen, dass nur der kurze Zeitrahmen vor, während und nach der Ausführung betrachtet wird, so dass die Abbruchaktivität die Hauptauswirkungen auf die Phase C hat, während die Bautätigkeit die Hauptauswirkungen in der Phase A hat.

In einigen Fällen müssen die Arbeiten in Phasen durchgeführt werden, einschließlich der Sperrung einer oder mehrerer Fahrspuren. Diese Phasenarbeit bedeutet, dass es im Laufe der Zeit mehrere Arbeitsbereiche auf der Brücke geben kann, die unterschiedlich eingerichtet sind (Arbeitende/Maschinen und Geometrie). Diese Tatsache wirkt sich am stärksten auf die funktionalen und soziokulturellen Indikatoren der Verfügbarkeit und der Sicherheit der Arbeitenden aus. Die Auswirkungen auf die Verfügbarkeit können unterschiedlich sein, da es je nach Länge des Arbeitsbereichs zu einer unterschiedlichen Verringerung der Kapazität und Geschwindigkeit kommen kann. Auch die Auswirkungen auf die Sicherheit der Arbeitnehmer können unterschiedlich sein, da die Exposition gegenüber potenziellen Verkehrsunfällen nicht dieselbe ist, wenn sich die Baustelle in der Mitte der Brücke (Insel) oder an einem der Ränder befindet. Bei der Bewertung können jedoch die Werte der entsprechenden Indikatoren für diese verschiedenen Phasen addiert werden. Der Einfachheit halber wird davon ausgegangen, dass die Geschwindigkeits- und Kapazitätsverringerung für jede Phase gleich ist und dass die Baustellen die gleiche Geometrie (Länge, Breite) und die gleiche Anzahl von Maschinen und Arbeitenden pro Tätigkeit haben.

AwF 2&3: Instandhaltung/-setzung – Periodische Instandsetzung

Im Anwendungsfall über die Optimierung der Instandhaltungsmaßnahmen werden für die DZ interne und externe Daten bereitgestellt. Als Grundlage für den ökologisch gewählten Indikator der CO₂-Emissionen (Nr. 1.3) dient eine Formel aus einer externen Quelle (BAST). Die eingesetzten Variablen sind jedoch intern gewählt und abhängig vom Anwendungsfall. Für die Input-Daten des monetarisierten Indikators Umleitung (Nr. 2.2) dienen die externen Bewertungskriterien der BAST. Für die Bestimmung der Lärmbelästigung (soziokultureller Indikator Nr. 3.1.) werden Produktdatenblätter oder Herstellerangaben herangezogen. Andere Variablen sind wiederum abhängig von den im Anwendungsfall abhängigen Gegebenheiten. Für den Indikator Reisezeitverlust (Nr. 3.4) wird so vorgegangen wie für die ersten beiden Indikatoren. Dieser AwF wird u. a. auf die Seitenhafenbrücke angewendet, siehe Beschreibung der Demonstratoren Kapitel 7.

AwF 3 Lebensdauerverlängerung – Verstärkung kritischer Bauwerkszonen

Die Berechnung der Nachhaltigkeitsindikatoren basiert auf den in Abschnitt 3.1 dargestellten Berechnungsvorschriften. In Kapitel 4.2 werden die für den Anwendungsfall 3 zu berücksichtigenden Indikatoren auf die Verstärkungsmaßnahmen zur Lebensdauerverlängerung bezogen. Diese Berechnungen sollen innerhalb des DZ durchgeführt werden, ohne die Bereitstellung von Ergebnissen durch externe Dienste. Dies

erfordert, dass der Anwender alle erforderlichen Eingabedaten für die Berechnung der Indikatoren bereitstellt. Grundsätzlich kann die Eingabe entweder über eine Benutzeroberfläche oder durch den Import von Daten über eine Schnittstelle erfolgen. Die Bereitstellung der Eingabedaten muss dabei gemäß einer definierten Datenstruktur erfolgen, um eine korrekte Verarbeitung sicherzustellen.

Die Berechnung der Indikatoren für den vorliegenden Anwendungsfall 3, die den Gruppen der ökologischen, ökonomischen sowie soziokulturellen und funktionalen Qualitäten zugeordnet sind, erfolgt jeweils extern. Für den Indikator Nr. 1.5.1 der **ökologischen Qualität** werden zur Ermittlung des Globales Erwärmungspotentials (GWP) externe Quellen, insbesondere Werte aus Datenbanken wie Umweltproduktdeklarationen (EPDs), herangezogen. Zusätzlich werden Werte berücksichtigt, die sich aus der erforderlichen Anzahl der Verbundankerschrauben oder Gewebe-Fläche für die Umsetzung der Verstärkungsmaßnahmen ergeben. Diese Parameter müssen vom Anwender festgelegt werden und beruhen auf der Dimensionierung der Maßnahmen. Im Hinblick auf den Indikator Nr. 2.1.1 der **ökonomischen Qualität** werden die Lebenszykluskosten des Bauwerks extern nach den Richtlinien der RVS berechnet. Diese Kosten sind durch den Anwender zu bestimmen und bereitzustellen. Berücksichtigt werden die Lebenszykluskosten, die sich aufgrund der Umsetzung der Varianten ergeben. Für den Indikator Nr. 3.1 der **soziokulturellen und funktionalen Qualitäten** werden für die Lärmbelastung für den Menschen externe Werte aus Produktdatenblättern oder Herstellerangaben bezogen. Die Anzahl der betroffenen Personen ist vom Benutzer festzulegen. Dieser AwF wird u. a. auf die Seitenhafenbrücke angewendet, siehe Beschreibung der Demonstratoren Kapitel 7.

AWF 4: Rückbau

Für die Unterstützung von selektiven Rückbaumaßnahmen, die im Rahmen von AWF 2 und 3 erforderlich sind, und dem Rückbau am Lebenszyklusende sollen detaillierte Informationen über die verbauten Materialien sowie die Art der Fügeverfahren und Materialverbünde bereitgestellt werden. Durch den DZ findet damit eine detaillierte und transparente Beschreibung der verbauten Ressourcen sowie eine Bewertung der Nutzungsmöglichkeiten dieser in nachfolgenden Kreisläufen statt. Im Anwendungsfall werden für die Indikatorengruppe „Kreislaufwirtschaft“ alle aufgeführten Indikatoren (i. d. R. separat ausgewiesen für jedes Bauteil) in Listenform dargestellt. Wenn ein 3D-Modell hinterlegt ist, kann zusätzlich eine Einfärbung einzelner Bauteile zur visuellen Kommunikation der Indikatorenergebnisse erfolgen.

Alle erforderlichen Informationen werden durch externe Anwendungen bereitgestellt und in den DZ importiert. Der Datenimport erfolgt dateibasiert, wobei die Daten in Tabellenform oder über alphanumerische Informationen in einem BIM-Modell vorliegen können. Zukünftig sind beide Arten der Informationsbereitstellung denkbar: Wenn Modellierungsrichtlinien für BIM-Modelle die erforderlichen Merkmale eindeutig spezifizieren, eine vorgabengerechte Modellierung erfolgt und der Export in eine IFC-Datei anforderungsgerecht umgesetzt wird, können BIM-Modelle als Datenbasis verwendet werden. Veränderungen, die im Rahmen von Baumaßnahmen vorgenommen werden, müssen jedoch auch im BIM-Modell erfasst und aktualisiert werden. Alternativ kann die Informationsbereitstellung beispielsweise auf Grundlage eines maschinenlesbaren Ressourcenpasses erfolgen, was z. B. mit dem Urban Mining Index bereits möglich ist. Da allerdings noch keine offenen, standardisierten Schnittstellen für Ressourcenpässe existieren, wird in diesem Forschungsprojekt das verwendete Datenformat beschrieben und entsprechend implementiert.

4.4 Zusammenfassung

Basierend auf den Ausarbeitungen der vorherigen Kapitel sowie auf Erfahrungen der Projektpartner wurden die Grundsätze, Kriterien und Anhaltspunkte ausgewählt und zusammengestellt, die für die Integration der Nachhaltigkeit in die Modellbildung der DZ die Grundlage bilden. Die Ansätze wurden dokumentiert und nachvollziehbar bewertet. Es wird zwischen übergeordneten Grundsätzen (z. B. Sustainable Development Goals), nationalen Ansätzen, verfügbaren Datenbanken und existierenden Softwarelösungen unterschieden. In der Kategorisierung der NPIs und der Definition der Grenzwerte auf der betrieblichen Ebene und für den Rückbau wurden u.a. folgende Aspekte analysiert:

- a) Tiefe und Umfang der notwendigen Modellierung;
- b) Baustoffe und vorhandene Nachhaltigkeitsindikatoren;
- c) Charakterisierung des Zustandes von Bauteilen;
- d) Charakterisierung der Wiederverwendbarkeit von Materialien;
- e) zirkulärer Ressourcenansatz;
- f) Verfügbarkeit von recycelbaren Materialien;
- g) Charakterisierung von Nachhaltigkeitsindikatoren und auch Nachhaltigkeitsindikatoren für Ingenieurbauwerke als Einzel- und als Netzbetrachtung, die sich am Anfang, in der Mitte oder auch am Ende der Nutzungsdauer befinden.

Die Ergebnisse in diesem Arbeitspaket wurden verwendet, um ein Gesamtkonzept für Nachhaltigkeitsindikatoren, die im Rahmen der DZ Anwendung finden sollen, zu erstellen. Das Gesamtkonzept wurde auf die definierten Anforderungen und beschriebenen Anwendungsfälle abgestimmt und kann damit als Grundlage für die Konzeptionierung der DZ im nächsten Abschnitt verwendet werden. Eine wichtige und zu erfüllende Randbedingung ist die Fokussierung auf Aufgaben und Prozesse in der Betriebs- und Rückbauphase von Ingenieurbauwerken. Die in diesen Lebenszyklusphasen zur Verfügung stehenden bzw. zu erhebenden Daten bilden die Grundlage für alle Berechnungen und wurden zuvor beschrieben und bewertet. Dabei wurde auch auf die jeweils anwendbaren zeitlichen und räumlichen Systemgrenzen eingegangen. Die folgende Tabelle 5 zeigt zusammenfassend die je Anwendungsfall eingesetzten Indikatoren.

Tabelle 5: Zuordnung der betrachteten Indikatoren je Anwendungsfall

Qualität Nachhaltigkeit	Indikatorengruppe	Indikator	Einheit	D		A		CH
				AWF 1	AWF 4	AWF 2	AWF 3	AWF 2
Ökologische Qualität	Kreislaufwirtschaft / Ressourcen	Materialität des Bauwerks	Masse-%					
		Monetärer Materialwert	EUR					
		Schad- u. Risikostoffe	kg					
		Demontagefähigkeit	qualitativ					
		Materialverwertung – Potentiale Kreislauffähigkeit	Masse-%					
	Risiken für die lokale Umwelt	Fläche des ökologisch gestörten Lebensraums durch Lärmbeeinträchtigung der Fauna	m ²					
	Flächeninanspruchnahme	Flächeninanspruchnahme Bauwerk (dauerhaft) und Bauprozesse (vorübergehend)	gewichtete m ²					
	Externe Umwelteffekte	Verkehrsbedingte Emissionen infolge betrieblicher und baubedingter Verkehrsbeeinträchtigungen (CO ₂ , NO _x , PM _{2.5} , PM ₅ , PM ₁₀)	Masse					
	Ökobilanz	Globales Erwärmungspotential (GWP)	kg CO ₂ -Äquiv.					
		Eutrophierungspotential (EP)	kg PO ₄ ³⁻ -Äquiv.					
		Ozonschichtabbaupotential (ODP)	Kg R11-Äquiv.					
		Versauerungspotential (AP)	kg SO ₂ -Äquiv.					
		Ozonbildungspotential (POCP)	kg C ₂ H ₄ -Äquiv.					
		Kumulierter Energieaufwand (KEA)	MJ					
Ökonomische Qualität	Bauwerksbezogene Lebenszykluskosten	Materialkosten, prozessbezogene Kosten	EUR					
	Externe Kosten (monetarisierter externe Effekte)	Kosten aufgrund von Zeitverlusten, Umleitungen und erhöhten Fahrzeugbetriebskosten	EUR					
Sozio-kulturelle und funktionale Qualität	Schutzgut Mensch	Lärmbeeinträchtigung von Menschen	dB / pax					
		Arbeitssicherheit	pax / -					
	Verfügbarkeit	Reduktion der zeitbezogenen Kapazität	%					
Technische Qualität	Zuverlässigkeit	Zuverlässigkeitsindex	-					

5 Spezifikation der digitalen Zwillinge

Die Spezifikation der DZ erfordert die präzise Definition der zugrunde liegenden Datenstrukturen und -prozesse, um eine modulare und flexible Integration unterschiedlicher Informationsquellen zu ermöglichen. Zur Umsetzung modularer DZ bieten sich Informationscontainer wie der Information Container for Linked Document Delivery (ICDD) aus dem Bauwesen als geeignete Werkzeuge an [13, 111, 112]. Diese Container ermöglichen die Verbindung und Kombination unterschiedlicher Informationsquellen zu einer umfassenden digitalen Repräsentation durch die Nutzung standardisierter Schnittstellen und Techniken des Linked Data-Konzeptes, wie beispielsweise Ontologien. ICDD-Container integrieren heterogene Datenquellen, um kontextbezogene und vereinfachte Informationsbereitstellung zu ermöglichen, wobei relevante Daten entweder im Container gespeichert oder extern verlinkt werden können. Durch die Möglichkeit, Verbindungen und Beziehungen zwischen den Daten auszudrücken, bieten sie eine ideale Grundlage für DZ, die auf Basis von heterogenen Daten aufgesetzt werden. Die Struktur der ICDD-Container wird durch ISO 21597-1:2020 festgelegt und verwendet das ZIP64-Format [113]. ICDD-Container können jedoch dank der zu Grunde liegenden Semantic Web und Linked Data Technologien auch einfach als Web-Ressourcen implementiert und genutzt werden. Die Container bestehen aus einer Indexdatei und standardmäßig drei Ordnern (*Ontology Resources*, *Payload Documents*, *Payload Triples*), die unterschiedliche Daten und Ontologien zur Verknüpfung und Beschreibung der Inhalte enthalten.

Ein auf Linked Data basierender Ansatz bietet eine effektive Methode zur Integration heterogener Datenquellen, indem er eine ontologiegestützte Beschreibung verknüpfter Ressourcen nutzt, um die zugrunde liegenden Daten eindeutig zuzuordnen [114, 115]. Zentral ist hierbei das Resource Description Framework (RDF), das Informationen in Form von Tripeln (Subjekt-Prädikat-Objekt) graphenbasiert formalisiert und in sogenannten Triplestores speichert [116]. Über standardisierte Schnittstellen können diese Daten einheitlich abgerufen und verarbeitet werden. Ontologien spielen dabei eine entscheidende Rolle, indem sie als Schemata für RDF-basierte Datenquellen fungieren und die Prozesse in Anwendungsfällen modellieren und verknüpfen [117]. Uniform Resource Identifier (URI) gewährleisten die eindeutige Identifizierung und Verknüpfung von Daten aus verschiedenen Quellen. Zur Integration bestehender Datenbanken stehen diverse Werkzeuge zur Verfügung, die eine Konvertierung der Daten in das RDF-Format ermöglichen und somit einen einheitlichen Zugriff sowie die Verlinkung unterschiedlicher Datenquellen sicherstellen. Durch die formelle schematische Beschreibung der Daten mittels Ontologien wird ein einheitliches Verständnis

der Wissensdomänen, die durch die verschiedenen Datenquellen repräsentiert werden, gefördert. Zudem unterstützen Ontologien semantische Suchanfragen und Abfragen in Verbindung mit der SPARQL Protocol and RDF Query Language (SPARQL) [118]. Dies erlaubt eine systematische Definition und Anbindung semantischer Informationen aus weiteren Anwendungsfällen an bestehende Datensätze. Durch den Einsatz von Konvertern und Wrappern können vorhandene Datensätze automatisiert in das RDF-Format überführt und modular in einen DZ integriert werden, indem die Daten über URI-Bezeichner miteinander verknüpft werden.

Eine prozessuale Modularität kann dadurch erreicht werden, dass der DZ in anwendungsfallbezogene, eigenständige Module zerlegt wird, die jeweils als eigenständige DZ fungieren können, ohne die Funktionalität des Gesamtwillings oder weiterer Module zu beeinträchtigen. Hierbei ist die Fähigkeit zur Verschachtelung von Informationscontainern von zentraler Bedeutung, um die Modularität zu gewährleisten. Zur Realisierung des ICDD-Standards [113] muss für jeden spezifischen Anwendungsfall, wie beispielsweise der kontinuierlichen oder intervallbezogenen Zustandserfassung, ein separater ICDD-Container erstellt werden. Die Integration dieser einzelnen Module in Form von Informationscontainern führt schließlich zur Bildung des vollständigen DZ. Bevor eine Implementierung auf Basis dieser Ansätze spezifiziert werden kann, werden in diesem Kapitel zunächst die Austauschprozesse der Informationen und die Informationsanforderungen generell festgehalten, um dann eine Architektur und funktionale Anforderungen herausarbeiten zu können.

5.1 Definition der Informationsaustauschprozesse

Um die Informationsaustauschprozesse in den Anwendungsfällen zu definieren, wird die Methode des Information Delivery Manual (IDM) gemäß ISO-EN 29481 verwendet. IDM umfasst die Definition von Anwendungsfällen aus fachlicher Perspektive, den Informationsaustausch als Prozess sowie die zugehörigen Informationsanforderungen aus fachlichen und IT-technischen Aspekten. Diese Methode ermöglicht eine klare Definition der beteiligten Akteure und Prozesse, sodass die Nachhaltigkeitsbewertung auf einer soliden und strukturierten Datengrundlage basieren kann.

Der Informationsaustausch basiert auf einem generischen Prozessablauf (siehe Abbildung 5-1), der von der Auswahl des Anwendungsfalls bis zur Berechnung der Nachhaltigkeitsindikatoren und der anschließenden Visualisierung der Ergebnisse reicht. Dabei wird deutlich, dass die Auswahl und Verknüpfung der Topologieelemente des Bauwerks

im digitalen Modell eine wesentliche Rolle spielt, um die relevanten Aktivitäten und Maßnahmen korrekt zuzuordnen. Zudem werden die Indikatoren definiert und basierend auf den bauwerksbezogenen Eingabedaten berechnet. Die Visualisierung der berechneten Indikatorergebnisse ermöglicht es, verschiedene Varianten von Maßnahmen zu vergleichen oder deren Auswirkungen über Zeitverläufe zu beobachten, was für die Nachhaltigkeitsbewertung von entscheidender Bedeutung ist.

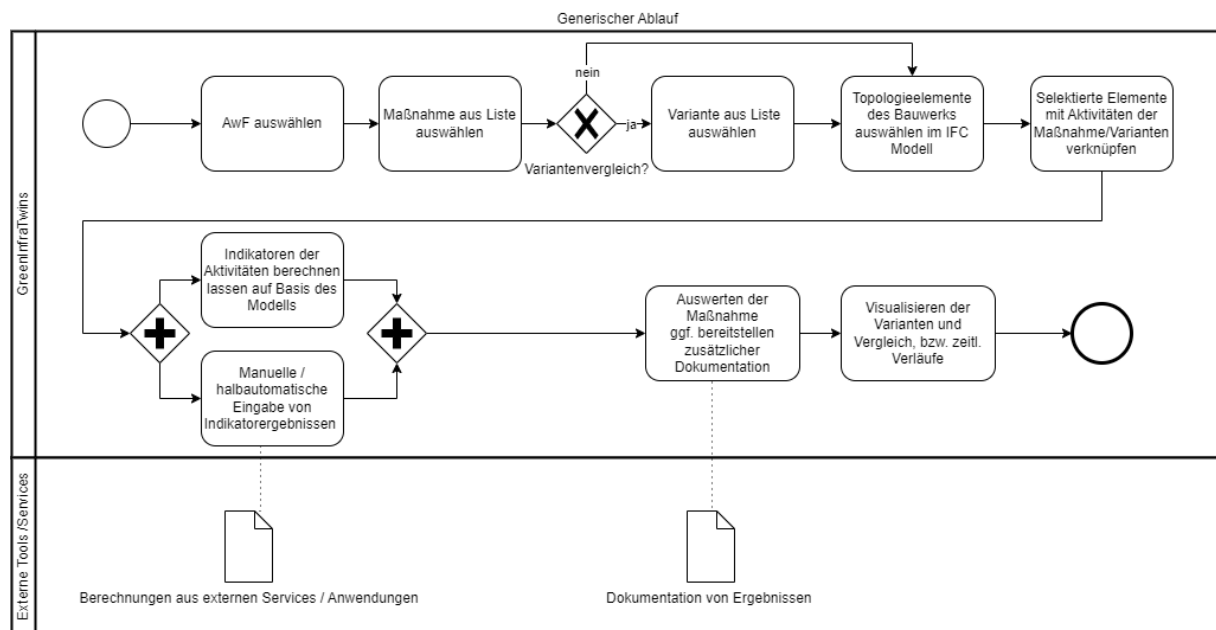


Abbildung 5-1. Prozessablauf der Anwendungsfälle in dem zu entwickelnden Prototyp

Der gesamte Prozess ist darauf ausgelegt, die erforderlichen Eingangsdaten und Berechnungsvorschriften in strukturierter Form bereitzustellen, sodass eine effektive Berechnung mit verschiedenen Tools durch die Akteure möglich ist. Auf Prozessebene wird sichergestellt, dass alle relevanten Informationen über den DZ zur Verfügung gestellt werden, um eine umfassende Nachhaltigkeitsbewertung zu ermöglichen.

5.1.1 Integration fachlicher Expertise

Die Durchführung von Nachhaltigkeitsanalysen erfordert eine präzise fachliche Festlegung der Bewertungsmethoden. Diese Analysen sind komplex, da sie ökonomische, ökologische und sozio-kulturelle Dimensionen berücksichtigen. Die Berechnung der Indikatoren ist oft anspruchsvoll, da sie auf einer Vielzahl von Eingabedaten basiert, die aus unterschiedlichen Quellen wie Bauwerksmodellen und technischen Berichten stammen. Zudem sind die Datenquellen oder Berechnungstools häufig über verschiedene Plattformen und Datenbanken verteilt, wie beispielsweise Ökobaudat in Deutschland. Um die Verfügbarkeit und Qualität

dieser Daten sicherzustellen, muss die Integration der Daten in den DZ als Teilaufgabe des Informationsaustauschs von fachlichen Experten festgelegt werden.

Um die Komplexität der Daten zu bewältigen, ist es unerlässlich, nicht nur die Daten manuell zu erfassen, sondern auch digitale Lösungen zu nutzen, um den Erfassungsprozess zu optimieren. Dabei wird die Definition der digitalen Informationsanforderungen gemäß dem in Abschnitt 5.2 beschriebenen Informationsaustauschprozess festgelegt.

5.1.2 Realisierung mit dem digitalen Zwilling

Die digitale Erfassung der relevanten Informationen bildet die Datengrundlage der DZ und ermöglicht eine umfassende Betrachtung der bauwerksbezogenen Nachhaltigkeitsanalyse. Zur effizienten Verwaltung dieser Daten werden ICDD-Container eingesetzt, die verschiedene Datensätze bündeln und miteinander verknüpfen, um den Anforderungen der digitalen Modellierung gerecht zu werden. Externe Datensätze, die zur Berechnung der Nachhaltigkeitsindikatoren verwendet werden, sowie die durch externe Berechnungstools generierten Ergebnisse, werden über den Datenservice des DZ importiert und bei Bedarf aktualisiert. Der Informationsaustauschprozess unterstützt die Identifizierung der erforderlichen digitalen Services und ermöglicht den flexiblen und bedarfsgerechten Einsatz von Berechnungswerkzeugen. Durch die Integration des digitalen Bauwerksmodells dient der DZ als zentrale Plattform für die Visualisierung und Analyse der Nachhaltigkeit, indem verschiedene Varianten und Szenarien miteinander verglichen werden können. Zur Umsetzung der DZ wird eine Systemarchitektur in Abschnitt 5.3 beschrieben.

5.2 Ausarbeitung der Informationsbedarfe

Das Level of Information Need (LOIN) gemäß ISO 7817-1:2024 [119], gleich DIN EN 17412-1:2020, bietet ein systematisches Konzept zur Festlegung des erforderlichen Umfangs und der Detaillierung von Informationen für den Informationsaustausch. Diese Norm stellt sicher, dass nur die notwendigen Informationen in der passenden Detailtiefe für spezifische Anwendungsfälle nach den BIM-Prinzipien bereitgestellt werden. Das LOIN-Konzept verhindert die Bereitstellung überflüssiger Daten und optimiert die Effizienz des Informationsaustauschs zwischen den beteiligten Akteuren. Im Rahmen dieses Projekts wird das LOIN-Konzept methodisch angewendet, um die DZ für die Nachhaltigkeitsbewertung zu realisieren. Es hilft dabei, das digitale Bauwerksmodell, die relevanten Nachhaltigkeitsdaten und deren Verknüpfungen mit anderen Informationsquellen in der angemessenen Informationsbedarfstiefe zu definieren und bereitzustellen.

Im Zentrum des LOIN-Konzepts steht das **Objekt**, das je nach Informationsaustausch sowohl ein gesamtes Bauwerk als auch einzelne Bauwerksteile umfassen kann. Ausgehend vom festgelegten Kontext eines Informationsaustauschs (Zweck, Meilenstein, Akteur) umfasst jedes Objekt drei wesentliche Anforderungskomponenten, die bei der Definition der Informationsanforderungen berücksichtigt werden müssen:

Geometrische Informationen: Sie beschreiben die räumlichen und strukturellen Eigenschaften der Bauwerkselemente in der erforderlichen Detaillierung.

Alphanumerische Informationen: Diese beziehen sich auf numerische und textliche Eigenschaften der Elemente, wie Materialeigenschaften, Zustandsbewertungen oder technische Kennwerte.

Dokumentation: Dazu zählen ergänzende Dokumente wie Pläne, Berichte oder Handbücher, die weiterführende Spezifikationen eines Objekts bereitstellen.

Umsetzung des LOIN-Konzepts zur Informationsanforderung der Nachhaltigkeitsanalyse

Für die systematische Anwendung des LOIN-Konzepts wird eine grundlegende Zuordnung zwischen den LOIN-basierten Informationsanforderungen und den relevanten Informationen für die Nachhaltigkeitsanalyse wie folgt festgelegt:

Kontextinformationen: Der Zweck und der Meilenstein können als Bereitstellung einer Nachhaltigkeitsanalyse für einen spezifischen Anwendungsfall festgelegt werden.

Objekt: Die Maßnahme, die einen Anwendungsfall darstellt, sowie weitere Objekttypen, die Bauwerke und Bauwerkselemente innerhalb der Maßnahmen repräsentieren. Die vorhandenen Daten zu den Bauwerken, die zu berechnenden Indikatoren und die entsprechenden Berechnungsmethoden werden in die drei Anforderungskomponenten unterteilt.

Geometrische Informationen: Das digitale Bauwerksmodell dient als geometrische Repräsentation der Maßnahme. Da der Schwerpunkt dieses Forschungsprojekts auf die Betriebsphase der Bauwerke liegt, wird die geometrische Modellierung als vorausgesetzte Grundlage aus der Planungs- und Bauphase verstanden. Entsprechend stehen die Formulierung und Modellierung der geometrischen Informationen nicht im Fokus, sondern die Nutzung der vorhandenen geometrischen Repräsentation eines Bauwerks.

Alphanumerische Informationen: Diese umfassen primär numerische und textuelle Merkmale, die die Maßnahmen oder das Bauwerk direkt beschreiben. Für die Nachhaltigkeitsanalyse sollten darüber hinaus auch weiterführende Informationen sowie zusätzliche Beziehungen enthalten sein. Beispielsweise, um Fragen zu klären wie: Welche Indikatoren müssen für die Nachhaltigkeitsanalyse berücksichtigt werden, und welche Eigenschaften eines Bauwerksteils sind für die Berechnung der Nachhaltigkeitsanalyse erforderlich?

Dokumentation: Sie umfasst zunächst die physischen Dateien im Allgemeinen, wie z. B. IFC-Dateien für das digitale Bauwerksmodell oder PDF-Dateien für technische Berichte.

Die Zuordnung verdeutlicht, dass der Zusammenhang zwischen Maßnahmenbeschreibung und Nachhaltigkeitsbewertung sehr komplex ist. Daher wird eine projektspezifische Ontologie definiert, um die prozessbasierten Informationen eines Demonstrators zu strukturieren, wie beispielsweise Aktivitäten, Maßnahmen und Auswertungen der Nachhaltigkeitsanalyse. In Abschnitt 6.1 wird die spezifische Ontologie detailliert beschrieben und erklärt, wie sie bei der Umsetzung des Demonstrators angewendet wird.

Zur Definition der Informationsanforderungen in Bezug auf Bauwerkeigenschaften und Nachhaltigkeitsindikatoren kann auf die LOIN-Ontologie [120] sowie das standardbasierte Ontologie-Netzwerk [121] zurückgegriffen werden. Beide Ansätze basieren auf dem ISO-Standard und ermöglichen es, die Indikatoren gemäß den jeweiligen Definitionsvorgaben als Vorlagen zu standardisieren. Zur Verbesserung der Verständlichkeit und zur transparenten Darstellung der im Projekt identifizierten Informationsanforderungen je Maßnahme und Demonstrator wurden die erarbeiteten Informationsbedarfe zusätzlich in tabellarischer Form gemäß dem LOIN-Konzept aufbereitet und als Anhang 9 in den Schlussbericht aufgenommen.

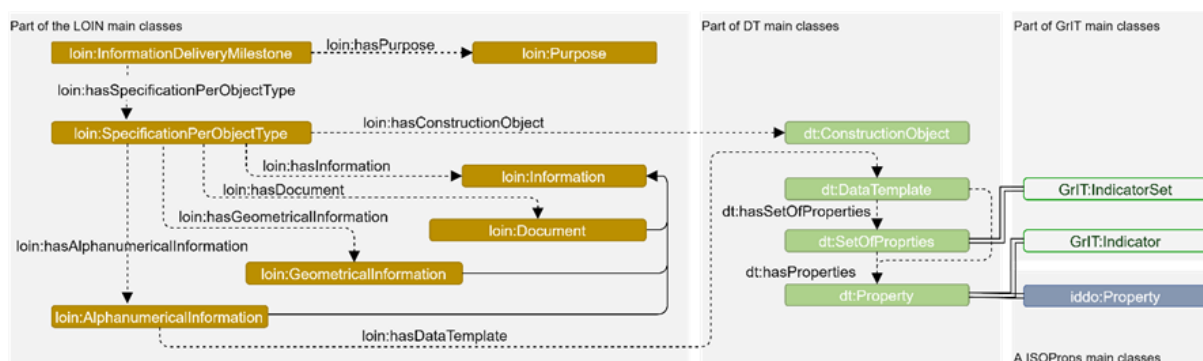


Abbildung 5-2. Verknüpfung des standardbasierten Ontologie-Netzwerks gemäß [121] mit der GreenInfraTwins Datenstruktur zur Standardisierung der Indikatordefinition.

Die Abbildung 5-2 zeigt die wesentlichen Klassen der LOIN-Ontologie, die für die Erstellung von Informationsanforderungen und die Verknüpfung zur Data Template (DT) [122] Ontologie von Bedeutung sind. Durch die Zuordnung zwischen *grit:IndicatorSet* (vgl. Abschnitt 6.1) und *dt:SetOfProperties* aus der DT-Ontologie sowie zwischen *grit:Indicator* und *dt:Property* können sowohl Indikatorgruppen als auch einzelne Indikatoren standardisiert nach dem Data Template Schema vordefiniert werden.

5.3 Spezifikation der Systemarchitektur

Im Bereich von Infrastrukturbauwerken entstehen Daten aus einer Vielzahl unterschiedlicher Quellen, die in Formaten und Strukturen stark variieren. Dazu zählen unter anderem Entwurfs- und Konstruktionspläne, geotechnische Gutachten, 3D-Modelle von Brücken oder Straßen, Sensordaten von Baugeräten und Überwachungssystemen, Umwelt- und Verkehrsdaten sowie Informationen aus dem Projektmanagement. Diese heterogenen Datenquellen werden in verschiedenen Phasen eines Infrastrukturprojekts generiert und von verschiedenen Akteuren wie Ingenieuren, Bauunternehmen und Behörden genutzt. Die Vielfalt und das unterschiedliche Format dieser Daten erschweren die Integration und Konsolidierung, was insbesondere bei der Erstellung und Pflege der DZ von Infrastrukturbauwerken eine Herausforderung darstellt.

Die Integration heterogener Datenquellen in den DZ ist eine komplexe Herausforderung, die vielfältige technische Hürden mit sich bringt. Verschiedene Datenquellen wie digitale Bauwerksmodelle, Sensordaten, Planungsdokumente und geographische Informationssysteme (GIS) liegen oft in unterschiedlichen Formaten vor und nutzen inkonsistente Standards. Dies führt zu Problemen bei der Datenkompatibilität und erschwert den nahtlosen Datenaustausch zwischen den beteiligten Systemen. Hinzu kommt, dass Daten häufig aus unterschiedlichen Phasen des Bauwerkslebenszyklus stammen und daher verschiedene Genauigkeiten und Aktualitäten aufweisen. Diese Inkonsistenzen können die Erstellung eines konsistenten, aktuellen und vollständig integrierten DZ erschweren, was die Effizienz von Wartungs- und Überwachungsprozessen sowie die Entscheidungsfindung in Bezug auf das Bauwerk beeinträchtigen kann. Um diese Probleme zu überwinden, sind robuste Datenintegrationsmethoden und interoperable Schnittstellen erforderlich, die es ermöglichen, die verschiedenen Datenquellen zu harmonisieren und in den DZ zu integrieren.

Modulare DZ bieten eine vielversprechende Lösung zur Bewältigung der Herausforderungen bei der Integration heterogener Datenquellen in Infrastrukturbauwerken. Durch die Aufteilung des DZ in unabhängige, interoperable Module, die jeweils spezifische Datenquellen oder

Funktionen repräsentieren, wird eine flexible und skalierbare Architektur geschaffen. Jedes Modul kann so konzipiert werden, dass es bestimmte Datentypen verarbeitet und mit anderen Modulen über standardisierte Schnittstellen kommuniziert. Dadurch können Datenquellen isoliert und effizient integriert werden, ohne dass eine umfassende Harmonisierung aller Datenformate erforderlich ist. Diese modulare Herangehensweise ermöglicht zudem eine schrittweise Erweiterung und Anpassung des DZ im Laufe des Bauwerkslebenszyklus, da neue Module leicht hinzugefügt oder bestehende aktualisiert werden können, ohne den gesamten DZ neu zu konfigurieren. So entsteht ein flexibles System, das den Anforderungen an Datenintegration, Skalierbarkeit und Wartbarkeit gerecht wird.

Die Systemarchitektur der DZ im GreenInfraTwins-Projekt basiert auf einer modularen Softwarearchitektur, die in drei zentrale Layer unterteilt ist: Daten, Funktionen und User Interface (UI). Diese Schichten sind in der Abbildung 5-3 detailliert dargestellt und klar voneinander abgegrenzt. Durch diese Kapselung wird die Modularität der Softwarearchitektur sichergestellt, was eine flexible Weiterentwicklung und Wartung des Systems ermöglicht. Jeder Layer erfüllt spezifische Aufgaben und kommuniziert über definierte Schnittstellen, wodurch eine hohe Skalierbarkeit und Anpassbarkeit der DZ gewährleistet wird.

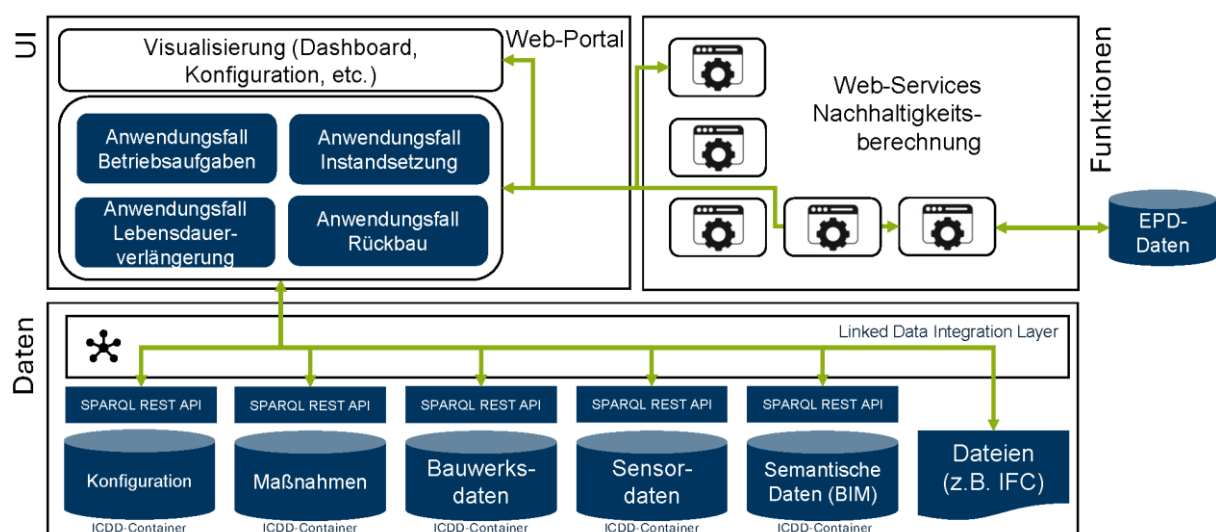


Abbildung 5-3. Softwarearchitektur des GreenInfraTwins Prototyps

Die Modularität auf der Datenebene wird durch die Integration von Daten mithilfe von ICDD-Containern ermöglicht. Verschiedene Daten zu Bauwerken und Anwendungsfällen können in einem oder mehreren Containern gespeichert und über den Linked Data Integration Layer miteinander verknüpft werden. Diese Verknüpfung erfolgt anhand der Konfiguration der jeweiligen Anwendungsfälle. Um diese Integration effizient zu gestalten, ist die Entwicklung eines Datenmodells in Form einer Ontologie erforderlich, das im Kapitel 6.1 näher beschrieben

wird. Die Interaktion mit dem Daten-Layer erfolgt über HTTP REST, wobei für semantische Daten zusätzlich das SPARQL-Protokoll verwendet wird. Die Datenquellen im Daten-Layer stellen dabei flexible Module dar, die je nach Anwendungsfall erweitert oder angepasst werden können. Zudem können dieselben Datenquellen über verschiedene Anwendungsfälle hinweg genutzt werden, beispielsweise bei mehreren Anwendungsfällen zu einem Bauwerk, bei denen Modelldaten wiederverwendet werden. Diese Umsetzung fördert nicht nur die softwaretechnische, sondern auch die prozessuale Modularität. Bestimmte Prozesse der Anwendungsfälle können isoliert im DZ angesteuert werden, ohne dass Abhängigkeiten zwischen den Anwendungsfällen bestehen. Dies wird insbesondere durch die service-orientierte Architektur des Funktions-Layers ermöglicht. Im Funktions-Layer werden kleine, unabhängige Funktionen in Form von Microservices implementiert, die autonom operieren können. Diese Microservices benötigen lediglich Eingangsdaten, die vom DZ bereitgestellt und innerhalb eines Anwendungsfalls ausgelöst werden. Eine direkte Benutzerinteraktion mit den Services ist nicht erforderlich. Zudem können die Services flexibel innerhalb eines Anwendungsfalls kombiniert und über mehrere Anwendungsfälle hinweg wiederverwendet werden. Diese Micro-Services sind in der Regel voneinander entkoppelt, um eine modulare und austauschbare Struktur zu ermöglichen, was die Wartung und Erweiterbarkeit des Systems erleichtert. Sie greifen auf verschiedene Datenquellen im Datenlayer zu, aggregieren relevante Informationen und führen darauf basierende Berechnungen durch. Die Ergebnisse werden dann in standardisierten Formaten bereitgestellt, sodass sie leicht in den Gesamtkontext des DZ integriert werden können. Um die Performance und Skalierbarkeit sicherzustellen, sind diese Micro-Services containerisiert und lassen sich dynamisch skalieren, abhängig vom jeweiligen Datenaufkommen und den Berechnungsanforderungen. Zusätzlich ermöglichen APIs eine reibungslose Kommunikation und Integration zwischen den einzelnen Services sowie mit anderen Schichten des DZ. Das User Interface der DZ-Systemarchitektur, das als Webportal umgesetzt ist, dient als zentrale Schnittstelle zwischen dem Nutzer und dem DZ. Im Mittelpunkt des Webportals stehen die Anwendungsfälle, die der DZ abbildet. Über ein intuitives Dashboard können Nutzer die Anwendungsfälle konfigurieren, indem sie Parameter festlegen, relevante Datenquellen auswählen und die gewünschten Berechnungen oder Simulationen auslösen. Das Dashboard bietet zudem Visualisierungen der Ergebnisse, um die Auswertung und Analyse der durchgeführten Prozesse zu erleichtern. Neben der Konfiguration und Visualisierung dient das Webportal auch als zentrale Plattform für den Abruf und die Abfrage von Daten, die in den verschiedenen Layern des DZ gespeichert sind. Über das Portal werden die entsprechenden Funktionen gestartet, wie z. B. die Aktivierung von Microservices im Funktions-Layer. Dies ermöglicht eine nahtlose Interaktion zwischen dem Nutzer und den

zugrunde liegenden Systemkomponenten des DZ, wodurch eine benutzerfreundliche und effiziente Steuerung der komplexen Prozesse gewährleistet wird.

5.4 Funktionale Anforderungen an die Demonstratoren

Um die Implementierung der Demonstratoren effektiv zu unterstützen, werden auf Basis der Systemarchitektur funktionale Anforderungen definiert. Die Systemarchitektur beschreibt eine modulare Trennung zwischen der Datenhaltung, der Ausführung von Web-Services zur Datenverarbeitung und der Benutzerinteraktion. Zur Gewährleistung der systemtechnischen Modularität werden die funktionalen Anforderungen jeweils als grundlegende Funktionen aus der Perspektive des Nutzers spezifiziert.

Für die Benutzerinteraktion wurde die Funktion „Auswählen eines Demonstrators“ definiert (vgl. Tabelle 6). Diese ermöglicht es dem Nutzer, einen bestimmten Demonstrator auszuwählen, die zugehörigen Daten aus der Datenverwaltung abzurufen und die auf dem Web-Service basierenden Berechnungen zu aktivieren. Für die Datenverwaltung wurden die Funktionen „Darstellen der Eingaben“ (vgl. Tabelle 7) und „Zusammenstellen der Eingaben“ (vgl. Tabelle 8) definiert. Diese Funktionen bieten dem Nutzer einen Überblick über die verwalteten Daten eines Demonstrators und ermöglichen zudem die Aktualisierung der Daten. Um die Web-Services zu aktivieren und dem Nutzer die Ergebnisse der Serviceausführung anzuzeigen, wurden die Funktionen „Durchführen der Nachhaltigkeitsbewertung“ (vgl. Tabelle 9) und „Darstellen des Bewertungsergebnisses“ (vgl. Tabelle 10) definiert. Diese Funktionen gewährleisten, dass der Nutzer die Ergebnisse der Nachhaltigkeitsbewertung auf Basis aktueller Daten in einer visuellen Form erhält.

Diese fünf Funktionen sind mit einer Beschreibung und den zugehörigen Akzeptanzkriterien in den folgenden Tabellen (Tabelle 6 bis Tabelle 10) dargestellt. Sie basieren auf der Datenintegration über ICDD-Container und ermöglichen dem Nutzer eine effiziente Interaktion mit den verschiedenen Demonstratoren und deren Nachhaltigkeitsberechnungen, um fundierte Entscheidungen zu treffen.

Tabelle 6. Funktion: "Auswählen eines Demonstrators"

ID	Beschreibung	Akzeptanzkriterien
110	Als Nutzer möchte ich die Liste der verfügbaren Demonstratoren sehen, damit ich einen spezifischen Demonstrator auswählen kann.	• Der Nutzer muss die Möglichkeit haben, einen Demonstrator aus der Liste der Demonstratoren auszuwählen • Das System muss die Metadaten aller Demonstratoren aus der Datenablage (ICDD-Datenbank) importieren • Das System muss alle verfügbaren Demonstratoren mit den zugehörigen Metadaten auflisten

Tabelle 7. Funktion: "Darstellen der Eingaben"

ID	Beschreibung	Akzeptanzkriterien
210	Als Nutzer möchte ich die Eingabe eines Demonstrators sehen, damit ich die Eingaben nach Bedarf anpassen kann.	• Der Nutzer muss die Möglichkeit haben, alle Eingaben eines Demonstrators anzusehen • Der Nutzer muss die Möglichkeit haben, die veränderbare Eingabe klar zu erkennen • Der Nutzer muss die Möglichkeit haben, veränderbare Eingaben anzupassen • Das System muss allen Eingabedaten aus der Datenablage (ICDD-Datenbank) importieren • Das System muss die Eingabe nach Anwendungszweck und Änderbarkeit kategorisch darstellen

Tabelle 8. Funktion: "Zusammenstellen der Eingaben"

ID	Beschreibung	Akzeptanzkriterien
220	Als Nutzer möchte ich die Eingabe anpassen, damit ich die Informationen eines Demonstrators aktualisieren kann.	• Der Nutzer muss die Möglichkeit haben, veränderbare Eingaben anzupassen und zu speichern • Der Nutzer muss über den Anpassungs- und Speichervorgang informiert werden • Das System muss die Eingabeformate und Wertebereiche überprüfen und bei Fehlern eine Rückmeldung geben • Das System muss gültige angepasste Eingabe in der Datenablage (ICDD-Datenbank) speichern • Das System muss bei fehlerhafter Speicherung eine Fehlermeldung ausgeben

Tabelle 9. Funktion: "Durchführen der Nachhaltigkeitsbewertung"

ID	Beschreibung	Akzeptanzkriterien
310	Als Nutzer möchte ich die Nachhaltigkeitsbewertung eines Demonstrators durchführen, damit ich die aktuellen Ergebnisse der Nachhaltigkeitsbewertung erhalten kann.	• Der Nutzer muss die Möglichkeit haben, die Eingaben zu überprüfen und die Nachhaltigkeitsbewertung zu starten • Das System muss die Nachhaltigkeitsbewertung anhand der Eingaben durchführen • Das System muss die erforderliche interne Berechnung durchführen und die Ergebnisse zur Visualisierung speichern • Das System muss den erforderlichen externen Berechnungsdienst abrufen können, um Ergebnisse zur Visualisierung zu importieren und zu speichern • Das System muss bei fehlerhafter Durchführung der Analyse eine Fehlermeldung ausgeben

Tabelle 10. Funktion: "Darstellen der Bewertungsergebnis"

ID	Beschreibung	Akzeptanzkriterien
320	Als Nutzer möchte ich das Ergebnis der Nachhaltigkeitsbewertung sehen, damit ich fundierte Entscheidungen für eine Maßnahme eines Demonstrators treffen kann.	• Der Nutzer muss die Möglichkeit haben, das Ergebnis der Nachhaltigkeitsbewertung anzusehen • Das System muss die Berechnungsergebnis zur Darstellung der Nachhaltigkeitsbewertung exportieren • Das System muss die Ergebnisse in einem vordefinierten Format darstellen

5.5 Zusammenfassung

Die Spezifikation des DZ umfasst die Informationsaustauschprozesse, die Systemarchitektur und die funktionalen Anforderungen. Im Mittelpunkt steht der modulare Aufbau des DZ, der es ermöglicht, verschiedene Anwendungsfälle als Demonstratoren unabhängig voneinander zu realisieren, ohne die Gesamtfunktionalität zu beeinträchtigen.

Die Informationsaustauschprozesse stellen durch die Definition der relevanten Informationen einen effizienten Datenaustausch zwischen den beteiligten Akteuren sicher. Die Beziehungen zwischen den notwendigen geometrischen Darstellungen, alphanumerischen Informationen und dokumentarischen Daten (z. B. externe Datenbank) werden bereitgestellt. Bauwerksdaten, Maßnahmen und Nachhaltigkeitsindikatoren werden modular über ICDD-Container verknüpft, um die Flexibilität des DZ zu gewährleisten.

Die Systemarchitektur des DZ ist in drei Schichten gegliedert: Daten, Funktionen und Benutzerschnittstelle. Auf der Datenebene ermöglichen ICDD-Container die Integration verschiedener Datenquellen. Die Funktionsschicht implementiert eine serviceorientierte Architektur, in der unabhängige Microservices Aufgaben wie die Berechnung von Nachhaltigkeitsindikatoren übernehmen. Das User Interface (UI) bietet den Nutzern Zugang zu den Anwendungsfällen und den entsprechenden Analysen.

Die fünf funktionalen Anforderungen umfassen die Auswahl von Anwendungsfällen, die Anpassung von Eingaben und die Durchführung von Nachhaltigkeitsanalysen. Das einfache UI-Design ermöglicht es den Nutzern, die Ergebnisse der Analysen auf einfache Weise einzusehen und Entscheidungen auf Basis der Daten zu treffen. Insgesamt ermöglicht die Architektur eine flexible und modulare Umsetzung der DZ, die spezifische Anwendungsfälle effizient unterstützt und die Datenintegrität sicherstellt.

6 Implementierung der digitalen Zwillinge

Die Implementierung des GreenInfraTwins Konzeptes als Prototyp erfolgt auf Basis der entwickelten Softwarearchitektur und der definierten Anforderungen in Kapitel 5. Weiterhin wird aus den gemeinschaftlich mit den Projektpartnern erarbeiteten Anforderungen auch das Datenmodell abgeleitet und in einer prototypischen Anwendung implementiert. Die Implementierung der prototypischen Anwendung erfolgt auf Basis von verschiedenen Komponenten, die als webbasierte Services entwickelt werden und in einem nächsten Schritt in einer Gesamtanwendung integriert und orchestriert werden. Die prototypische Umsetzung ist über das Repository <https://github.com/RUB-Informatik-im-Bauwesen/greeninfratwins> frei verfügbar unter MIT Lizenz zu beziehen.

Die Gesamtanwendung besteht aus einem Frontend, in dem die Visualisierung der Eingangsdaten und des Nachhaltigkeitsergebnisses gemäß den unterschiedlichen Anforderungen der Anwendungsfälle implementiert wird, und einem Backend, welches die Kommunikation mit den orchestrierten Services und dem Data Layer aufrechterhält. Die gesamte Anwendung und alle Services benötigen Node.js als plattformübergreifende Open-Source-JavaScript-Laufzeitumgebung. Die Anwendung ist mit React 18.3.¹² als clientseitige Webanwendung entwickelt und über die Paketverwaltung npm verwaltet. Das Backend wird über einen Node Express Server gehostet. Das Frontend wird darüber hinaus mit Daten gespeist aus dem Linked Data Integration Layer, welchem das abgeleitete Datenmodell zu Grunde liegt.

6.1 Datenmodell

Basierend auf dem LOIN-Konzept in Kapitel 5.2 stellt die GreenInfraTwins (GrIT)-Ontologie die Datenstruktur zur konkreten Instanziierung der in den Informationsanforderungen und Data Templates definierten alphanumerischen Informationen dar. Die Ontologie sorgt für die Strukturierung und Vernetzung dieser Daten innerhalb der DZ und bildet als elementarer Teil des Linked Data Integration Layers das grundlegende Datenmodell für die Webanwendung des GreenInfraTwins Prototypen. Die Ontologie ermöglicht eine formale Definition der benötigten Informationen der jeweiligen Anwendungsfälle und Maßnahmen des DZ.

In der GrIT-Ontologie sind mehrere zentrale Klassen definiert, die die Objekte und die Beziehungen zwischen ihnen für die DZ darstellen (siehe Abbildung 6-1). Der Namespace der

¹² React 18.3.1 (April 26, 2024) <https://github.com/facebook/react/releases/tag/v18.3.1>

Ontologie lautet <https://greeninfratwins.com/ns/grit#> und das zugehörige Präfix wurde zu *grit* festgelegt. Die Ontologie ist dokumentiert und online verfügbar³.

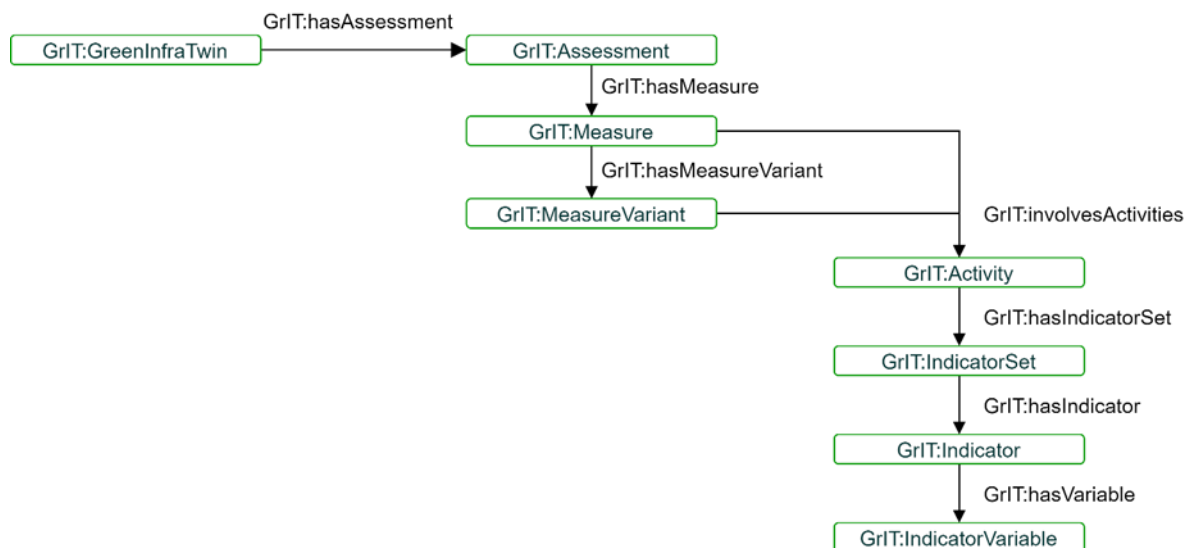


Abbildung 6-1. Darstellung GrIT-Ontologie mit den Hauptklassen

Die Klasse *grit:GreenInfraTwin* repräsentiert den Anwendungsfall der DZ und verbindet alle relevanten Informationen, die für die Nachhaltigkeitsbewertung notwendig sind. *grit:Activity* beschreibt die spezifischen Aktivitäten innerhalb einer Maßnahme, während *grit:Measure* die gesamte Maßnahme umfasst. Beide Klassen sind eng mit den Nachhaltigkeitsindikatoren verknüpft, die durch die Klasse *grit:Indicator* abgebildet werden, welche zentrale Kennzahlen wie CO₂-Emissionen oder Energieeffizienz erfasst. Um diese Indikatoren berechnen zu können, werden die Variablen in der Klasse *grit:IndicatorVariable* definiert. Die Klasse *grit:Assessment* beschreibt das Szenario, in dem eine Nachhaltigkeitsbewertung durchgeführt wird. Die Ontologie ermöglicht dabei verschiedenartige Indikatoren anzulegen, sodass durch den Prototyp berechenbare Indikatoren als *grit:SimpleComputedValueIndicator*, durch externe Anwendungen berechnete Indikatoren als *grit:ComplexComputedValueIndicator* und manuell eingegebene bzw. konstante Indikatoren als *grit:ConstantValueIndicator* klassifiziert werden können. Für den *grit:SimpleComputedValueIndicator* lassen sich Berechnungsservices und Eingangsparameter definieren, sodass beispielsweise IFC-Modellparameter direkt mit dem Indikator verknüpft werden können. Eine weitere Klassifikation und Gruppierung der Indikatoren ist über die Klassen *grit:IndicatorType* und *grit:IndicatorSet* möglich.

Die GrIT-Ontologie ist darüber hinaus mit den Ontologien für Standardisierte LOINs und Data Templates (siehe auch Kapitel 5.2) verknüpft, sodass geometrische, alphanumerische und

³ <https://rub-informatik-im-bauwesen.github.io/greeninfratwins/ns/>

auch dokumentierende Informationen im jeweils richtigen Detaillierungsgrad für die Nachhaltigkeitsanalyse in den Anwendungsfällen bereitgestellt werden. Alle erforderlichen Informationen werden im Rahmen des Informationsaustauschprozesses ermittelt und über ICDD-Datencontainer in die GreenInfraTwins Anwendung integriert. Die GrIT-Ontologie und deren Instanzen werden innerhalb des Linked Data Integration Layer zur einfacheren Verwaltbarkeit in einer kommerziellen Graphendatenbank GraphDB⁴ vorgehalten, um in der Anwendung abrufbar zu sein. Über die GrIT-Ontologie werden auch die verschiedenen Datenquellen und Services für die spezifischen Anwendungsfälle verknüpft. Dies geschieht im Wesentlichen über die Objekteigenschaften *grit:hasICDDContainerID* und *grit:hasConnectedServices* in der Klasse *grit:GreenInfraTwin*. Dadurch lassen sich Informationen aus den angeschlossenen Containern über verteilte SPARQL Abfragen auslesen und für Berechnungen bereitstellen. Außerdem können über die *grit:hasConnectedServices* Eigenschaft die Basiskomponenten für die Integration von EPD-Daten und die Berechnung von Indikatoren explizit deklariert werden. Durch diese generische Datenmodellierung lassen sich je Anwendungsfall etwa verschiedene EPD-Datenbanken je Land oder weitere externe Services einbetten, ohne dass das komplette System neu konfiguriert werden muss.

Bezüglich der Ontologieentwicklung wird im Projekt die iterative Methodik von Linked Open Terms [123] verwendet, welches eine zyklische Abfolge von Anforderungen, Entwicklung, Evaluierung, und Maintenance der Ontologie fokussiert. Über die Evaluierung anhand der Demonstratoren, lässt sich die Ontologie weiter im Rahmen eines kontinuierlichen Verbesserungsprozesse optimieren, um den Anforderungen aus den Demonstratoren zu genügen. Eine vollständige, dokumentierte Version der Ontologie ist über die URL <https://rub-informatik-im-bauwesen.github.io/greeninfratwins/ns/> .

6.2 Basiskomponenten und Schnittstellen

Im Folgenden werden implementierte Basiskomponenten und die Schnittstellen zwischen einzelnen Komponenten für die Integration der prototypischen Anwendung dargestellt.

⁴ Ontotext GraphDB v. 10.7 <https://graphdb.ontotext.com/documentation/10.7/>

Basiskomponente ICDD Plattform

Für die Datenhaltung wird in diesem Prototyp die etablierte Technologie der ICDD-Informationencontainer verwendet. Als zu Grunde liegendes System für die Datenhaltung gemäß ICDD-Standard ISO 21597 wird der an der RUB entwickelte Webplattform-Prototyp von Hagedorn [124] entwickelt. Die RUB ICDD-Plattform ermöglicht den Datenaustausch und die Visualisierung zwischen verschiedenen Interessengruppen über ICDD-Informationencontainer gemäß ISO 21597. Sie unterstützt das Management von Containerstatus nach ISO 19650-1 und bietet Werkzeuge für Datenabfragen, -manipulation und -integration aus relationalen Datenbanken. Die Plattform ist in fünf Schichten unterteilt: Daten, Datenzugriff, Business Logic, Service und Interfaces. Sie unterstützt zudem die Validierung und Abfrage von RDF-Daten und wurde in verschiedenen Bereichen wie dem Asset Management von Verkehrsinfrastrukturen erfolgreich implementiert. Die Nutzung der RUB ICDD Plattform erfolgt über die OpenICDD⁵ Schnittstelle und ist für den Benutzer nicht sichtbar erkenntlich. Ein wesentlicher Vorteil in der Nutzung der bestehenden Infrastruktur ist, dass die Datenhaltung und der Zugriff nicht vollständig neu implementiert werden müssen. Für die Authentifizierung des GreenInfraTwins Prototypen wird ebenfalls auf den Login der RUB ICDD Plattform zurückgegriffen, sodass der Login ähnlich wie bei einem Single-Sign On System (beispielsweise bekannt für "Anmelden mit Google") erfolgen kann. Somit muss für das Projekt GreenInfraTwins kein neues Zugriffssystem implementiert werden. Die Schnittstellendefinition ist als OpenICDD öffentlich einsehbar und kann auch von weiteren Desktop- oder Webanwendungen genutzt werden. Darüber hinaus können über die in der ICDD-Plattform implementierten Dienste zur Konvertierung von IFC zu RDF über das Paket IFCtoLBD [125] auch Modellinformationen über SPARQL abgefragt werden.

Basiskomponente IFC-Viewer

Um IFC-Modelle der Demonstratoren im Frontend visualisieren zu können, werden die Open BIM Components⁶ von ThatOpenCompany verwendet, welche als open-source Projekt über GitHub verfügbar sind. IFC-Modelle werden zuvor über die OpenICDD Schnittstelle aus angeschlossenen ICDD-Containern herausgefiltert und zur Visualisierung in das Frontend geladen. Eine Aufbereitung der IFC-Geometrie für die webbasierte Ansicht im Frontend erfolgt über eine Webassembly, welche mit dem Paket mitgeliefert wird. Auf Basis der Visualisierung

⁵ OpenICDD Schnittstelle, <https://philhag.github.io/open-icdd/>

⁶ Open BIM Components, https://github.com/ThatOpen/engine_components

lassen sich Selektionen von IFC-Elementen vornehmen und über die selektierten Elemente und deren IFC-GUIDs auch die jeweiligen Eigenschaften auslesen, welche dann beispielsweise für die Berechnung von Indikatoren relevant sind. Diese Eigenschaften lassen sich in den zugehörigen Containern über SPARQL abfragen. In der GrIT Ontologie lassen sich die Eigenschaften von IFC-Modellen direkt über eine Objekteigenschaft auf die Variablen von Indikatoren mappen.

Basiskomponente EPD Konverter am Beispiel von Ökobaudat

Im Rahmen des Projektes wird die Abfrage von EPD-Daten eine Anbindung an die in Deutschland gebräuchliche EPD-Datenbank Ökobaudat vorgenommen. Hierzu wurde wie in dem Konzept vorgestellt zunächst ein Wrapper-Service entwickelt, der gezielte Datensätze aus der Ökobaudat in das RDF-Format transferiert, um Abfragen und Verknüpfungen zu den EPD-Daten herstellen zu können. Zunächst werden die spezifizierten Daten im XML-Format aus der Datenbank über die externe Ökobaudat-API per REST-Request abgefragt. Das XML-Format der Ökobaudat basiert auf einer Reihe von XML-Schemata [126], die in Abbildung 6-2 dargestellt sind. Im Wesentlichen werden durch den implementierten Wrapper Daten entsprechend des EPD_Dataset.xsd, ILCD_ProcessDataSet.xsd und der zugehörigen Commons transformiert.

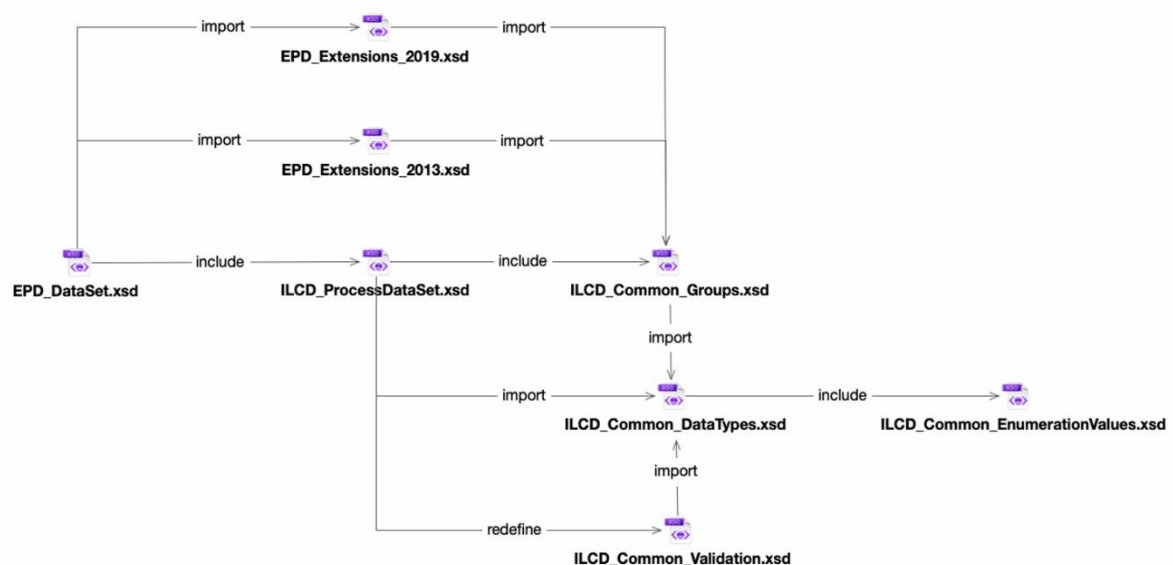


Abbildung 6-2. XML-Schemastruktur der Ökobaudat [126]

Für den Konvertierungsprozess wird ein vorerst leerer RDF-Graph instanziiert und alle notwendigen Namespaces hinzugefügt. Die Namespaces werden identisch zu den XML namespaces übernommen. Die XML-Daten werden in eine DOM-Struktur (Document Object Model) geparkt. Diese Struktur ermöglicht das einfache Extrahieren relevanter Daten. Jeder

enthaltene Prozess wird iterativ in RDF-Tripel transformiert, indem hartkodierte Regeln verwendet werden. Ein Prozess besteht hierbei sowohl aus Prozessinformationen, wie etwa IDs, Namen und Klassifikationen, als auch Austauschdaten (Inputs und Outputs von Materialströmen). Zur Transformierung der Prozessinformationen wird der XML-Tag `<processDataSet>` in ein RDF-Subjekt überführt. An dieses Subjekt werden Prädikate und Objekte angehängt, die die eigentlichen Informationen des Prozesses enthalten. Innerhalb jedes `<processDataSet>` befindet sich der Tag `<processInformation>`, das wesentliche Metadaten über den Prozess enthält. Zu diesen Metadaten gehören die UUID, ein eindeutiger Bezeichner des Prozesses, der Name des Prozesses, der unter dem Tag `<baseName>` zu finden ist, und Klassifikationsinformationen, die den Prozess typisieren. Klassifikationsinformationen werden mithilfe eines Blank-Nodes gespeichert und mithilfe von RDF-Prädikaten dem Subjekt des Prozesses angehängen. Jeder Prozess kann mit Austausch verknüpft sein, die im XML durch `<exchange>` Tags dargestellt werden. Ein Austausch beschreibt eine Interaktion des Prozesses, wie z. B. den Ein- oder Ausgang von Materialflüssen. Der Verweis auf den Flussdatensatz wird aus dem Element `<referenceToFlowDataSet>` extrahiert, und die relevanten Attribute, wie `refObjectId`, werden als RDF-Literale angehängt. Der Funktionstyp beschreibt die Rolle des Austauschs (z. B. Eingang) und wird als Literal im RDF gespeichert. Die Austauschrichtung gibt an, in welche Richtung der Austausch verläuft und wird ebenfalls als RDF-Literal gespeichert. Jeder Austausch wird als RDF-Subjekt repräsentiert und mit dem eingangs erwähnten Prozess verknüpft. Weitere Details wie Verweise auf Mengengruppen werden aus den untergeordneten Elementen wie etwa `<referenceToUnitGroupDataSet>` extrahiert und als Literale in den RDF-Graphen aufgenommen. Alle generierten Tripel werden nach und nach an den Ausgangsgraphen angehängen. Zum Schluss wird der erstellte RDF-Graph in die Turtle Syntax serialisiert. Ein exemplarischer konvertierter Datensatz kann der Tabelle 11 entnommen werden.

Tabelle 11. Exemplarischer Datensatz in der EPD Konvertierung

Originales XML	Konvertiertes RDF
<pre> <?xml version="1.0" encoding="utf-8"?> <processDataSet xmlns:epd="http://www.iai.kit.edu/EPD/2013" xmlns:common="http://lca.jrc.it/ILCD/Common" xmlns="http://lca.jrc.it/ILCD/Process"> ... <exchanges> <exchange dataSetInternalID="1"> <referenceToFlowDataSet type="flow" data set" refObjectId="20f32be5-0398-4288-9b6d-accddd195317"> <common:shortDescription xml:lang="de">Erneuerbare Primärenergie als Energieträger (PERE)</common:shortDescription> </referenceToFlowDataSet> <functionType>General reminder flow</functionType> <exchangeDirection>Input</exchangeDirection> <referencesToDataSource /> <common:other> <epd:referenceToUnitGroupDataSet type="unit group data set" refObjectId="93a60a57-a3c8-11da-a746-0800200c9a66"> <common:shortDescription xml:lang="de">MJ</common:shortDescription> </epd:referenceToUnitGroupDataSet> <epd:amount epd:module="A1-A3">35.61383</epd:amount> <epd:amount epd:module="A4"></epd:amount> <epd:amount epd:module="A5"></epd:amount> <epd:amount epd:module="D"></epd:amount> </common:other> </exchange> </exchanges> </processDataSet> </pre>	<pre> @prefix rdf: <http://www.w3.org/1999/02/22-rdf-syntax-ns#>. @prefix inst: <https://inf.bi.rub.de/epd-wrapper#>. @prefix base: <http://lca.jrc.it/ILCD/Process#>. @prefix common: <http://lca.jrc.it/ILCD/Common#>. @prefix epd: <http://www.iai.kit.edu/EPD/2013#>. ... inst:exchange_20f32be5-0398-4288-9b6d-accddd195317 a base:Exchange; common:referenceToUnitGroupDataSet "MJ"; base:exchangeDirection "Input"; base:functionType "General reminder flow"; base:refObjectId "20f32be5-0398-4288-9b6d-accddd195317"; epd:module [epd:amount ""; rdf:label "A4"], [epd:amount ""; rdf:label "A5"], [epd:amount ""; rdf:label "D"], [epd:amount "35.61383"; rdf:label "A1-A3"]; rdf:label "Erneuerbare Primärenergie als Energieträger (PERE)". </pre>

Auf der linken Seite der Tabelle 11 ist der originale Datensatz in maschinenlesbarem XML verkürzt dargestellt, während auf der rechten Seite der gleiche Datensatz verkürzt in RDF zu sehen ist. Durch die Implementierung dieses Wrappers können beliebige Datensätze direkt in RDF umgewandelt werden, mit den Modelldaten von Bauwerken verknüpft werden und dann in aggregierter Form über SPARQL abgefragt werden.

Basiskomponente Indikatorberechnung

Im Rahmen des Projekts werden Nachhaltigkeitsindikatoren aufgelistet und für unterschiedliche Anwendungsfälle und Maßnahmen ausgewählt und berechnet. Aufgrund der heterogenen Berechnungsvorschriften und der stark variierenden Berechnungslogiken der einzelnen Indikatoren konnte keine generische, einheitliche Berechnungsfunktion definiert werden. Stattdessen wurden für jeden Indikator und jede Maßnahme spezifische Berechnungsfunktionen implementiert, die die jeweiligen fachlichen Anforderungen und Anwendungsfallkontexte berücksichtigen.

Jede Indikator-Berechnungsfunktion basiert auf der zugehörigen Berechnungsvorschrift und definiert die erforderlichen Eingangsdaten explizit als Parameter. Die benötigten Eingangsdaten werden aus verschiedenen angebundenen Datenquellen bezogen, darunter strukturierte Informationen zur Maßnahme und Parameter aus der GrIT-Ontologie,

Eigenschaften aus IFC-Modellen gespeichert in ICDD-Containern sowie Umwelt- und Produktdaten aus Umweltproduktdeklarationen, die über geeignete Konverter eingebunden werden. Die Zuordnung und Abfrage der Eingangsdaten zu den Variablen der Berechnungsfunktionen erfolgt über eingebettet semantische Abfragen von SPARQL.

Die Berechnungslogik wird innerhalb der jeweiligen Funktion gemäß der spezifizierten Formel implementiert. Dabei werden sowohl anwendungsfallspezifische Randbedingungen berücksichtigt. Die Ergebnisse werden als strukturierte Rückgabewerte einer Funktion bereitgestellt und stehen für die Visualisierung im Frontend sowie für weiterführende Exporte zur Verfügung.

6.3 Zusammenfassung

Die Implementierung des GreenInfraTwins-Konzepts erfolgt prototypisch auf Basis der entwickelten Softwarearchitektur und Anforderungen. Diese Anforderungen bilden außerdem die Grundlage für das anwendungsfallübergreifende Datenmodell, das in einer webbasierten Anwendung umgesetzt wird. Die Daten werden über den Linked Data Integration Layer bereitgestellt, der auf dem erstellten Datenmodell basiert. Das Datenmodell wird durch die GreenInfraTwins-Ontologie (GrIT) definiert. Diese Ontologie strukturiert die alphanumerischen Informationen und vernetzt die Daten innerhalb des DZ. Zentrale Klassen der Ontologie beschreiben Objekte wie Aktivitäten, Maßnahmen und Nachhaltigkeitsindikatoren, die für die Bewertung relevant sind. Die Ontologie ermöglicht es, verschiedene Arten von Indikatoren zu definieren und externe Datenquellen und Services einzubinden. Zu den Basiskomponenten des Prototyps zählen eine ICDD-Plattform für die Datenhaltung nach ISO-Standard. Sie stellt die für das Frontend sowie für die Berechnung benötigten Eingangsdaten bereit, darunter IFC-Modelle, RDF-basierte Maßnahmendefinitionen und weitere strukturierte Informationen. Ein IFC-Viewer ermöglicht die Visualisierung von Modellen und ein EPD-Konverter stellt die Verbindung zur Ökobaudat-Datenbank her, um Umweltproduktdeklarationen für die Berechnungen zu nutzen. Ergänzend realisieren Indikator-Berechnungsfunktionen die anwendungsfallspezifische Logik der Nachhaltigkeitsindikatoren. Diese Komponenten sind in die Anwendung integriert und unterstützen die Nachhaltigkeitsbewertung.

7 Auswahl der Demonstratoren

Dieses Kapitel stellt für jedes Land ein spezifisches Demonstratorbauwerk vor, welches die jeweiligen nationalen Besonderheiten und Innovationsansätze widerspiegelt, die zur Steigerung der Nachhaltigkeit und Effizienz im Bauprozess beitragen. Drei zentrale Anwendungsfälle werden in der Folge vorgestellt, die sich aus den spezifischen Herausforderungen und Potenzialen der jeweiligen Demonstratorbauwerke ergeben. Zu jedem der vorgestellten Demonstratorbauwerke werden die verfügbaren Daten aufgeführt. Dabei handelt es sich einerseits um Bauwerksdaten und -modelle und andererseits um länderspezifische Daten zu den einsetzbaren Bauprozessen, Materialverbrauch, Energieeffizienz und weiteren Umweltindikatoren für die Anwendungsfälle. Die Qualität und Verfügbarkeit dieser Daten ist entscheidend für die Analyse und Berechnung der Nachhaltigkeitseffekte und variiert je nach landesspezifischer Datenerhebung und -nutzung.

7.1 Systemgrenzen

Für alle Demonstratoren sind die für die Indikatoren verwendeten räumlichen und zeitlichen Systemgrenzen zu definieren. Durch diese wird festgelegt, ob das Bauwerk, die direkt betroffenen Verkehrswege und / oder ein erweitertes Einflussgebiet für die Berechnung einzelner Indikatoren verwendet und welcher Betrachtungszeitraum zugrunde gelegt wird. Als Beispiel werden bauwerksbezogene Lebenszykluskosten aller Materialien und Prozesse des jeweiligen Brückenbauwerks berechnet, was der räumlichen Systemgrenze 1 in Abbildung 7-1 entspricht.

Dabei zu berücksichtigende Vorketten beispielsweise im Rahmen der Materialherstellung werden im Rahmen der zeitlichen Systemgrenzendefinition unter Angabe der in Abbildung 2-11 genannten Lebenszyklusphasen und Module spezifiziert. Externe Kosten werden für die von den durchzuführenden Maßnahmen direkt betroffenen Straßen (oben und unten liegender Sachverhalt) berechnet, wodurch die räumliche Systemgrenze 2 adressiert wird. Lärmemissionen haben eine größere räumliche Wirkung und es ist die Verwendung der Systemgrenze 3 erforderlich.

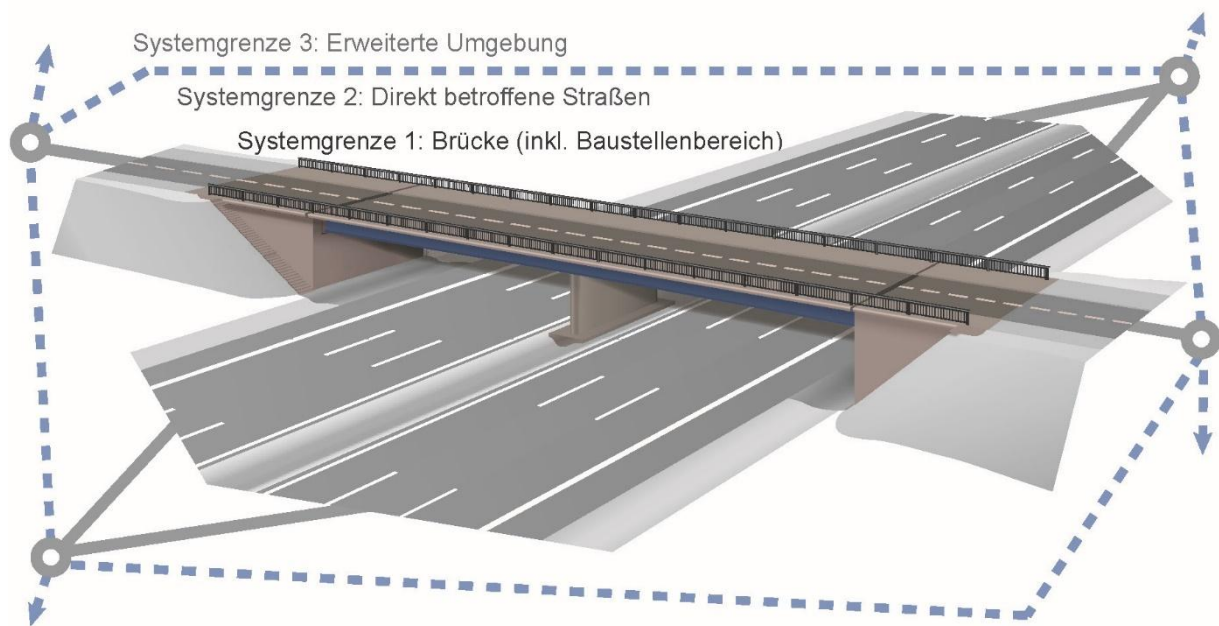


Abbildung 7-1. Ebenen der räumlichen Systemgrenzendefinition [52]

7.2 Deutschland: Standard-Plattenbalkenbrücke der ViA6

Der Demonstrator für Deutschland ist eine Standard-Plattenbalkenbrücke in Stahlbetonbauweise, die in dieser Bauart im deutschen Fernstraßennetz sehr häufig ausgeführt wird. Als Grundlage für die Ableitung eines verallgemeinerten Referenzbauwerks werden typische und ausgeführte Brücken eines Autobahnabschnitts der A6 verwendet, welche im Rahmen eines PPP-Projekts in der Nutzungsphase betreut werden. Die Überführung eines Realbauwerks in ein Referenzbauwerk hat das Ziel, die Komplexität zu vereinfachen, ortsspezifische Randbedingungen nicht abzubilden und damit die Aussagekraft allgemeingültiger zu gestalten. Die Straßenachse des Brückenbauwerks wurde für das Referenzbauwerk rechtwinklig und ohne Schrägen ausgerichtet, um eine standardisierte Basis zu schaffen. Die Tragfelder wurden gleichgroß gestaltet, wobei eine Mittelstütze exakt mittig in das Bauwerk integriert wurde.

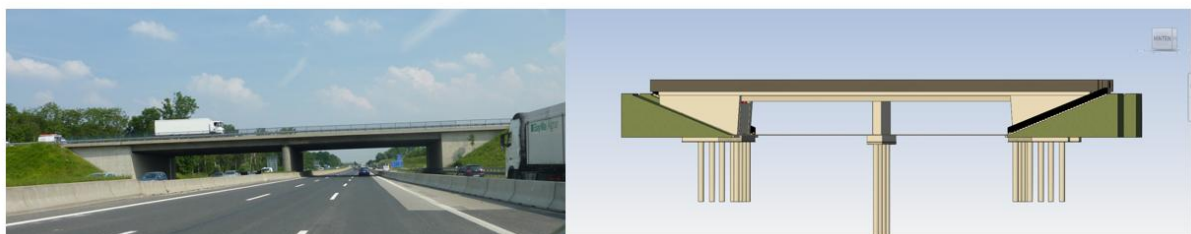


Abbildung 7-2. Reales Bauwerk und abgeleitetes Referenzbauwerk als 3D-Modell

Eine wesentliche Aufgabe bei der Modellierung des Projekts ist die Entwicklung und Anwendung einer standardisierten Elementstruktur. Diese wird basierend auf einer

bestehenden hierarchischen Elementstrukturierung im Abgleich mit den Strukturierungsstufen der ASB-ING Schlüssel entworfen. Zusätzlich erfolgte ein Abgleich mit den Bauteilklassen des BIM-Portals Deutschland, die im Objektkatalog von BIM Bundesfernstraßen veröffentlicht sind [127]. Das Resultat ist eine vierstufige Klassifizierung:

Stufe 1: Bauwerk

Stufe 2: Objektgruppe

Stufe 3: Objektklasse

Stufe 4: Objekttyp

Für die Modellierung diente die vierte Stufe als Grundlage. Den Bau-Elementen wurden die erforderlichen Modellierungswerkzeuge der Autorensoftware Autodesk Revit entsprechend zugewiesen. Zur Gewährleistung eines reibungslosen Datentransfers wurde für den IFC-Export klar definiert, dass ein Ifc2x3-Export erfolgt und alle im BIM-Modell gespeicherten Attribute in projektspezifisch definierten PropertySets gespeichert werden.

Alle für das Erhaltungsmanagement erforderlichen Bauteile wurden bei der Modellerstellung berücksichtigt. Für die weitergehende Projektbearbeitung liegen Daten aus laufenden PPP-Projekten vor. Hierzu gehören u. a. alle relevanten Planunterlagen, Baustoff- und Bauteilprüfungsberichte, Ergebnisse aus Bauwerksprüfungen und Hintergrunddaten zu Betriebsprozessen. Dies ermöglicht es, insbesondere die Anwendungsfälle 1 und 4 mit den erforderlichen Eingangsdaten zu versehen.

7.3 Schweiz: Überführungsbauwerk entlang des Berner Ostrings

Zur Erprobung des Demonstrators für die Schweiz wurde ein Brückenbauwerk am Berner Ostring entlang der Nationalstraße N6 ausgewählt. Dieses Brückenbauwerk am Freudenbergerplatz hat eine Länge von 154 Metern und eine Breite von 25,3 Metern (vgl. Abbildung 7-3). Es handelt sich um eine schlaff armierte, mehrfeldrige Plattenbrücke mit Spannweiten von 20 Metern in den Innenfeldern und 17 Metern in den Randfeldern. Der Brückenquerschnitt besteht aus einer Flachdecke, die durch eingelegte Luxit-Rohre zur Gewichtsreduktion verstärkt wurde. Die sieben Innenstützen sind als ca. 4,0 Meter lange Wandscheiben ausgeführt. Die Stützenaufleger wurden als Betongelenke gestaltet. Die Widerlager der Brücke basieren auf einer Pfahlgründung. Der Straßenverkehr verläuft in beiden Richtungen zweistreifig mit zusätzlichen Standstreifen.

Aufgrund des hohen Verkehrsaufkommens (DTV ca. 80.000 Fz./24h) und des schlechten Zustands einzelner Bauteile ZK=3 (ZK=1 ist nicht beschädigt, ZK=4 ist der schlechteste

Zustand) war vorgesehen, sowohl eine Umnutzung des Pannestreifens vorzunehmen als auch notwendige Erhaltungsmaßnahmen umzusetzen. Dazu zählen der Bau einer größeren Lärmschutzwand sowie eine Verstärkung bzw. der Ersatz bestimmter Abschnitte und Elemente.



Abbildung 7-3. Das Brückenbauwerk am Berner Ostring: Alter Zustand (links) und neuer Zustand (rechts)

Ziel der Untersuchung war es, im Rahmen des Anwendungsfalls 2 den Einsatz unterschiedlicher Materialien für eine Maßnahme zu erproben und vergleichend gegenüberzustellen: einerseits der durchgehende Einsatz von Beton C30/37, andererseits der kombinierte Einsatz von Ultrahochleistungs-Faserverbundbaustoff (UHFB) für ausgewählte Elemente und Beton C30/37. Die erste Variante wurde tatsächlich auf der Brücke realisiert, während die zweite Variante als Beispiel für Vergleichszwecke in diesem Projekt ausgearbeitet wurde. Bei beiden Varianten gab es eine (gleiche) Abbruchphase, in der zunächst einige Elemente (Belag, Abdichtung, Lager, Leitmauern usw.) aus der Konstruktion entfernt wurden. Zum Demonstrator waren nachfolgende Unterlagen vorhanden:

- KUBA-Daten (Datenbankinformationen zu Bauteilen und deren Eigenschaften), und
- Projektdokumentation (technischer Bericht, Bestandspläne, Bau-/Detailpläne)

Der Umfang des Anwendungsfalls, die Ausarbeitung der Eingabedaten und die Spezifikationen für die Entwicklung der BIM-Modelle, um einen Vergleich der Maßnahmen zu ermöglichen, sind im Anhang enthalten.

7.4 Österreich: Seitenhafenbrücke (Wien) – Plattenbalkenkonstruktion

Als Demonstrator für Österreich wurde in Abstimmung mit den relevanten Stakeholdern die Seitenhafenbrücke in Wien (B0245) ausgewählt (siehe Abbildung 7-4). Die Bearbeitung erfolgte in Koordination mit den zuständigen Stellen und wurde durch eine gemeinsame Bauwerksbegehung ergänzt. Das Bauwerk wurde im Zuge des Umbaus der Freudenauer Hafenstraße (B14) errichtet und 2011 eröffnet. Es überquert den Donaukanal und stellt eine wichtige Verbindung zwischen dem 2. und 11. Wiener Gemeindebezirk dar. Neben dem

Straßenverkehr werden auch Fußgänger- und Radverkehr geführt. Auftraggeber war die MA 29 (Brückenbau und Grundbau), die Planung erfolgte zwischen 2006 und 2009 durch eine Arbeitsgemeinschaft aus PCD ZT-GmbH sowie den Architekturbüros AGU und Zeininger Architekten. Die Brücke besitzt eine Länge von 128,69 m und eine Breite von 15,0 m und wurde in integraler Bauweise realisiert. Die Seitenhafenbrücke ist als fünf-feldriges, vorgespanntes Stahlbetontragwerk ausgeführt und wird durch V-förmige Stahlstreben gestützt. Je zwei Strebenpaare treffen sich an den Achsfüßen 10 und 20 und sind dort über Gussknoten verbunden, wodurch das Tragwerk dem Grundsystem eines vierstieligen Rahmens entspricht. In den Uferbereichen (Achsen 0–10 und 20–30) besteht die Konstruktion aus einer etwa 1,0 m dicken vorgespannten Stahlbetonplatte, die im Bereich der Strebenansätze plastisch ausgebildet ist. Zur Hauptöffnung hin geht diese in eine vorgespannte Plattenbalkenkonstruktion mit acht Balken über, um das Eigengewicht zu reduzieren. Die Bauhöhe variiert entlang des Momentenverlaufs und bildet damit die Beanspruchung konstruktiv ab. Die Widerlager sind monolithisch mit ca. 70° Neigung ausgeführt; Streben und Widerlager gründen auf Pfahlrosten bzw. einer überschnittenen Bohrpfahlwand.



Abbildung 7-4. Visualisierung der Seitenhafenbrücke

Ziele: Die erste Maßnahme betrifft den Ersatz der Fahrbahnübergänge, wobei eine Variante den Einsatz elastomerer Fahrbahnübergänge vorsieht und eine alternative Variante Fingerfahrbahnübergänge betrachtet. Die zweite Maßnahme adressiert die Verstärkung der Träger in querkraftsensiblen Bereichen. Hier wurde einerseits eine Verstärkung mittels Ankerbolzen untersucht, andererseits als alternative Lösung die Verstärkung mittels Karbonfaserlamellen (CFRP). Als Datengrundlage standen technische und statische Berichte sowie Pläne der PCD ZT-GmbH [127], Ausschreibungsunterlagen der MA 29, Interviews mit

dem Statiker sowie dem Fachbereich Bauwerkssicherheit, ein 3D-Modell und Monitoring-Daten zur Verfügung.

7.5 Ergebnis der Demonstratoren

Die Umsetzung der drei vorgestellten Demonstratoren wird für jeden Anwendungsfall einzeln im Folgenden vorgestellt. Es wird auf die jeweils erfassten Daten und Auswertungen eingegangen und die Ergebnisse werden diskutiert.

7.5.1 AWF 1 – Betriebsaufgaben

Für das Erfassen, Auswerten und Aufbereiten aller Auswirkungen der erhobenen Betriebsaufgaben werden zunächst die Energie- und Stoffflüsse für den deutschen Demonstrator maßnahmenspezifisch erhoben. Dies geschieht mit einem Formular oder dem Einladen der Daten über eine Schnittstelle. Als Ergebnis lassen sich die Detailauswertungen für jede Maßnahme anzeigen, unterteilt in die ökologische, ökonomische und sozio-kulturelle Qualität (Abbildung 7-5).

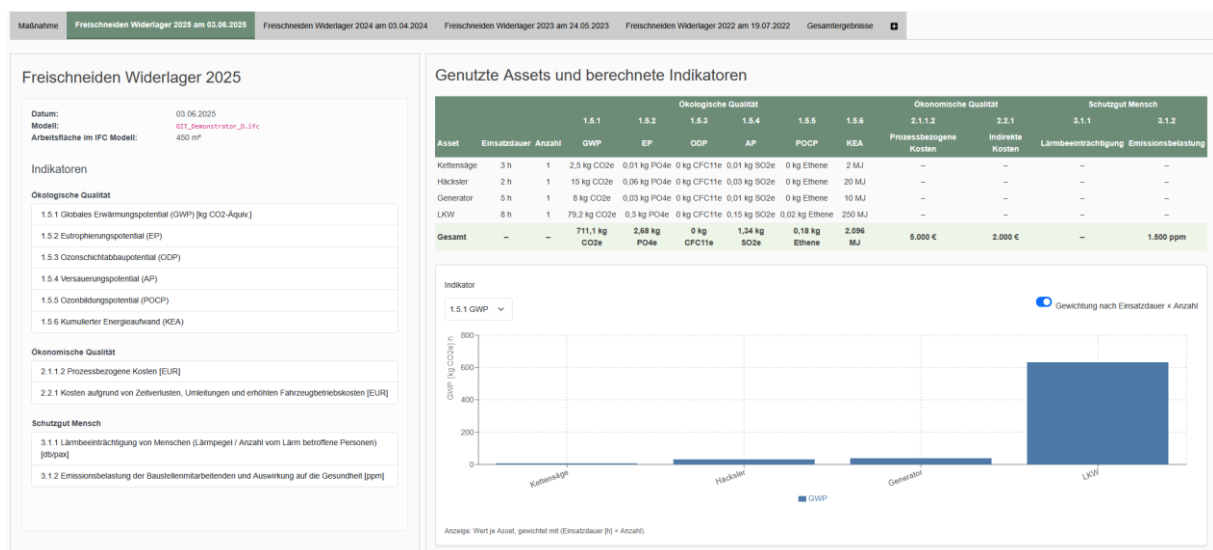


Abbildung 7-5. Demonstrator Deutschland des GrIT-Prototyps: Maßnahmenspezifische Übersicht über die berechneten Indikatoren

Da die Einzelergebnisse nur eine begrenzte Aussagekraft besitzen, können die Gesamtergebnisse als zeitlicher Verlauf dargestellt werden. Die Visualisierung erfolgt in grafischer Form und in Tabellenform. Die Ergebnisse in den einzelnen Qualitäten lassen sich genauso wie die anzuzeigenden Indikatoren filtern (Abbildung 7-6).

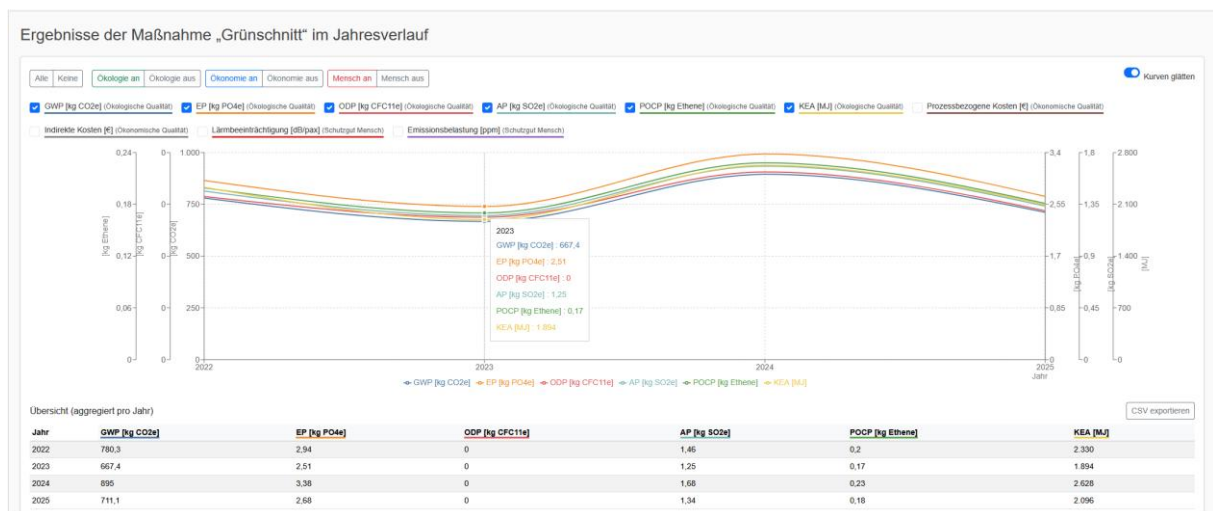


Abbildung 7-6. Demonstrator Deutschland des GriT-Prototyps: Gesamtübersicht über die berechneten Indikatoren (hier dargestellt sind die Indikatoren der ökologischen Qualität)

Diskussion der Ergebnisse

Im dem Jahresverlauf lässt sich eine Schwankung der Ergebnisse erkennen. Dies ist in diesem Fall auf unterschiedliche Einsatzzeiten der verwendeten Geräte und damit unterschiedliche Energieverbräuche zurückzuführen. Im Rahmen einer Optimierung ist zu untersuchen, wodurch die unterschiedlichen Einsatzzeiten entstehen. Gleichzeitig kann berechnet werden, welche Auswirkungen der Einsatz von energiesparenden Geräten oder elektrischen betriebenen Geräten erzeugt. Des Weiteren können die Ergebnisse voneinander abweichender Prozesse, unterschiedlicher Durchführender oder regionale Abweichungen oder durch den Vergleich mehrerer Bauwerke oder durch Portfolioanalysen miteinander verglichen werden. Auf diese Weise kann eine Optimierung der Betriebsaufgaben hinsichtlich der Umweltwirkungen, der Kosten und der Auswirkungen auf den Menschen erfolgen.

7.5.2 AWF 2 - Instandhaltung/-setzung

Der Anwendungsfall umfasst die Demonstration auf der Brücke am Berner Ostring (Kapitel 7.3). Zuvor wurden BIM-Modelle und andere für die Berechnung relevante Eingabedaten (siehe Anhang 9.4) in den GriT-Prototyp geladen (Abbildung 7-7).

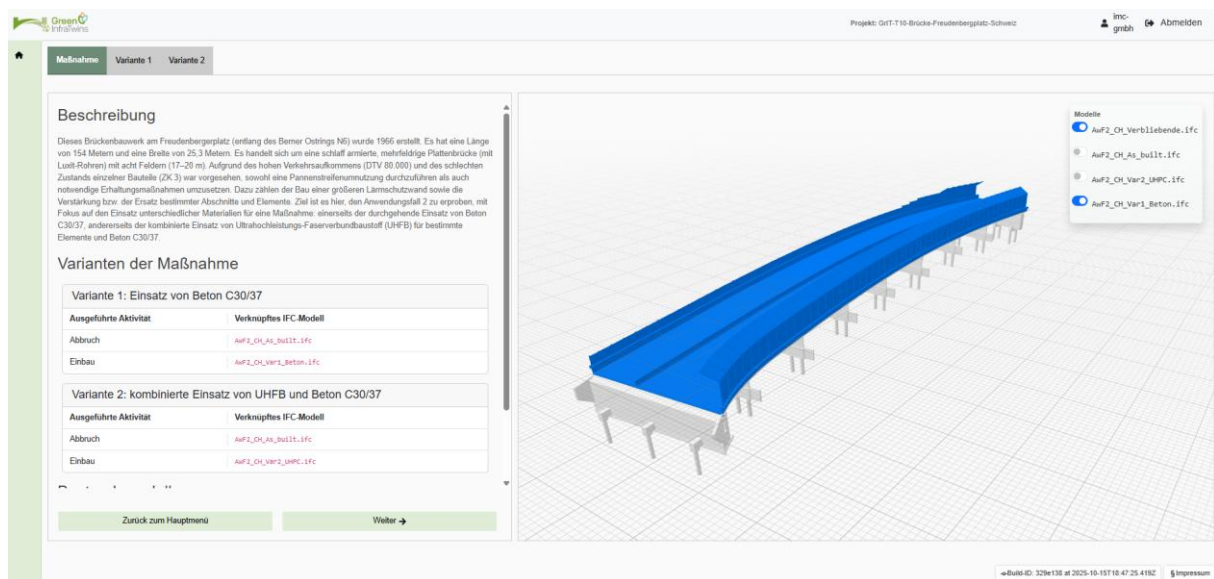


Abbildung 7-7. Demonstrator Schweiz des GrIT-Prototyps: BIM-Modell, das die Brücke nach Anwendung der Maßnahme mit Variante 1 (Verwendung von Beton 30/37) darstellt

Im Prototyp gibt es zwei Parameter, die eingestellt werden können, um die Berechnung zu beeinflussen: Anzahl der Bauphasen (zwei oder drei) und die maximal zulässige Geschwindigkeit in der Arbeitszone (60 oder 80 km/h). Nach Auswahl dieser Parameter – hier werden drei Bauphasen und eine zulässige Geschwindigkeit von 60 km/h angenommen – führt der Prototyp die Indikatorberechnung sowie die Visualisierung der Ergebnisse durch (Abbildung 7-8).

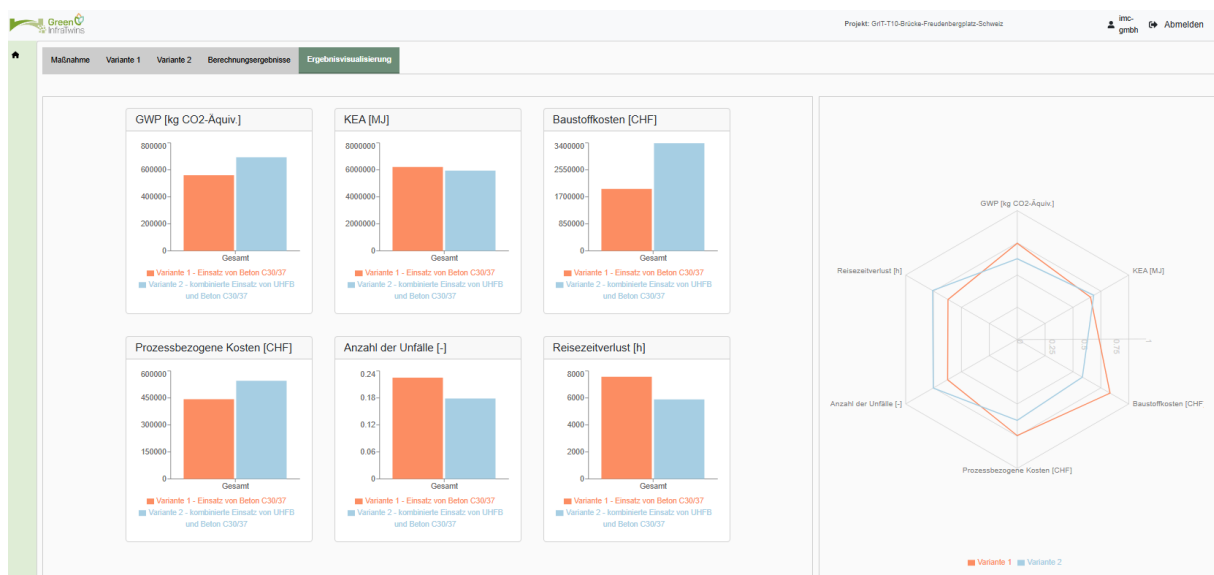


Abbildung 7-8. Demonstrator Schweiz des GrIT-Prototyps: Anzeige berechneter Indikatoren über gestapelte Diagramme (links) und Radardialogramme (rechts)

Diskussion der Ergebnisse

Ökologische Indikatoren: Variante 2 (blau in Abbildung oben) weist einen deutlich geringeren Materialeinsatz auf, mit etwa 25% weniger UHFB-Volumen im Vergleich zu C30/37-Beton sowie 85% weniger Bewehrungsstahl. Zudem ist aufgrund des Einsatzes von UHFB keine Abdichtung erforderlich (siehe Anhang 9.4). Dennoch erzielt Variante 1 (orange in Abbildung oben) ein geringeres Gesamt-GWP, das etwa 23% unter dem von Variante 2 liegt, weist jedoch einen leicht höheren Energiebedarf auf (rund 4% höher als bei Variante 2).

Ökonomische Indikatoren: Trotz des geringeren Materialeinsatzes ist Variante 2 deutlich teurer als Variante 1, sowohl hinsichtlich der material- als auch der prozessbezogenen Kosten, mit Mehrkosten von etwa 73% bzw. 23%.

Sozio-kulturelle Indikatoren: Die kürzere Erhärtungszeit von UHFB im Vergleich zu C30/37 führt zu einer verkürzten Bauzeit und damit zu geringeren Verkehrsbeeinträchtigungen. Dies resultiert nicht nur in reduzierten Reisezeitverlusten für Verkehrsteilnehmende, sondern auch in einem geringeren Unfallpotenzial. Insgesamt verschafft die um 20 Tage kürzere Bauzeit der Variante 2 einen klaren Vorteil, mit 28% geringeren Reisezeitverlusten und 25% weniger potenziellen Unfällen im Vergleich zu Variante 1.

Die erzielten Ergebnisse sind als fallspezifisch zu betrachten und stark von den Eingangsdaten sowie den zugrunde liegenden Annahmen abhängig. Dennoch zeigt die Analyse, dass bestimmte Tendenzen ohne detailliertere Berechnungen nicht zuverlässig abgeschätzt werden können. Der wesentliche Mehrwert des GrIT-Prototyps liegt dabei vor allem in der Automatisierung von Berechnungsprozessen sowie in der transparenten Darstellung der Vor- und Nachteile der angewandten Maßnahmen. Die Gesamtbewertung von Indikatoren kann durch ein Radardiagramm, in dem die Indikatoren normalisiert und gewichtet sind, weiter unterstützt werden (Abbildung oben); diese Analyse lag jedoch außerhalb des Rahmens dieses Projekts.

7.5.3 AWF 2 – Instandhaltung/-setzung und AWF 3 – Lebensdauererlängerung

Anwendungsfall 2 und 3 widmen sich der Instandhaltung und der Lebensdauererlängerung der Seitenhafenbrücke in Österreich. Für die Variantenstudie wurde ein digitaler Zwilling erstellt. In diesem digitalen Zwilling sind relevante Dokumente sowie Eingabedaten für die Berechnung hinterlegt und mit dem GrIT-Prototypen verknüpft (Abbildung 7-9).

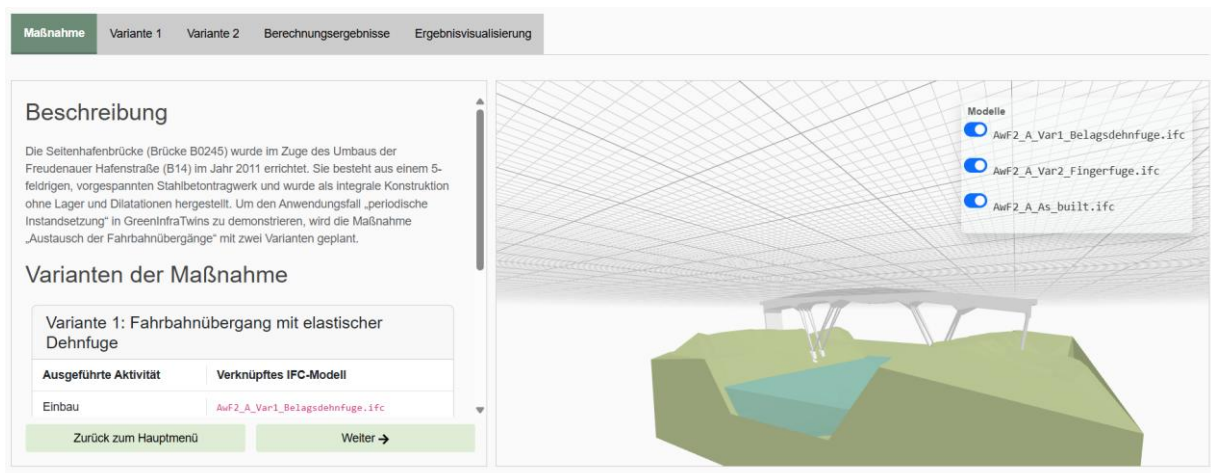


Abbildung 7-9. Demonstrator Österreich des GrIT-Prototyps: BIM-Modell, das die Brücke mit den Fahrbahnübergängen und Querkraftverstärkungsmaßnahmen darstellt.

AwF 2 – Fahrbahnübergänge

Im Anwendungsfall zwei werden zwei unterschiedliche Fahrbahnübergänge miteinander verglichen. Diese sind farblich im Modell gekennzeichnet und ihre Daten sind mit dem IFC-Modell verknüpft. Für die Studie wurden drei Indikatoren herangezogen: das globale Erderwärmungspotential (GWP), die prozessbezogenen Kosten und die Materialkosten (Abbildung 7-10).

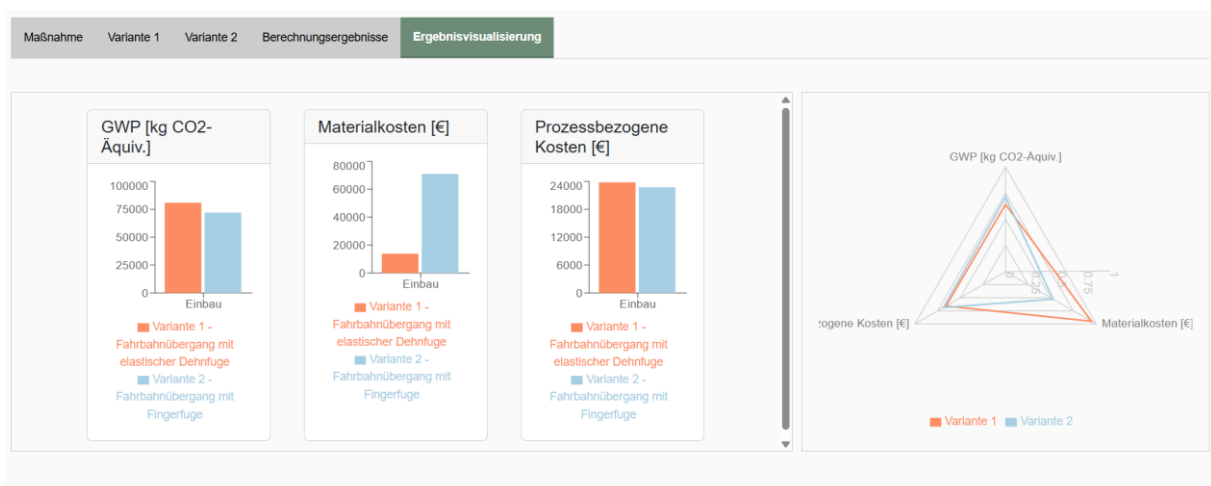


Abbildung 7-10. Demonstrator Österreich des GrIT-Prototyps: AwF 2 Ergebnisse der Studie: Anzeige berechneter Indikatoren über gestapelte Diagramme (links) und Radardiagramme (rechts)

Diskussion der Ergebnisse

CO₂-Bilanzierung und Umweltwirkung

Die Umweltwirkung des Ersatzes der Fahrbahnübergänge wird wesentlich durch den Materialeinsatz, die Herstellungsprozesse sowie den baubedingten Aufwand geprägt. Elastomere Fahrbahnübergänge weisen typischerweise eine kompaktere Bauweise mit geringerem Stahlanteil auf, wodurch die Emissionen in der Herstellungsphase tendenziell niedriger ausfallen können. Fingerfahrbahnübergänge erfordern in der Regel einen höheren Materialeinsatz, insbesondere an Stahl, sowie eine komplexere Fertigung, was sich in einem erhöhten CO₂-Fußabdruck der Produktionsphase widerspiegeln kann. Im Lebenszyklus wird dieser Unterschied vor allem dann relevant, wenn sich die Austauschintervalle unterscheiden und dadurch zusätzliche Eingriffe vermieden oder notwendig werden. Hinsichtlich der Umweltleistung schneidet hiermit die Stahlfingerfuge aufgrund ihrer längeren Lebensdauer besser ab als die bestehende elastische Dehnfuge, trotz höherer materialbedingter Emissionen.

Lebenszykluskosten (LCC)

Für die wirtschaftliche Bewertung sind neben den initialen Material- und Einbaukosten vor allem Sperrzeiten, Wartungsintervalle und langfristige Erhaltungsmaßnahmen entscheidend. Elastomere Systeme können aufgrund eines vergleichsweise schnellen und einfachen Einbaus Vorteile bei den prozessbezogenen Kosten bieten. Fingerfahrbahnübergänge sind häufig investitionsintensiver, können jedoch – abhängig von der Beanspruchung – durch eine robuste Ausführung und potenziell längere Nutzungsdauer wirtschaftlich konkurrenzfähig sein. Damit hängt die Vorteilhaftigkeit maßgeblich davon ab, wie sich Wartungs- und Ersatzzyklen über den Lebenszyklus entwickeln. Der Einheitspreis der Stahlfingerfuge liegt demnach etwas höher als bei der eingebauten elastischen Belagsdehnfuge und wäre nur durch Berücksichtigung des Einheitspreises wirtschaftlicher. Durch die kurze Lebensdauer der elastischen Belagsdehnfuge steigen die prozessbezogenen Kosten und Materialkosten erheblich, was letztlich die Stahlfingerfuge als wirtschaftlichere Variante darstellt.

7.5.4 AwF 3 – Querkraftverstärkung

Die untenstehende Abbildung 7-11 zeigt an der Brücke die farblich markierten Zonen der Querkraftverstärkung. Für diese Variantenstudie werden zwei Maßnahmen zur Lebensdauererweiterung analysiert. Dabei werden vier Indikatoren betrachtet: das globale

Erderwärmungspotential (GWP), die Kosten (prozessbezogene und materialbezogene), der Lärm sowie der Zuverlässigkeitsindex (siehe Abbildung 7-12).

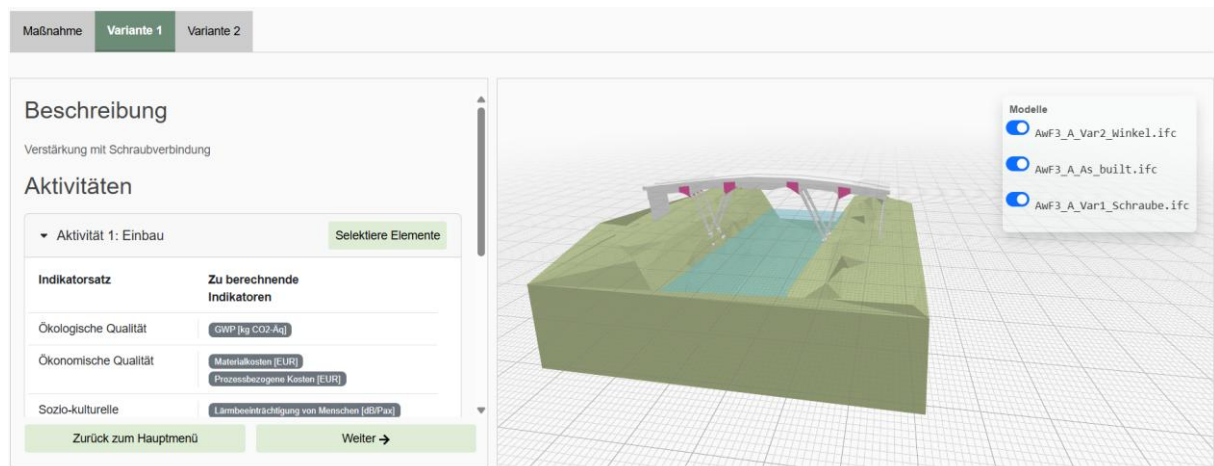


Abbildung 7-11. Demonstrator Österreich des GrIT-Prototyps: BIM-Modell, das die Brücke mit den farblich markierten Zonen der Querkraftverstärkung zeigt.

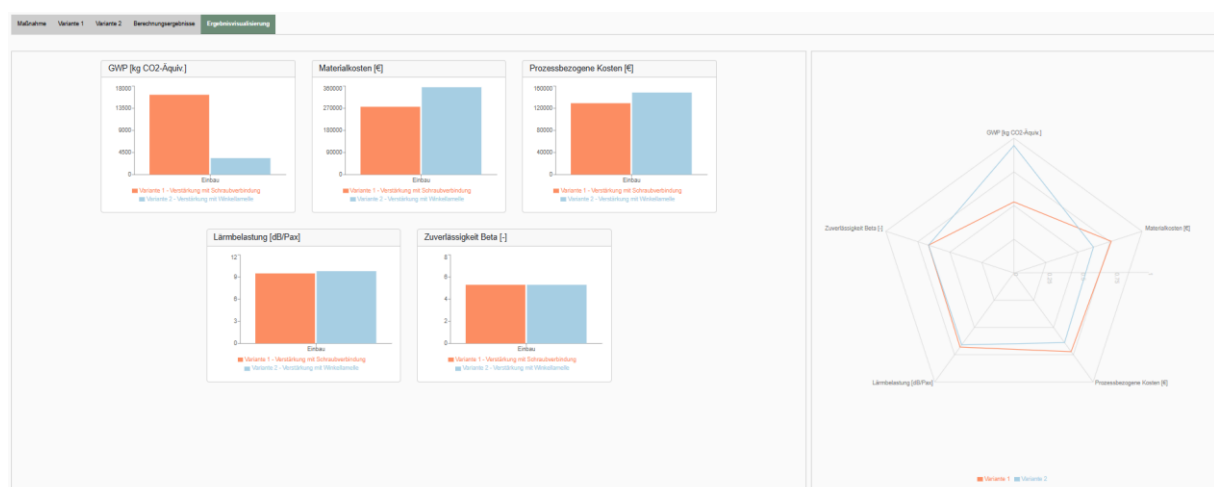


Abbildung 7-12. Demonstrator Österreich des GrIT-Prototyps: Anzeige berechneter Indikatoren über gestapelte Diagramme (links) und Radardiagramme (rechts) Diskussion der Ergebnisse

CO₂-Bilanzierung und Umweltwirkung

Die Umweltwirkung der Querkraftverstärkung ergibt sich sowohl aus dem Materialeinsatz als auch aus den Baustellenprozessen. Ankerbolzenlösungen sind typischerweise mit bohr- und montageintensiven Abläufen verbunden und benötigen zusätzliche Stahlmengen, wodurch der prozessbezogene Emissionsanteil steigen kann. CFK-Lamellen weisen zwar einen energieintensiven Herstellungsprozess auf, benötigen jedoch meist deutlich geringere Materialmassen und ermöglichen eine sehr gezielte Verstärkung. In der Gesamtbilanz wird

daher wesentlich, ob die Maßnahme zukünftige Eingriffe reduziert und dadurch langfristig Emissionen einsparen kann.

Lebenszykluskosten (LCC)

Bei der wirtschaftlichen Bewertung stehen Investitionskosten, Ausführungsaufwand und Folgekosten im Vordergrund. Ankerbolzen sind materialseitig häufig günstiger, können jedoch aufgrund der arbeitsintensiven Montage und längerer Baustellenzeiten höhere prozessbezogene Kosten verursachen. CFK-Lamellen sind in der Regel kostenintensiver im Material, können jedoch durch eine schlanke Ausführung, kürzere Einbaudauer und geringere Eingriffstiefe wirtschaftliche Vorteile bringen. Besonders relevant ist, wie sich die Maßnahme auf Inspektionsaufwand, Nachbehandlungen und langfristige Erhaltung auswirkt.

Lärm

Die Lärmemissionen entstehen hier hauptsächlich während der Ausführung. Bei Ankerbolzen sind Bohrarbeiten und mechanische Befestigungsschritte erforderlich, die typischerweise höhere Lärm- und Erschütterungseinträge verursachen. CFK-Lamellen erfordern hingegen vor allem Oberflächenvorbereitung und Klebprozesse, wodurch die bauzeitliche Lärmbelastung – abhängig von der Baustellenorganisation – geringer ausfallen kann. Für innerstädtische Lagen kann dies ein zusätzlicher Entscheidungspunkt sein.

Lebensdauererweiterung

Ziel der Querkraftverstärkung ist es, die Tragreserve in querkraftsensiblen Bereichen zu erhöhen und damit das Risiko fortschreitender Schädigungen zu reduzieren. Ankerbolzen erhöhen die Tragfähigkeit über mechanische Verstärkung und zusätzliche Verbundwirkung, während CFK-Lamellen durch effiziente Zugkraftaufnahme und Rissbegrenzung eine wirkungsvolle Nachrüstung ermöglichen. In beiden Fällen entscheiden die Dauerhaftigkeit der Verstärkung sowie die langfristige Funktionstüchtigkeit über den Beitrag zur Lebensdauererweiterung. Eine wirksame Verstärkung kann Folgeschäden reduzieren, zukünftige Eingriffe vermeiden und damit sowohl Umwelt- als auch Kostenkennwerte über den Lebenszyklus verbessern.

Gesamtinterpretation Querkraftverstärkung (Ankerbolzen vs. CFK-Karbonfaserlamellen)

Die Ergebnisse zeigen, dass die Bewertung der Varianten nicht allein über Material- oder Herstellungseffekte erfolgen sollte, sondern über den gesamten Lebenszyklus. Für den AT-

Demonstrator sind insbesondere die Auswirkungen auf CO₂-Bilanz, Lebenszykluskosten, Lärm und die zu erwartende Lebensdauerverlängerung maßgebend, da sich Unterschiede in der Bauphase und im Betrieb langfristig deutlich auf Nachhaltigkeit und Wirtschaftlichkeit auswirken können.

7.5.5 AwF 4 – Rückbau

Der Anwendungsfall Rückbau wird einführend über eine Übersicht der verwendeten Indikatoren, ein geometrisches Modell in denen die verschiedenen Bauteilgruppen ausgewählt bzw. markiert werden können sowie eine Gruppierung von möglichen Rückbauaktivitäten dargestellt. In Abbildung 7-13 ist die Aktivität „Rückbau Unterbau“ ausgewählt worden und die dazugehörigen Modellelemente sind im geometrischen Modell hervorgehoben. Auf dieser Basis kann eine Berechnung der relevanten Indikatoren erfolgen.

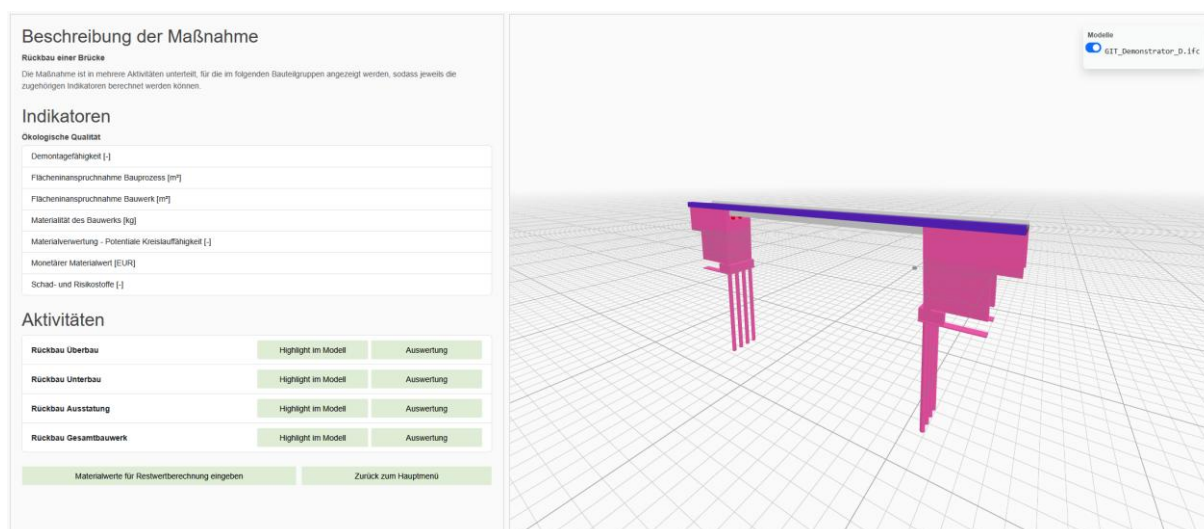


Abbildung 7-13. Demonstrator Deutschland des GrIT-Prototyps: Übersicht über die Indikatoren und Bauteilgruppen für den AWF Rückbau

In der Auswertungsansicht sind die Ergebnisse der Indikatoren für die einzelnen Bauteilgruppen dargestellt. Die Abkürzungen basieren auf der für den deutschen Demonstrator verwendeten Datenstruktur. Für den Unterbau sind die Bauteilgruppen Gründung (GRU) und Widerlager (WID) im Modell vorhanden. Für diese sind die Ergebnisse in Abbildung 7-14 tabellarisch aufgeschlüsselt und grafisch dargestellt. Nicht alle Materialklassen sind im Unterbau verbaut. Daher werden nicht alle Ergebniskategorien für die Indikatoren angezeigt. Neben den Informationen zu den verbauten Materialien sind auch Schad- und Risikostoffe, die im Rahmen einer Inspektion erhoben werden können, im DZ erfasst.



Abbildung 7-14. Demonstrator Deutschland des GrIT-Prototyps: Übersicht über die Indikatoren und Bauteilgruppen für den AWF Rückbau

Diskussion der Ergebnisse

Alle Indikatoren des Anwendungsfalls 4 unterstützen die weiteren Anwendungsfälle bzw. den Gesamtückbau des Bauwerks. Grundsätzliches Ziel ist die Förderung der Kreislaufwirtschaft. Die berechneten Indikatoren ändern sich nicht, wenn keine materiellen Änderungen am Bauwerk erfolgen. Eine Ausnahme stellt der monetäre Restwert dar, der in Abhängigkeit von den Kostenansätzen für Recycling und Wiederverwendung regelmäßig angepasst werden sollte. Hierfür müssen die verwendeten Eingangsdaten jährlich auf Aktualität geprüft werden. Wenn Instandsetzungsmaßnahmen durchgeführt werden, müssen die veränderten Materialien im DZ erfasst bzw. überarbeitet werden, wodurch sich auch die Indikatorergebnisse ändern. Da positive Beiträge zum Klimaschutz auf Basis des Klimaschutzgesetzes (§13 Berücksichtigungsgebot) zukünftig in Deutschland bei allen Investitionsmaßnahmen nachgewiesen werden müssen, liefert der Digitale Zwilling hier eine hervorragende Grundlage.

7.6 Ergebnis der Evaluation

Die im Projekt entwickelten Demonstratoren sowie die Plattform wurden im Rahmen von drei Workshops in Essen, Wien und Bern den Infrastrukturbetreibern vorgestellt. Der inhaltliche Schwerpunkt der jeweiligen Workshops lag dabei auf einem landesspezifischen Bauwerk. In den Workshops wurden die zentralen Inhalte und Zielsetzungen des Projekts erläutert und insbesondere die Ergebnisse der prototypischen Anwendung präsentiert und diskutiert. Ein weiterer Fokus lag auf der Nutzerfreundlichkeit des Prototyps sowie auf den vorhandenen Einstell- und Anpassungsmöglichkeiten. Darüber hinaus wurde das Potenzial für eine

zukünftige praktische Anwendung des entwickelten Ansatzes gemeinsam mit den Teilnehmenden reflektiert. Die wesentlichen Erkenntnisse aus diesen Diskussionen sind im Folgenden zusammengefasst.

7.6.1 Feedback aus dem Anwendungsworkshop in Bern

Der im Workshop vorgestellte Prototyp sowie die Demonstratoren wurden von den Teilnehmenden insgesamt positiv bewertet. Insbesondere die Verbindung von BIM-Modellen mit Nachhaltigkeitsindikatoren wurde als überzeugend und innovativ eingeschätzt. Die anschauliche Visualisierung der Ergebnisse, unter anderem durch Spinnen- und Balkendiagramme, erleichtert das Verständnis komplexer Zusammenhänge und unterstützt Variantenvergleiche auf nachvollziehbare Weise. Dadurch wird ein klarer Mehrwert für Entscheidungsprozesse sichtbar, insbesondere im Kontext der Erhaltungsplanung von Verkehrsinfrastrukturen. Die Demonstratoren trugen wesentlich dazu bei, die theoretischen Konzepte greifbar zu machen und deren potenziellen Nutzen praxisnah zu diskutieren.

Hinsichtlich der betrachteten Anwendungsfälle zeigte sich, dass vor allem die Instandsetzung sowie die Nutzungsdauerverlängerung als besonders relevant wahrgenommen wurden. Diese spiegeln die aktuellen Herausforderungen der Infrastrukturbetreiber wider, bei denen die Verlängerung der Lebensdauer bestehender Bauwerke und der effiziente Umgang mit Ressourcen im Vordergrund stehen. Der Rückbau wurde zwar als methodisch sinnvoller Bestandteil des Gesamtkonzepts anerkannt, jedoch im Vergleich als weniger prioritär eingestuft. Insgesamt bestätigten die Rückmeldungen, dass die Auswahl der Anwendungsfälle gut geeignet ist, um typische Entscheidungsfragen im Asset- und Erhaltungsmanagement abzubilden.

Die im Projekt verwendeten Nachhaltigkeitsindikatoren wurden grundsätzlich als zweckmäßig und hilfreich bewertet, insbesondere für den Vergleich von Maßnahmenvarianten. Gleichzeitig wurde deutlich, dass die Interpretation der Ergebnisse eine sorgfältige Einordnung erfordert. Unsicherheiten über den Lebenszyklus von Infrastrukturbauwerken, etwa im Hinblick auf zukünftige Nutzungsintensitäten oder technologische Entwicklungen, stellen eine zentrale Herausforderung dar. Zudem wurde mehrfach betont, dass Nachhaltigkeit nicht auf einzelne Kennwerte wie das Global Warming Potential reduziert werden darf, sondern eine ganzheitliche Betrachtung notwendig ist, die ökologische, ökonomische und funktionale Aspekte einschließt. Fragen der Gewichtung und Aggregation unterschiedlicher Indikatoren wurden als wesentlicher Diskussionspunkt identifiziert und als weiterer Entwicklungsbedarf benannt.

Die Rolle von BIM wurde von den Teilnehmenden nicht als Selbstzweck, sondern als wesentliche Unterstützung für Transparenz, Nachvollziehbarkeit und Skalierbarkeit der Nachhaltigkeitsanalysen verstanden. Besonders positiv hervorgehoben wurde der Ontologie-basierte Ansatz, der eine strukturierte Verknüpfung von Bauwerksdaten, Nachhaltigkeitsindikatoren und externen Datenquellen ermöglicht. Die Nutzung von Open-Source-Technologien sowie die prinzipielle Erweiterbarkeit des Systems wurden ebenfalls als klare Stärken gesehen. Gleichzeitig wurde der Bedarf unterstrichen, die Grenzen des Systems, Annahmen und bestehende Datenlücken klar zu kommunizieren. Themen wie die Skalierbarkeit auf Abschnitts- oder Netzebene sowie die Abbildung weiterer Aspekte, etwa Transportwege oder Tunnelbauwerke, wurden als wichtige Ansatzpunkte für eine Weiterentwicklung genannt.

Aus Sicht der Infrastrukturbetreiber wurde deutlich, dass der entwickelte Ansatz vor allem für die strategische Erhaltungs- und Entscheidungsplanung von Infrastrukturbetreibern relevant ist, weniger für die unmittelbare Projektierung einzelner Bauvorhaben. Der aktuelle Entwicklungsstand wurde als fundierter Proof of Concept eingeordnet, der das Potenzial besitzt, bestehende Entscheidungsprozesse künftig qualitativ zu unterstützen. Für eine weitergehende Anwendung wurden jedoch zusätzliche Schritte als notwendig erachtet, insbesondere die Integration in bestehende IT-Architekturen und Prozesse sowie die Validierung anhand realer Entscheidungsfälle. Insgesamt wurden die Projektergebnisse als zielführend bewertet und als wertvolle Grundlage für eine systematische und transparentere Nachhaltigkeitsbewertung im Infrastrukturbereich eingeschätzt.

7.6.2 Feedback aus dem Anwendungsworkshop in Essen

Im Rahmen des Abschlussworkshops wurden die Projektergebnisse hinsichtlich ihrer fachspezifischen Relevanz für das Bauwesen diskutiert. Ein zentrales Ergebnis ist die Erkenntnis, dass der im Forschungsprojekt erarbeitete Demonstrator mit seiner für einzelne Anwendungsfälle jeweils spezifizierten Datenspeicherung und Datenaufbereitung für die Anwendung im Brückenbau und für die Anwendungsfälle 1 und 4 auch teilweise für den Straßenbau eignet. Die vorgestellten Prozesse in den Anwendungsfällen, die erforderlichen Eingangsdaten und die Ergebnisdarstellung waren geeignet, um die Umsetzbarkeit der Projektergebnisse für eine operative Anwendung des Brückenbaus grundsätzlich beurteilen zu können. Das Projekt leistet damit einen positiven Beitrag zur Realisierung der DZ für Bundesfernstraßen, wobei besonders die erfolgreiche Integration heterogener Bestandsdatenquellen sowie die Verknüpfung mit Nachhaltigkeitsindikatoren inkl. der

erarbeiteten Steckbriefe hervorgehoben wurden. Über den Brückenbau hinaus wurde ein signifikantes Transferpotenzial der Methodik auf den Tunnel- und den Straßenbau identifiziert.

Für die künftige Weiterentwicklung wurde angemerkt, dass hohe Anforderungen an die Datenarchitektur vorausgesetzt werden. Um eine medienbruchfreie Prozesskette zu gewährleisten, ist der Übergang zu einer strukturierten digitalen Datenerfassung (z. B. durch standardisierte digitale Formulare mit Verbindung zu BIM-Modellen) zwingend erforderlich. Perspektivisch können die Projektergebnisse dazu beitragen, zukünftige regulative Anforderungen an die Nachhaltigkeitsanalyse zu erfüllen, die insbesondere durch EU-Vorgaben zu erfüllen sind. Der entwickelte Demonstrator dient bereits heute als funktionaler Nachweis für die Umsetzbarkeit zukünftiger Standardisierungsprozesse. Eine engere Vernetzung mit weiteren Forschungsvorhaben wird empfohlen, um Synergien bei der Definition von Datenschnittstellen zu nutzen.

Die umfassenden Ergebnisse sollen durch eine gezielte Kommunikationsstrategie, etwa durch Webinare oder Vorträge in verschiedenen Institutionen, einem breiteren Publikum und insbesondere Vertretern der öffentlichen Hand präsentiert werden. In der abschließenden Bewertung der Lebenszyklusphasen wurde zudem das Potenzial der Indikatoren analysiert: Während der Fokus aktuell auf der Betriebsphase liegt, lassen sich einige umgesetzte Indikatoren auch unmittelbar in den Planungs- und Ausführungsphasen anwenden. Dies ermöglicht eine durchgängige Informationsführung über den gesamten Lebenszyklus und bildet die Grundlage für eine umfassende Nachhaltigkeitsanalyse sowohl auf Bauwerksebene als auch auf der Portfolioebene.

7.6.3 Feedback aus dem Anwendungsworkshop in Wien

Im Rahmen des Anwendungswshops in Wien wurden mehrere Rückmeldungen zur prototypischen Softwarelösung sowie zu den entwickelten Anwendungsfällen diskutiert. Die Beiträge verdeutlichen einerseits das Potenzial des Tools für die Erhaltungsplanung und Variantenbewertung, zeigen andererseits aber auch Herausforderungen hinsichtlich Skalierung, Datenpflege und methodischer Weiterentwicklung auf.

Aus Sicht der kommunalen Vertretung liegt ein wesentlicher Mehrwert des Anwendungstools in der Möglichkeit, Variantenstudien für Erhaltungsmaßnahmen durchzuführen und dabei unterschiedliche Systemgrenzen (z. B. Umfang der Maßnahme, Betrachtungszeitraum, einbezogene Indikatoren) abzubilden. Besonders hervorgehoben wurde die potenzielle Funktion des Tools als strukturierte Informations- und Datenspeicherlösung, die im Rahmen

zukünftiger Eingriffe als Referenz genutzt werden kann. Als vorteilhaft wurde zudem die Möglichkeit bewertet, Bewertungen rasch zu aktualisieren, insbesondere wenn neue Materialien, Produkte oder technische Lösungen am Markt verfügbar werden. Obwohl das Tool vorrangig auf Ebene der Einzelstruktur ansetzt, wurde betont, dass gerade solche „Einzelbewertungen“ für Betreiber wertvolle Stützstelleninformationen liefern können, die für eine spätere Portfolio- oder Netzbetrachtung von Bedeutung sein können. Gleichzeitig wurde darauf hingewiesen, dass sich durch die einheitliche Methodik zumindest eine Vergleichbarkeit von Prozessen und Maßnahmen ableiten lässt. Als zentraler Nachteil wurde jedoch der Aufwand für das Anlegen, Pflegen und Aktualisieren der Datenbasis und Modellstruktur genannt, da hierfür im Betrieb entsprechende Ressourcen und Verantwortlichkeiten erforderlich sind.

Die Vertretung der ASFINAG betonte, dass Digitale Zwillinge im Kontext des aktuellen Projektrahmens vor allem als deskriptive Ausprägung zur Unterstützung des Erhaltungsmanagements sinnvoll erscheinen. Autonome DZ, die eigenständig Entscheidungen treffen oder Erhaltungsmaßnahmen automatisch auslösen, wurden derzeit nicht realistisch eingeschätzt. Die derzeitige Lösung sei somit primär als Anwendung auf struktureller Ebene zu verstehen. Gleichzeitig wurde festgehalten, dass eine direkte Ableitung für umfassende Portfolio-Lösungen, Netzbewertungen oder strategische Entwicklungslinien aktuell noch nicht klar gegeben ist. Eine Weiterentwicklung der Methodik auf Portfolio-Ebene wurde jedoch als sehr interessant eingestuft, wenngleich hierfür wesentliche zusätzliche Anstrengungen erforderlich wären und dieser Schritt nicht als Zielsetzung des Projektes definiert war. Als möglicher Entwicklungspfad wurde eine modulare Anwendung genannt, in der einzelne Bauwerke als „Stützstellen“ und Informationspunkte für besonders relevante oder repräsentative Strukturen dienen könnten.

In Ergänzung dazu wies die Vertretung darauf hin, dass die Digitalisierung im Erhaltungsmanagement zunehmend auch in Verbindung mit Monitoring-Systemen zu betrachten ist, wie sie beispielsweise bei Referenzbauwerken eingesetzt werden. In diesem Verständnis kann das vorliegende Tool als Erweiterung dienen, indem Monitoringdaten, Bauwerksinformationen und Variantenbewertungen in einer strukturierten Form zusammengeführt und für künftige Entscheidungen nutzbar gemacht werden.

Zusätzlich wurde unter anderem angemerkt, dass beim AwF 4 „Rückbau“ die Ergänzung weiterer Indikatorgruppen wie „Lebenszykluskosten/Rückbaukosten“ sowie das Schutzgut „Mensch“ sinnvoll sein könnten. Gleichzeitig wurde jedoch festgestellt, dass diese

Rückmeldung sehr spät im Projektverlauf erfolgt und daher voraussichtlich nicht mehr vollständig umgesetzt werden kann. Im Zusammenhang mit dem AwF 2 „Instandsetzung“ (A/CH) wurde kritisch angemerkt, dass die Nutzung sehr unterschiedlicher Indikatoren nicht in jedem Fall sinnvoll erscheine und dass auch bei Instandsetzungsmaßnahmen die Zuverlässigkeit als Bewertungskriterium berücksichtigt werden sollte. Eine nachträgliche Erweiterung des Indikatorensatzes wurde jedoch als kritisch bewertet, da dies zusätzliche Entwicklungs- und Abstimmungsunterstützung erfordern würde. Diskutiert wurde außerdem die Überschneidung der Indikatoren „Reisezeitverlust“ und „Kosten aufgrund Zeitverluste“, da beide Indikatoren ähnliche Wirkungen adressieren und eine klare Abgrenzung erforderlich erscheint. Ergänzend wurde der Wunsch geäußert, den Reisezeitverlust auch in den Anwendungsfällen AwF 2 und AwF 3 stärker zu berücksichtigen, da die Verfügbarkeit von Infrastruktur besonders bei Bestandsmaßnahmen eine wesentliche Rolle spielt, auch wenn eine Umsetzung aufgrund der Datenlage möglicherweise nur eingeschränkt möglich ist.

Neben inhaltlichen Punkten wurden auch organisatorische und technische Fragen adressiert. Die Bereitstellung der Quellcodes für die prototypische Software wurde grundsätzlich als unproblematisch eingeschätzt, da das entsprechende Repository zur Verfügung gestellt werden kann. Der Stand zum Implementierungsleitfaden und zur Installationsanleitung wurde als laufende Aufgabe bewertet, mit der Absicht, diese Inhalte im Anhang des Schlussberichtes zu integrieren.

8 Schlussbetrachtung

8.1 Zusammenfassung

Nachhaltigkeitsanalysen entstanden in den 1970er und 1980er Jahren im Zuge der zunehmend wichtiger werdenden Umweltdebatten. Der Brundtland-Bericht aus dem Jahr 1987 lieferte die bis heute gültige Definition der nachhaltigen Entwicklung mit Fokus auf intra- und intergenerationelle Gerechtigkeit. Dieses Leitbild wurde sukzessive durch politische und private Initiativen und Programme wie die Agenda 21 weiterentwickelt.

Im Bauwesen führten diese übergeordneten Entwicklungen zu Systemen der Nachhaltigkeitsbewertung, die bauspezifische Indikatoren nutzen. Normative Grundlagen dafür finden sich in internationalen (ISO) und europäischen (CEN) Normen. In Deutschland treiben die Bundesanstalt für Straßen- und Verkehrswesen (BASt) und die Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen (DGNB), in der Schweiz das Bundesamt für Straßen (ASTRA) mit dem Instrument NISTRA und in Österreich verschiedene Organisationen wie das Austrian Sustainability Council und der Österreichische Betonverein diese Ansätze voran. Diese Aktivitäten unterstützen die Umsetzung des European Green Deal, der als übergeordnete politische Vorgabe angesehen werden kann, sinngemäß auch für die Schweiz.

Die bisher etablierten Bewertungsansätze konzentrieren sich überwiegend auf die Planungs- und Ausführungsphasen von Bauwerken. Für die Nutzungs- und Rückbauphasen fehlen hingegen häufig geeignete Methoden sowie belastbare und kontinuierlich verfügbare Daten. Neue Methoden und Technologien, insbesondere DZ, eröffnen hier die Möglichkeit, diese Defizite zu adressieren und Nachhaltigkeitsbewertungen über den gesamten Lebenszyklus hinweg zu ermöglichen. Dadurch können insbesondere betriebliche Entscheidungen fundierter vorbereitet und optimiert werden.

Vor diesem Hintergrund wurde im Projekt zunächst eine systematische Grundlage für die Entwicklung DZ im Kontext von Infrastruktur sowie der Nachhaltigkeitsanalyse und -bewertung erarbeitet. Darauf aufbauend wurden vier Anwendungsfälle für die Betriebsphase definiert: Betriebsaufgaben, Instandhaltung, Lebensdauerverlängerung und Rückbau. Für die Bewertung wurden geeignete Nachhaltigkeitsindikatoren zusammengestellt und in Form von Steckbriefen mit Angaben zu erforderlichen Eingangsdaten, Berechnungsansätzen und Ergebnissen beschrieben. Auf Basis einer modularen Systemarchitektur wurden DZ entwickelt und in Demonstratoren an drei typisierten Brücken für unterschiedliche Anwendungsfälle umgesetzt. Zur fachlichen Evaluation fanden Workshops im deutschsprachigen Raum statt, in

denen die DZ-gestützten Nachhaltigkeitsanalysen anhand der Demonstratoren vorgestellt und Rückmeldungen von Fachexperten eingeholt wurden.

Im Zuge der Demonstratorentwicklung zeigte sich, dass die Bereitstellung geeigneter Eingangsdaten eine zentrale Herausforderung bei der Anwendung von Nachhaltigkeitsbewertungsmethoden darstellt. Die Datenqualität ist dabei stark vom Bewertungszeitpunkt abhängig und sollte als integraler Bestandteil der jeweiligen Methode transparent dokumentiert werden. Die Datenbereitstellung und -verarbeitung wurden im Projekt mittels eines Linked-Data-Ansatzes umgesetzt und im DZ als eigenständige, projektspezifische Informationsquelle abgebildet.

Insgesamt zeigt das Projekt, wie ein DZ-Ansatz genutzt werden kann, um Nachhaltigkeitsanalysen von Ingenieurbauwerken, insbesondere in der Nutzungsphase, systematischer, aktueller und nachvollziehbarer zu gestalten. Die strukturierte Verknüpfung vorhandener Bauwerksdaten mit Prozess-, Kosten- und Umweltdaten schafft eine belastbare Grundlage für die vergleichende Bewertung von Maßnahmenvarianten, die Dokumentation realisierter Maßnahmen sowie die Begründung von Entscheidungen mit relevanten Nachhaltigkeitswirkungen. Gleichzeitig wird deutlich, dass Datenqualität und Datenverfügbarkeit entscheidende Erfolgsfaktoren sind.

8.2 Wesentliche Erkenntnisse

Die folgenden Erkenntnisse basieren auf den entwickelten Demonstratoren mit drei Bauwerken und Maßnahmen zu vier Anwendungsfällen in der Betriebsphase sowie auf der fachlichen Evaluation und den Rückmeldungen von Ingenieurexperten aus begleitenden Workshops. Eine zentrale Erkenntnis des Projekts ist der hohe Mehrwert des entwickelten Ansatzes für Variantenstudien in der Erhaltungsplanung. Durch die strukturierte Abbildung unterschiedlicher Maßnahmenoptionen und Systemgrenzen können Nachhaltigkeitswirkungen gezielt gegenübergestellt werden. Dies erleichtert fundierte Entscheidungen im Bestand, insbesondere in Situationen, in denen mehrere technisch mögliche, jedoch unterschiedlich nachhaltige Handlungsoptionen zur Verfügung stehen.

Darüber hinaus entsteht durch die systematische Zusammenführung von Bauwerksdaten, Annahmen, Bewertungsparametern und Ergebnissen eine wertvolle Daten- und Wissensbasis. Diese geht über die konkrete Bewertungssituation hinaus und kann bei zukünftigen Eingriffen als Referenz herangezogen werden. Damit wird nicht nur der Entscheidungsprozess zum jeweiligen Zeitpunkt unterstützt, sondern auch eine langfristige Nachvollziehbarkeit von Maßnahmen und deren Begründung ermöglicht. Ein weiterer

wesentlicher Vorteil liegt in der schnellen Aktualisierbarkeit der Bewertungen. Neue Materialien, Bauverfahren oder Technik können ohne grundlegende Modelländerungen integriert werden. Dadurch bleibt der Ansatz anschlussfähig an technische Innovationen und kann mit vergleichsweise geringem Aufwand an neue Rahmenbedingungen angepasst werden, was seine Praxistauglichkeit und Zukunftsfähigkeit erhöht.

Obwohl der Ansatz auf der Ebene einzelner Bauwerke ansetzt, liefern die Ergebnisse übertragbare, entscheidungsunterstützende Informationen für Betreiber und Erhaltungsverantwortliche. Diese Informationen können perspektivisch in übergeordnete Betrachtungen eingebunden und für eine portfoliobasierte Bewertung genutzt werden, ohne dass bereits im Projekt eine vollständige Portfolio-Logik umgesetzt werden muss. Hinzu kommt das im Projekt geschärfte Verständnis der Rolle von DZ im Erhaltungsmanagement in der Infrastruktur. Sie werden nicht als autonome, selbstentscheidende Systeme verstanden, sondern als realistische, deskriptive und entscheidungsunterstützende Werkzeuge. Dieses Zielbild ist technisch umsetzbar, organisatorisch anschlussfähig und entspricht den aktuellen Anforderungen der Praxis. Schließlich zeigt sich eine gute Anschlussfähigkeit des Ansatzes an Monitoring und datenbasierte Betriebsführung. Bauwerksdaten, Zustandsinformationen aus dem Monitoring und Variantenbewertungen können in einem gemeinsamen Modell zusammengeführt werden. Damit eröffnet sich die Möglichkeit, bestehende Erhaltungsstrategien schrittweise, um nachhaltigkeitsbezogene und datengetriebene Komponenten zu erweitern.

8.3 Ausblick und Handlungsempfehlungen

Die im Projekt gewonnenen Erkenntnisse verdeutlichen, dass der Einsatz von DZ für die Nachhaltigkeitsbewertung im Erhaltungsmanagement von Ingenieurbauwerken grundsätzlich umsetzbar ist, zugleich jedoch gezielte Weiterentwicklungen auf organisatorischer, methodischer und technischer Ebene erfordert. Entscheidend ist dabei eine schrittweise Einführung, die sich an den bestehenden Strukturen des Erhaltungsmanagements orientiert und den DZ als unterstützendes Instrument im laufenden Betrieb verankert.

Die aus dem Forschungsprojekt abgeleiteten Handlungsempfehlungen lassen sich in die drei Bereiche Organisation, Prozesse und Technologie gliedern. Auf organisatorischer Ebene empfiehlt sich, frühzeitig Pilot- und Implementierungsprojekte in unterschiedlichen Organisationen zu initiieren, die Verantwortung für Planung, Betrieb und Erhaltung von Brücken tragen. Solche Pilotprojekte ermöglichen es, praktische Erfahrungen zu sammeln und den Mehrwert DZ unter realen Randbedingungen zu überprüfen. Bereits vor Beginn von

Pilotprojekten sollten zudem Mindestanforderungen an Modellqualität, Datenverfügbarkeit, Schnittstellen und Zuständigkeiten definiert werden, um Vergleichbarkeit und Skalierbarkeit sicherzustellen. Der dabei entstehende Erfahrungsgewinn sollte ausgewertet und zwischen den beteiligten Akteuren ausgetauscht werden, etwa im Rahmen bestehender Arbeitskreise oder Fachgremien. Im Hinblick auf einen nachhaltigen Betrieb des Ingenieurbauwerks unterstützend mit DZ ist die klare Festlegung von Rollen und Verantwortlichkeiten, insbesondere bei der Datenerfassung, -prüfung, -freigabe und -aktualisierung. Ergänzend ist der gezielte Aufbau von Akzeptanz und fachlichen Kompetenzen notwendig, etwa durch Schulungsangebote, interne Ansprechpersonen und iterative Einführungsstrategien.

Auf prozessualer Ebene ist eine konsequente Einbindung von DZ in bestehende Planungs-, Betriebs- und Erhaltungsprozesse erforderlich. Anwendungsfälle sollten sich an etablierten Abläufen der Infrastrukturbetreiber orientieren und diese gezielt um Nachhaltigkeitsaspekte ergänzen, anstatt neue Parallelprozesse zu schaffen. Die Auswahl der Nachhaltigkeitsindikatoren ist dabei an den jeweiligen Entscheidungsanlässen auszurichten, da nicht für jede Fragestellung der gleiche Indikatorensatz erforderlich ist. Für den Betrieb von DZ-gestützten Nachhaltigkeitsbewertungen müssen zudem ausreichende personelle und finanzielle Ressourcen eingeplant werden, da die Aktualisierung von Daten und die Fortschreibung von Bewertungen kontinuierlichen Aufwand erfordern. Eine klare Verortung der Anwendungsfälle entlang des Lebenszyklus von Ingenieurbauwerken trägt dazu bei, den DZ zu definierten Zeitpunkten gezielt für Entscheidungsprozesse zu nutzen. Einheitlich festgelegte Systemgrenzen sind dabei eine wesentliche Voraussetzung, um Variantenstudien vergleichen und perspektivisch auch Auswertungen auf Portfolioebene durchführen zu können.

Technologisch empfiehlt sich ein modularer und dezentraler Ansatz für die Umsetzung DZ, der technologieoffen gestaltet ist und sowohl unterschiedliche Software als auch verschiedene Bewertungsmethoden integrieren kann. Besonders geeignet sind Konzepte auf Basis von Linked Data und Ontologien, da sie die semantische Verknüpfung heterogener Datenquellen ermöglichen, ohne eine zentrale Datenhaltung vorauszusetzen. Im Projekt wurde hierfür die GrIT-Ontologie entwickelt, die als semantischer Layer zwischen Modellen, Maßnahmen, Indikatoren und zeitlichen Bezügen fungiert und eine flexible Konfiguration der DZ unterstützt. Eine modulare Systemarchitektur erlaubt den Einsatz verteilter Systeme und Services und erleichtert die Anbindung externer Datenquellen, etwa zu Umweltkennwerten oder Kosteninformationen.

Zur Unterstützung des Transfers in die Praxis wurde im Projekt ein Positionspapier erarbeitet, das die hier dargestellten Handlungsempfehlungen vertieft und in einen übergeordneten fachlichen und strategischen Kontext einordnet. Darin werden insbesondere Anforderungen, Potenziale und Herausforderungen für die Entwicklung und den Einsatz von DZ in der Nachhaltigkeitsbewertung von Ingenieurbauwerken beschrieben. Das Positionspapier dient damit als ergänzende Orientierung für Entscheidungsträger, Betreiber und Fachakteure, die den Ansatz weiterentwickeln oder in eigenen Organisationen erproben möchten.

9 Anhang

9.1 Steckbriefe der Indikatoren

Tabelle 12. Übersicht Nachhaltigkeitsindikatoren als Basis für die Umsetzung in DZ

Qualität Nachhaltigkeit	Indikatorengruppe	Indikator	Einheit
1 Ökologische Qualität	1.1 Kreislaufwirtschaft / Ressourcen	1.1.1 Materialität des Bauwerks	Masse-%
		1.1.2 Monetärer Materialwert	EUR
		1.1.3 Schad- u. Risikostoffe	kg
		1.1.4 Demontagefähigkeit	qualitativ und Masse-%
		1.1.5 Materialverwertung – Potentiale Kreislauffähigkeit	qualitativ und Masse-%
	1.2 Risiken für die lokale Umwelt	Fläche des ökologisch gestörten Lebensraums durch Lärmbeeinträchtigung der Fauna	m ²
	1.3 Flächeninanspruchnahme	Flächeninanspruchnahme Bauwerk (dauerhaft) und Bauprozesse (vorübergehend)	gewichtete m ²
	1.4 Externe Umwelteffekte	Verkehrsbedingte Emissionen infolge betrieblicher und baubedingter Verkehrsbeeinträchtigungen (CO ₂ , NO _x , PM _{2.5} , PM ₅ , PM ₁₀)	Massen Schadstoffe
	1.5 Ökobilanz	1.5.1 Globales Erwärmungspotential (GWP)	kg CO ₂ -Äquiv.
		1.5.2 Eutrophierungspotential (EP)	kg PO ₄ ³⁻ -Äquiv.
		1.5.3 Ozonschichtabbaupotential (ODP)	Kg R11-Äquiv.
		1.5.4 Versauerungspotential (AP)	kg SO ₂ -Äquiv.
		1.5.5 Ozonbildungspotential (POCP)	kg C ₂ H ₄ -Äquiv.
		1.5.6 Kumulierter Energieaufwand (KEA)	MJ
2 Ökonomische Qualität	2.1 Bauwerks-bezogene Lebenszykluskosten	Materialkosten, prozessbezogene Kosten	EUR
	2.2 Externe Kosten (monetarisierte externe Effekte)	Kosten aufgrund von Zeitverlusten, Umleitungen und erhöhten Fahrzeugbetriebskosten	EUR
3 Sozio-kulturelle und funktionale Qualität	3.1 Schutzgut Mensch	3.1.1 Lärmbeeinträchtigung von Menschen	dB / pax
		3.1.2 Arbeitssicherheit	Anzahl
	3.2 Verfügbarkeit	Reisezeitverlust	h
4 Technische Qualität	4.1 Zuverlässigkeit	Zuverlässigkeitsindex	–

9.1.1 Materialität des Bauwerks

GreenInfraTwins	Ökologische Qualität		
Indikatorengruppe	Kreislaufwirtschaft / Ressourcen	Nummer	1.1.1
Ermittlungsart	Berechnung	Einheit	Masse in kg und Masse-%
Zielsetzung	Datenspeicherung und Datenaufbereitung in Bezug auf die verbauten Materialien als Grundlage für den Nachweis der Materialherkunft und zur Bestimmung von Nachnutzungswegen. Der Indikator trägt zur quantitativen, aggregierten Zirkularitätsbewertung bei.		
Beschreibung	Der Indikator „Materialität des Bauwerks“ klassifiziert alle im Bauwerk eingebrachten Materialien in vordefinierte Klassen. Es werden die absoluten und relativen Massen der verbauten Materialien ausgewiesen. Diese sind Grundlage für die Berechnung weiterer Indikatoren wie dem monetären Materialwert.		
Methodisches Vorgehen	Die Volumina der verschiedenen Bauteile werden soweit möglich auf Basis der 3D-Geometrie für alle enthaltenen Materialien berechnet. Dafür müssen entweder die Materialvolumina direkt aus der 3D-Geometrie abgeleitet werden können oder mit Hilfe von geometrischen und alphanumerischen Informationen berechnet werden können. Die Volumina werden im Anschluss unter Berücksichtigung der verschiedenen Materialdichten in Massen umgerechnet. Bei Bauprodukten können die Massen entweder in den alphanumerischen Informationen des IFC-Modells hinterlegt sein oder über eine externe Datei mit den Masseninformationen mit den Modellelementen verknüpft werden. Für die Klassifizierung zu verwendende Klassen werden im Vorfeld eindeutig festgelegt. Die jeweilige Klassenzuordnung ist in den alphanumerischen Informationen des BIM-Modells zu hinterlegen.		
Bewertung / Berechnung	Die Berechnung der Materialvolumina unterscheidet sich abhängig von dem vorhandenen LOG (Level of Geometry) und dem bauteilspezifischen Modellierungsparadigma. Die ermittelten Materialvolumina werden mit der jeweiligen materialspezifischen Dichte multipliziert, so dass das absolute Gewicht der in den einzelnen Bauteilen verbauten Materialien ermittelt werden kann. Die Materialien werden zusätzlich in relativen Anteilen ausgewiesen. Dazu wird das Gewicht aller Materialien einer Materialklasse durch das Gesamtbauwerksgewicht dividiert. Die Berechnung erfolgt in Anlehnung an die entsprechenden Berechnungsvorschriften der DGNB für den Gebäuderessourcenpass. Als Materialklassen wird eine angepasste Klasseneinteilung der DGNB verwendet: • Mineralische Baustoffe • Metalle • Kunststoffe • Bituminöse Mischungen • Holz und Holzwerkstoffe • Elektrik und Elektronik • Materialmix		
Eingangsdaten	• IFC-Modell mit bauteilbezogenen Volumina und für die materialspezifische Volumenberechnung erforderlichen alphanumerischen Informationen • Zu verwendende Material-Klassifizierungstabelle • Dichten der Materialien		
Output Daten	• Liste des absoluten Gewichts der Materialklassen in kg • Liste der relativen Anteile der Materialklassen am Gesamtgewicht der verbauten Materialien in Masse-%		
Ergänzende Kommentare / Hinweise	Der Indikator kann nach Baufertigstellung erstmalig berechnet werden und wird nach der Durchführung von Erneuerungsmaßnahmen auf Basis der selektiv Rückgebauten und in das Bauwerk neu eingebrachten Materialien neu berechnet. Der Indikator ist ein Bestandteil des Bauwerksressourcenpasses.		

9.1.2 Monetärer Materialwert

GreenInfraTwins	Ökologische Qualität		
Indikatorengruppe	Kreislaufwirtschaft / Ressourcen	Nummer	1.1.2
Ermittlungsart	Berechnung	Einheit	EUR
Zielsetzung	Ausweisen des monetären Materialwerts zu einem spezifischen Stichtag, um die im Bauwerk gebundenen Werte in Geldeinheiten zu quantifizieren. Auf diese Weise wird die Nachnutzungsfähigkeit auf Materialbasis bewertet und die im Bauwerk gebundenen Ressourcen transparent dargestellt.		
Beschreibung	Bei der Indikatorenberechnung wird davon ausgegangen, dass ein vollständiger Rückbau des Bauwerks erfolgt. Für diesen Fall wird bestimmt, welchen (zukünftigen) Wert die im Bauwerk enthaltenen Materialien besitzen. Der Bezug auf einen Stichtag ist erforderlich, um Marktentwicklungen einzubeziehen und die Aussagekraft des Indikators zu steigern. Grundsätzlich ist bei einer zukünftig zunehmenden Knappheit von Baumaterialien davon auszugehen, dass der monetäre Materialwert sukzessive steigt.		
Methodisches Vorgehen	Aufbauend auf der Massenermittlung wird eine materialbezogene Monetarisierung durchgeführt. Das Ergebnis wird in Euro ausgewiesen. Kosten für Rückbau- und Aufbereitungsprozesse werden in die Kostenermittlung einbezogen. Der Indikator verwendet den Prozess der Monetarisierung, bei dem die Ergebnisse vollständig in Geldeinheiten ausgewiesen werden. Die Ermittlung der materialabhängigen Marktwerte erfolgt auf Basis von Datenbanken, Erfahrungswerten oder Vorgaben. Für verschiedene Materialien können unterschiedliche Verwertungswege (z.B. Einschmelzen, Aufbereitung und Wiedereinbau oder thermische Verwertung) Märkte (z.B. global, national oder regional) vorliegen. Während für Stähle Schrottpreise tagesaktuell von den Stahlherstellern veröffentlicht werden, werden mineralische Baustoffe i.d.R. auf lokalen Märkten gehandelt. Solange keine einheitlichen Datenquellen zur Verfügung stehen, ist auf vereinfachte Annahmen und Erfahrungswerte zurückzugreifen, um den Berechnungsaufwand zu reduzieren. Die verwendeten Datenquellen und der Stichtag der Wertermittlung sind für die Nachvollziehbarkeit der Ergebnisse zu dokumentieren. Liegen Marktpreise für unterschiedliche Materialien zu unterschiedlichen Stichtagen vor, sind diese über Dis- und Askontierung auf einen einheitlichen Stichtag umzurechnen. Die Marktpreise können in regelmäßigen Abständen aktualisiert werden.		
Bewertung / Berechnung	Für alle einzelnen Materialgruppen werden zunächst die im Bauwerk verbauten Massen berechnet, analog zum Indikator Materialität des Bauwerks. Von diesem Materialwerten der noch im Bauwerk gebundenen Materialien sind alle Kosten für folgende Prozesse abzuziehen: • Prozesse des Rückbaus (Arbeitszeit und Geräte) • Transportkosten vom Brückenstandort zum Standort der Materialverarbeitung • Kosten für die Materialverarbeitung als Voraussetzung für den Materialeinsatz in einem nächsten Lebenszyklus Die Berechnung erfolgt für die im Indikator „Materialität des Bauwerks“ definierten Materialklassen, um den Berechnungsaufwand zu minimieren. Auf eine einheitliche Klasseneinteilung beider Indikatoren soll geachtet werden. Für das Gesamtergebnis werden alle Ergebnisse der einzelnen Materialklassen (nach Abzug der der Kosten für die Folgeprozesse) aufaddiert.		
Eingangsdaten	• IFC-Modell mit bauteilbezogenen Volumina und für die materialspezifische Volumenberechnung erforderlichen alphanumerischen Informationen • Dichte der Materialien • Zu verwendende Material-Klassifizierungstabelle • Übersicht mit Marktpreisen für rückgebaute Materialien und Angabe der Quellen sowie Bezugszeitpunkte, auf deren Basis die Preisermittlung stattgefunden hat		

Output Daten	• Liste der Materialwerte pro Materialkategorie • Gesamtwert der Materialwerte • Bei Bedarf visuelle Darstellung der Höhe der monetären Materialwerte pro Bauteil durch Einfärbung der Modellelemente des 3D-Modells
Ergänzende Kommentare / Hinweise	Der Indikator kann nach Baufertigstellung erstmalig berechnet werden und sollte in spezifizierten Zeiträumen (z.B. alle 5 Jahre) an die aktuellen Material-Marktpreise angepasst werden. Der Indikator ist ein Bestandteil des Bauwerksressourcenpasses.

9.1.3 Schad- und Risikostoffe

GreenInfraTwins	Ökologische Qualität		
Indikatorengruppe	Kreislaufwirtschaft / Ressourcen	Nummer	1.1.3
Ermittlungsart	Kennzeichnung und Berechnung	Einheit	Masse in kg
Zielsetzung	Ausweisen der Masse und des Ortes von im Bauwerk vorhandenen Schad- und Risikostoffen als Basis für die Planung von selektiven Rückbauprozessen und dem Rückbauprozess des Gesamtbauwerks. Bei einem Auf- bzw. Abbruch und einer ggf. erforderlichen Zwischenlagerung soll es zu keiner Vermischung von umweltrelevanten Stoffen mit unbelastetem Material kommen.		
Beschreibung	Schad- und Risikostoffe in Bauwerken erschweren bzw. verhindern die Verwendung von Materialien in weiterführenden Kreisläufen. Für alle Neubau- und Erneuerungsmaßnahmen sowie Maßnahmen der Bauwerkserhaltung der Verkehrsinfrastruktur werden kritische bzw. gefährliche Stoffe und Materialien identifiziert und ihre Auswirkung auf die Umwelt ermittelt. Vor allem bei älteren Bestandsbauwerken können Schad- und Risikostoffe im Bauwerk vorhanden sein (z.B. Blei in den Schutzbeschichtungen). Die Feststellung des Vorliegens erfolgt i.d.R. über ein Schadstoffgutachten. Darüber hinaus können Schad- und Risikostoffe in der Nutzungsphase eingetragen werden. Zu nennen sind hier insbesondere der Chlorideintrag in Kappen sowie die Verschmutzung von Wiederlagern und Trägern mit Taubenkot.		
Methodisches Vorgehen	Anhand eines Schad- und Risikostoffkatalogs ist eine Überprüfung des Vorhandenseins dieser Stoffe in den einzelnen Bauteilen bzw. den zu Grunde liegenden Materialien zu überprüfen. Einzubeziehen sind dabei die Stoffe, die im Zuge von allen Baumaßnahmen (Neubau, Ersatzneubau, Baumaßnahmen in der Nutzungsphase) eingebaut oder rückgebaut werden. Eine wichtige Rolle übernimmt die Erfassung von Bestandsbauwerken, in denen Schad- und Risikostoffe verbaut sind. Festgestellte Schad- und Risikostoffe können im 3D-Modell als alphanumerische Informationen hinterlegt oder mit den Modellelementen verknüpft werden. Mögliche, in der Nutzungsphase eingetragene Schad- und Risikostoffe werden im Zuge der Bauwerksprüfungen visuell erfasst oder über Bauwerksprüfungen festgestellt. Die Ergebnisse werden als alphanumerische Informationen in den Bauteilen hinterlegt oder mit den Bauteilen verknüpft.		
Bewertung / Berechnung	Dieser Indikator bewertet einzelne Bauteile bezüglich des Vorhandenseins von Schad- und Risikostoffen sowie der Art der vorliegenden Risikostoffen in den betroffenen Bauteilen. Auf der Basis der vorgenommenen Klassifikation kann die Masse der Materialien in kg berechnet werden, die zum einen überprüft wurden und in denen ggf. Schad- oder Risikostoffe enthalten sind. Bei Bedarf kann aus den Ergebnissen eine Qualitätsstufe ermittelt werden. Die Qualitätsstufe zwischen 1 und 4 gibt an, wie viel Prozent der verbauten Materialien auf ein Vorhandensein von Schad- und Risikostoffen überprüft wurden. Bei der Qualitätsstufe 1 liegt eine Eigenerklärung des Bauwerksbetreibers vor, in den weiteren Qualitätsstufen (QS) ist jeweils ein unterschiedlicher Anteil der Bauteilmassen überprüft worden (QS2 mind. 50% der Massen, QS 3 mind. 80% der Massen, QS 4 100% der Massen).		
Eingangsdaten	• IFC-Modell mit bauteilbezogenen Volumina und für die Identifikation von Schad- und Risikostoffen geeigneten alphanumerischen Informationen (Vorhandensein Schad- und Risikostoffe sowie Art des Stoffes) • Dichte der Materialien • Liste mit den Arten von Schad- und Risikostoffen • Ggf. Schadstoffgutachten von Bestandsbauwerken		
Output Daten	• Liste der Bauteile, für die eine Überprüfung stattgefunden hat • Liste der Bauteile, in denen Schad- und Risikostoffe verortet wurden (inkl. Art des Stoffes) • In den Bauteilen verbaute Masse an Material • Ggf. ermittelte Qualitätsstufe (QS 1 bis 4)		

	Ggf. farbliche Kennzeichnung des betroffenen Bauteils und Angabe der Art des Schad- bzw. Risikostoffes
Ergänzende Kommentare / Hinweise	Der Indikator Schad- und Risikostoffe bildet eine Grundlage für die Kreislaufwirtschaft, beschreibt gleichzeitig aber auch Risiken für die lokale Umwelt. In einigen Indikatorensystemen wird er daher auch in anderen Indikatorengruppen eingesetzt. Beispiele für Risiko- und Schadstoffe sind: - Asbest in Kunststeinen - PCB (polychlorierte Biphenyle) in Dichtmassen - Biozide in vorbehandelten Holzbauteilen - Blei in Korrosionsschutzbeschichtungen - Teer in Fahrbahnen - Weichmacher in Abdichtungsbahnen - Taubenkot an zugänglichen Stellen - Chloridbelastete Betone im Streusalzbereich

9.1.4 Demontagefreundlichkeit

GreenInfraTwins	Ökologische Qualität		
Indikatorengruppe	Kreislaufwirtschaft / Ressourcen	Nummer	1.1.4
Ermittlungsart	Klassifizierung	Einheit	qualitativ und Masse-%
Zielsetzung	Zur Förderung der Kreislauffähigkeit sind schon in der Planungsphase Überlegungen zur Rückbaufähigkeit und damit auch zu End-of-Life-Szenarien in die Bauwerksgestaltung zu integrieren. Dabei können verschiedene Gestaltungskriterien zum Einsatz kommen (einfaches Bauen, sortenreines Bauen, Circular Engineering). Ein Baustein, diese Überlegungen in die Planungs- und Ausführungsprozesse zu integrieren ist die vorausschauende Klassifizierung der Demontagefreundlichkeit		
Beschreibung	Die Demontagefähigkeit wird durch rückbaufreundliche Konstruktionen erreicht, die sich durch eine Trennbarkeit in möglichst sortenreine Materialien auszeichnen. Diese beiden Aspekte erhöhen die Kreislauffähigkeit der eingesetzten Materialien.		
Methodisches Vorgehen	Der Indikator Demontagefreundlichkeit wird durch eine Klassifizierung aller Bauteile ermittelt. Dabei kommt eine vorab definierte Bewertungsskala zum Einsatz, mit der alle Bauteile oder Bauteilkomponenten klassifiziert werden. Es wird die folgende Skala für eine Einstufung der Demontagefähigkeit in Anlehnung an die DGNB-Vorgaben für Gebäuderessourcenpässe verwendet: • Optimiert: lose Verbindungen oder Klickverbindung, die einen sehr geringer Aufwand beim Lösen verursachen bzw. zerstörungsfrei lösbar sind • Verbessert: gesteckte bzw. geschraubte Verbindungen, welche einen geringen Aufwand zum Lösen erfordern und zerstörungsfrei lösbar sind • Standard: festverbaut Bauelemente, die mit einem mittleren Aufwand überwiegend zerstörungsfrei lösbar sind • Eingeschränkt: festverbaut Bauelemente, die schwer lösbar sind und während des Lösevorgang reparable Schäden verursachen • Problematisch: extrem aufwändiger Lösevorgang, der irreparable Schäden verursacht • Nicht bewertbar: es kann keine Klassifizierung vorgenommen werden bzw. eine Demontagemöglichkeit ist nicht gegeben		
Bewertung / Berechnung	Alle Bauteile werden hinsichtlich ihrer Demontagefreundlichkeit auf der vorgegebenen Skala klassifiziert. Bei Bedarf kann die gesamte Bauteilmasse bestimmt werden, die in die jeweiligen Klassen eingeordnet wurden. Auf diese Weise kann eine prozentuale Massenverteilung hinsichtlich der Demontagefreundlichkeit ausgewiesen werden und ein Vergleich mit weiteren Bauwerken durchgeführt werden. Gleichzeitig kann bei einer Ergebnisspeicherung verknüpft mit der 3D-Geometrie die Planung von Rückbauprozessen unterstützt werden.		
Eingangsdaten	• IFC-Modell mit bauteilbezogenen Volumina und für die materialspezifische Volumenberechnung erforderlichen alphanumerischen Informationen • Zu verwendende Material-Klassifizierungstabelle • Dichten der Materialien		
Output Daten	• Liste der Bauteile, die in die definierten Demontageklassen eingeordnet werden • In den Bauteilen verbaute Masse an Material und das Potential zur sortenreinen Trennung • Ggf. farbliche Kennzeichnung des betroffenen Bauteils hinsichtlich der spezifischen Demontagefreundlichkeit		
Ergänzende Kommentare / Hinweise	Der Indikator kann nach Baufertigstellung erstmalig berechnet werden und wird nach der Durchführung von Erneuerungsmaßnahmen auf Basis der geänderten Konstruktion neu berechnet. Der Indikator ist ein Bestandteil des Bauwerksressourcenpasses.		

9.1.5 Materialverwertung – Potentiale Kreislauffähigkeit

GreenInfraTwins	Ökologische Qualität		
Indikatorengruppe	Kreislaufwirtschaft / Ressourcen	Nummer	1.1.5
Ermittlungsart	Klassifizierung	Einheit	qualitativ und Masse-%
Zielsetzung	Beschreibung der möglichen „Nachnutzungswege“ der im Bauwerk verbauten Materialien in einem nachfolgenden Lebenszyklus. Dies ermöglicht eine lebenszyklusübergreifende Planung und die Bewertung der potenziellen Kreislauffähigkeit des Bauwerks.		
Beschreibung	Die möglichen Potentiale, die bei einer Materialverwertung am Lebenszyklusende entstehen können, werden durch diesen Indikator abgeschätzt. Dazu wird angegeben, wie viele Masse-% des Gesamtbauwerks wiederverwendet, recycelt, verwertet (z. B. durch Verbrennung) oder deponiert werden können. Die Abschätzung erfolgt auf Basis der zum Bewertungszeitpunkt vorhandenen Technologien, ein zukünftiger Bewertungszeitpunkt kann aufgrund eines technologischen Fortschritts zu abweichenden Ergebnissen führen.		
Methodisches Vorgehen	Der Indikator Materialverwertung wird durch eine Klassifizierung aller Bauteile ermittelt. Dabei kommt eine vorab definierte Bewertungsskala zum Einsatz, mit der alle Bauteile oder Bauteilkomponenten klassifiziert werden. Es wird die folgende Skala für eine Einstufung der potentiellen Kreislauffähigkeit in Anlehnung an die DGNB-Vorgaben für Gebäuderessourcenpässe verwendet: • Wiederverwendung • Werkstoffliche qualitative Wiederverwertung • Stoffliche Weiterverwertung • Thermische Verwertung • Verfüllung • Deponierung • Entsorgung als gefährlicher Abfall		
Bewertung / Berechnung	Alle in den Bauteilen enthaltenen Materialien werden hinsichtlich ihres Potenzials zur Materialverwertung am Lebenszyklusende auf der vorgegebenen Skala klassifiziert. Bei Bedarf kann die gesamte Bauteilmasse bestimmt werden, die in die jeweiligen Klassen eingeordnet wurden. Auf diese Weise kann eine prozentuale Massenverteilung hinsichtlich der Materialverwertung ausgewiesen werden und ein Vergleich mit weiteren Bauwerken durchgeführt werden. Gleichzeitig kann bei einer Ergebnisspeicherung verknüpft mit der 3D-Geometrie die Planung von Rückbauprozessen unterstützt, potenzielle Märkte für die Materialverwertung identifiziert und Transportwege minimiert werden.		
Eingangsdaten	• IFC-Modell mit bauteilbezogenen Volumina und für die materialspezifische Volumenberechnung erforderlichen alphanumerischen Informationen • Zu verwendende Material-Klassifizierungstabelle • Dichten der Materialien		
Output Daten	• Liste der Bauteile, die in die definierten Klassen der Materialverwertung eingeordnet werden • In den Bauteilen verbaute Masse an Material • Ggf. farbliche Kennzeichnung des betroffenen Bauteils hinsichtlich der spezifischen potentielle Kreislauffähigkeit		
Ergänzende Kommentare / Hinweise	Der Indikator kann nach Baufertigstellung erstmalig berechnet werden und wird nach der Durchführung von Erneuerungsmaßnahmen auf Basis der geänderten Konstruktion neu berechnet. Der Indikator ist ein Bestandteil des Bauwerksressourcenpasses.		

9.1.6 Fläche des ökologisch gestörten Lebensraums durch Lärmbeeinträchtigung der Fauna

GreenInfraTwins	Ökologische Qualität		
Indikatorengruppe	Risiken für die lokale Umwelt	Nummer	1.2
Ermittlungsart	Berechnung	Einheit	m ²
Zielsetzung	Lärmbeeinträchtigungen der Fauna durch baubedingte oder baubezogene Maschinen- und Transporttätigkeiten entstehen während der Herstellungs- und Nutzungsphase. Die Höhe der Auswirkungen kann durch die eingesetzten Maschinen und die angewendeten Prozesse beeinflusst werden.		
Beschreibung	Maßgebend sind für Deutschland die zum Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG) erlassenen Durchführungsverordnungen (BImSchV). Sofern in den Durchführungsverordnungen keine Grenzwerte für Emissionen bzw. Immissionen festgelegt sind, gelten die Werte aus den bundeseinheitlichen Verwaltungsvorschriften, wie der TA Lärm (Technische Anleitung zum Schutz gegen Lärm (BMU, 1998)).		
Methodisches Vorgehen	Die Lärmemissionen werden zunächst an den Lärmquellen bezüglich ihres Lärmpegels bestimmt. Mit einem einfachen Ausbreitungsmodell erfolgt die Ermittlung der Einwirkungspegel an verschiedenen Standorten. Diese werden mit den zulässigen Grenzwerten verglichen und darauf aufbauend die betroffene Fläche ermittelt.		
Bewertung / Berechnung	Die durch bauwerksbezogene Lärmimmissionen oberhalb der Grenzwerte beeinträchtigten Flächen werden ermittelt. Die Berechnung findet in einer dafür spezialisierten Software statt, es handelt sich daher um einen externen Dienst. Die Ergebnisse werden im digitalen Zwilling gespeichert, entweder in Form von Tabellen oder mit Attributen versehenen Geländemodellen.		
Eingangsdaten	• Lärmemissionsquellen und -pegel • Vereinfachte Topografie		
Output Daten	• Fläche, die Lärmimmissionswerte oberhalb der gesetzlichen Bestimmungen aufweist.		
Ergänzende Kommentare / Hinweise	Ein Mehrwert der Analysen entsteht, wenn verschiedene Varianten oder verschiedene Bauwerke miteinander verglichen werden.		

9.1.7 Flächeninanspruchnahme Bauwerk und Bauprozesse

GreenInfraTwins	Ökologische Qualität		
Indikatorengruppe	Flächeninanspruchnahme	Nummer	1.3
Ermittlungsart	Berechnung	Einheit	m²
Zielsetzung	Die gewichtete Flächeninanspruchnahme durch das Bauwerk selbst und die für die Herstellung und die Erneuerungsmaßnahmen erforderlichen Bauprozesse ermittelt einen Wert für die Beurteilung der Flächenversiegelung und -nutzung. Hierdurch können verschiedene Bauwerke miteinander verglichen und Bauprozesse optimiert werden.		
Beschreibung	Der Indikator hilft dabei, die Umweltauswirkungen eines Bauprojekts hinsichtlich des Flächenverbrauchs zu bewerten und zu dokumentieren. Er ist besonders relevant im Kontext der Reduzierung der Flächenversiegelung und des nachhaltigen Umgangs mit der begrenzten Ressource Boden.		
Methodisches Vorgehen	Bei der Ermittlung der vorübergehenden bzw. dauerhaften Flächeninanspruchnahme ist eine gewichtete Flächenbilanz zu erstellen. Die zur Herstellung der betrachteten Verkehrsfläche vorübergehend oder dauerhaft benötigten Flächen (Grunderwerbsplan) werden hinsichtlich ihrer Größe [m²] und ihrer Beschaffenheit, d.h. der vor Durchführung der Baumaßnahme bestehenden Nutzungsart, bewertet. Die Flächen, die vorübergehend in Anspruch genommen werden, werden in Abhängigkeit der Dauer ihrer Inanspruchnahme gewichtet. Hierbei gilt, dass der Bezugszeitraum immer 100 Jahre ist. Die Dauer der Inanspruchnahme wird folglich aus der Nutzungsdauer (in Jahren) bezogen auf Betrachtungszeitraum von 100 Jahren ermittelt und anschließend mit der Flächengröße sowie den Flächenfaktoren multipliziert. Die Berechnungsmethode lehnt sich auf dem im BAST-Dokument V361 beschriebenen Verfahren an.		
Bewertung / Berechnung	Die Berechnung der gewichteten Flächeninanspruchnahme erfolgt auf Basis der in Anspruch genommenen Fläche, dem Vornutzungsfaktor der Fläche, der Nutzungsdauer und der Versiegelungsart unter Anwendung der nachfolgenden Gleichung: $\sum_{i=1}^n A_i \cdot f_{VN,i} \cdot f_{V,i} \cdot \frac{\text{Nutzungsdauer } n}{100 \text{ Jahre}}$ mit: i = Anzahl der Teilflächen f_{VN} = Vornutzungsfaktor f_V = Versiegelungsfaktor n = Nutzungsdauer der jeweiligen Teilfläche Für die Vornutzungsfaktoren sind folgende Werte in Abhängigkeit der Vornutzungsart der jeweiligen Fläche anzusetzen: Gebäude- und Freifläche: $f_{VN} = 0,9$ Betriebsfläche: $f_{VN} = 0,5$ Erholungsfläche: $f_{VN} = 1,3$ Verkehrsfläche: $f_{VN} = 0$ Landwirtschaftsfläche: $f_{VN} = 1,5$ Waldfläche: $f_{VN} = 1,5$ Wasserfläche: $f_{VN} = 1,5$ Flächen anderer Nutzung: $f_{VN} = 1,5$ Für die Versiegelungsfaktoren sind folgende Werte in Abhängigkeit der Versiegelungsarten anzusetzen: Auflagerflächen Widerlager, Pfeiler, Treppen, etc.: $f_V = 1,0$ Lagerflächen, verdichteter Untergrund: $f_V = 0,75$ „unversiegelte Oberfläche“, Bankett, Dammbereiche, begrünte Böschungen: $f_V = 0,5$		
Eingangsdaten	- Größen der in Anspruch genommenen Fläche aus dem 3D-Modell oder weiteren Quellen - Art und Verwendung der in Anspruch genommenen Flächen		

	Dauern der Flächeninanspruchnahme
Output Daten	Bezogene Größe der Flächeninanspruchnahme innerhalb der festgelegten zeitlichen Systemgrenzen
Ergänzende Kommentare / Hinweise	

9.1.8 Verkehrsbedingte Emissionen infolge betrieblicher und baubedingter Verkehrsbeeinträchtigungen

GreenInfraTwins	Ökologische Qualität		
Indikatorengruppe	Externe Umwelteffekte	Nummer	1.4
Ermittlungsart	Berechnung	Einheit	Emissionen in kg
Zielsetzung	Ermittlung und Quantifizierung von baustelleninduzierten und verkehrsbedingten Schadstoffemissionen. Hierdurch werden nicht nur die Umweltauswirkungen aus Bauwerksebene in eine Entscheidungsfindung einbezogen (i.d.R. in Form der Ökobilanzierung), sondern auch die Umweltauswirkungen aus den Verkehrsbehinderungen.		
Beschreibung	Für eine ganzheitliche Analyse müssen die Wechselwirkungen zwischen Bauwerk und Verkehr in Form von externen Effekten in die Entscheidungsfindung mit einbezogen werden. Die externen Effekte aus dem Verkehr werden durch eine Differenzbetrachtung zwischen dem Normalbetrieb und dem Baustellenbetrieb ermittelt.		
Methodisches Vorgehen	Für die Berechnung wird ein makroskopisches, deterministisches Warteschlangenmodell eingesetzt, das auch in den Indikatorensteckbriefen der BAST in ähnlicher Form beschrieben wird. Eine Ausführliche Erläuterung der Berechnungsschritte findet sich in Zinke, 2016.		
Bewertung / Berechnung	Gemessen werden dabei verschiedene Emissionen: Kohlendioxid (CO₂) als Treibhausgas, Stickoxide (NO_x) als Luftschadstoffe sowie Feinstaub in den Größenklassen PM_{2.5}, PM₅ und PM₁₀. Durch diese Messungen können verschiedene Planungsvarianten verglichen und Maßnahmen zur Emissionsminimierung entwickelt werden, was eine ganzheitlichere Bewertung der Umweltauswirkungen ermöglicht. Die Berechnung findet in einem externen Service statt, der in einem mehrschrittigen Verfahren die Leistungsfähigkeit der jeweiligen Verkehrsführung im Baustellenbereich sowie die vorhandene Verkehrsnachfrage berechnet, wobei beide Parameter für jede Baustunde bestimmt werden. Im Anschluss werden zwei Berechnungsfälle unterschieden werden: zum einen das Herabsetzen der Grenzkapazität von Straßen durch die Einrichtung von Baustellen und zum anderen Sperrungen von Straßen, die das Fahren von Umleitungen erfordern. Der letzte Fall führt zu Mehrkilometern in Abhängigkeit der Umleitungslänge sowie der vorhandenen Verkehrsnachfrage.		
Eingangsdaten	- Dauer der zu untersuchenden Baumaßnahmen - Für die Maßnahmendauer erforderliche Verkehrsführung - Verkehrsganglinien und Fahrzeugflottenzusammensetzung repräsentativ für den Standort des Brückenbauwerks		
Output Daten	Liste mit Schadstoffemissionen aus Verkehrsbeeinträchtigungen für einzelne Baumaßnahmen		
Ergänzende Kommentare / Hinweise			

9.1.9 Globales Erwärmungspotential (GWP)

GreenInfraTwins	Ökologische Qualität		
Indikatorengruppe	Ökobilanz	Nummer	1.5.1
Ermittlungsart	Berechnung	Einheit	kg CO ₂ -Äquiv.
Zielsetzung	Berechnung der potentiellen Wirkungen von Material- und Energieströmen auf die Umweltkategorien der Ökobilanz Alternative: Quantifizierung der Emissionen [der jeweiligen Maßnahmen], die zum Klimawandel beitragen, mit dem Ziel, Varianten zu bewerten und Emissionen zu reduzieren.		
Beschreibung	Das Treibhauspotenzial (Global Warming Potential, GWP) ist der potenzielle Beitrag eines Stoffes zum Treibhauseffekt. Der Beitrag eines Stoffes wird als GWP100-Wert relativ zum Treibhauspotenzial des Stoffes Kohlendioxid (CO₂) gemittelt über einen Betrachtungszeitraum von 100 Jahren, angegeben.		
Methodisches Vorgehen	Identifizierung und Summierung aller Treibhausgasemissionen über den gesamten Lebenszyklus der Infrastruktur (z.B. Herstellung, Nutzung, Ende der Lebensdauer). Der Indikator GWP wird in [kg CO₂-Äquivalente] angegeben und die Berechnung erfolgt auf Basis von vorbilanzierten und tabellarisch aufbereiteten Werten der Umweltwirkung bezogen auf eine funktionelle Einheit, die i.d.R. auf das Materialvolumen bezogen ist. Die Werte werden in Datenbanken wie der ökobau.dat oder in Umweltproduktdeklarationen (Environmental Product Declarations – EPD) für verschiedene zeitliche Systemgrenzen (z.B. Materialherstellung, Transport, zeitliche Module der Nutzungsphase, Rückbauprozesse) bereitgestellt. Die EN 15978 legt das Vorgehen fest.		
Bewertung / Berechnung	Die Bewertung erfolgt in Form einer vereinfachten Ökobilanz, indem die Baustoffmengen der Massenermittlung mit Datensätzen der jeweils aktuellen Version der Datenbank "Ökobau.dat" verknüpft werden. Es wird folgende allgemeingültige Berechnungsformel verwendet: $GWP = M \cdot \sum_{P_1}^{P_n} GWP_{total}$		
Eingangsdaten	M: EPD-bezogene Menge des Materials [m², m³, kg] P₁, P_n: jeweilige Lebensphase (A1-3, B1-8, C1-4, D) einer Tätigkeit GWP_{total}: Gesamtes globales Erwärmungspotenzial [kg CO₂ Äqv. / m³] - BIM-Modelle mit entsprechenden Eigenschaften in relevanten Property Sets: Mengen und Materialtypen - Angaben / Deklaration zu Materialien aus Datenbanken, wie ökobau.dat (EPD - Environmental Product Declaration)		

	- Evtl. Angaben zu Transportdistanzen und Energieverbrauch von Materialien und Emissionen aus Verarbeitungsschritten
Output Daten	- Gesamtes Treibhauspotenzial in kg CO₂ Äqv - Aufschlüsselung nach Lebenszyklusphasen - Verortung/ Darstellung von Hotspots
Ergänzende Kommentare / Hinweise	Im DGNB-System erfolgt ein Vergleich mit Referenzwerten und Benchmarks. Besonders bedeutsam für Klimaschutzziele sind EU-Taxonomie und nationale Polit-Vorgaben.

9.1.10 Eutrophierungspotential (EP)

GreenInfraTwins	Ökologische Qualität		
Indikatorengruppe	Ökobilanz	Nummer	1.5.2
Ermittlungsart	Berechnung	Einheit	kg PO ₄ ³⁻ -eq
Zielsetzung	Reduzierung von Nährstoffemissionen, die zur Überdüngung von Gewässern und Böden führen.		
Beschreibung	Erfasst Stickstoff- und Phosphorverbindungen, die in Gewässern zu übermäßigem Algenwachstum und Sauerstoffmangel führen können.		
Methodisches Vorgehen	Erfassung aller eutrophierenden Substanzen über den Lebenszyklus gemäß EN 15978, insbesondere aus Abwasser, Düngemitteln und Verbrennungsprozessen.		
Bewertung / Berechnung	Die Emissionen werden in Phosphat-Äquivalente (kg PO ₄ ³⁻ -eq) umgerechnet. Die Bewertung erfolgt nach der CML-Methode unter Berücksichtigung der Nährstoffwirkung.		
Eingangsdaten	• Stickoxide aus Verbrennungsprozessen • Phosphor- und Stickstoffverbindungen aus Materialherstellung • Abwasserdaten während Nutzungsphase • Charakterisierungsfaktoren für verschiedene Nährstoffe		
Output Daten	• Gesamtes Eutrophierungspotenzial in kg PO₄³⁻-eq • Aufschlüsselung nach Emissionsquellen • Anteil der verschiedenen Nährstoffgruppen		
Ergänzende Kommentare / Hinweise	Differenzierung zwischen aquatischer und terrestrischer Eutrophierung ist in neueren Methodenversionen möglich. Besonders wichtig für Infrastrukturen mit Regenwassermanagement (z.B. Regenwasserableitung)		

9.1.11 Ozonschichtabbaupotential (ODP)

GreenInfraTwins	Ökologische Qualität		
Indikatorengruppe	Ökobilanz	Nummer	1.5.3
Ermittlungsart	Berechnung	Einheit	kg CFC-11-eq
Zielsetzung	Minimierung von Substanzen, die zur Zerstörung der Ozonschicht in der Stratosphäre beitragen.		
Beschreibung	Erfasst Emissionen, die zum Abbau der Ozonschicht führen, insbesondere halogenierte Kohlenwasserstoffe wie FCKW und HFCKW.		
Methodisches Vorgehen	Erfassung aller ozonabbauenden Substanzen über den Lebenszyklus, insbesondere aus Kühlmitteln und bestimmten Prozessemissionen.		
Bewertung / Berechnung	Die Emissionen werden mittels Charakterisierungsfaktoren in FCKW-11-Äquivalente umgerechnet (kg CFC-11-eq). Bewertet wird laut CML-Methode (Centrum voor Milieukunde Leiden).		
Eingangsdaten	• Mengen an verwendeten Kühlmitteln • Herstellungsprozessdaten für Materialien • Emissionsfaktoren aus Ökobilanzdatenbanken		
Output Daten	• Gesamtes Ozonabbaupotenzial in kg CFC-11-eq • Aufschlüsselung nach Materialgruppen und Lebenszyklusphasen		
Ergänzende Kommentare / Hinweise	Aufgrund des Montrealer Protokolls und abgeleiteter (nationaler) Regulierungen ist diese Wirkungskategorie bei neueren Infrastrukturen weniger kritisch, bleibt aber für die vollständige Bewertung relevant.		

9.1.12 Versauerungspotential (AP)

GreenInfraTwins	Ökologische Qualität		
Indikatorengruppe	Ökobilanz	Nummer	1.5.4
Ermittlungsart	Berechnung	Einheit	kg SO ₂ -eq
Zielsetzung	Verringerung von Emissionen, die zu Versauerung von Böden und Gewässern führen.		
Beschreibung	Erfasst Luftschadstoffe wie Schwefeldioxid (SO ₂), Stickoxide (NO _x) und Ammoniak (NH ₃), die zur Bildung von Säuren in der Atmosphäre beitragen.		
Methodisches Vorgehen	Bilanzierung aller versauernden Emissionen über den Lebenszyklus gemäß EN 15978, mit besonderem Fokus auf Brennstoffverbrauch und Produktionsprozesse.		
Bewertung / Berechnung	Die Emissionen werden in Schwefeldioxid-Äquivalente (kg SO ₂ -eq) umgerechnet. Berücksichtigt werden die unterschiedlichen Versauerungspotenziale der Schadstoffe.		
Eingangsdaten	- Emissionsdaten aus Energieerzeugung - Herstellungsprozessdaten für Baumaterialien - Transportemissionen - Emissionsfaktoren aus Ökobilanzdatenbanken		
Output Daten	- Gesamtes Versauerungspotenzial in kg SO₂-eq - Beiträge einzelner Materialien und Prozesse - Prozentuale Verteilung über Lebenszyklusphasen		
Ergänzende Kommentare / Hinweise	Hat besondere Relevanz für regionale Ökosysteme und die Bausubstanz. Kann durch Wahl emissionsarmer Energieträger und Materialien erheblich reduziert werden.		

9.1.13 Ozonbildungspotential (POCP) (auch photochemisches Oxidantienbildungspotenzial)

GreenInfraTwins	Ökologische Qualität		
Indikatorengruppe	Ökobilanz	Nummer	1.5.5
Ermittlungsart	Berechnung	Einheit	kg C ₂ H ₄ -eq
Zielsetzung	Reduzierung von Emissionen, die zur Bildung von bodennahem Ozon (Sommersmog) führen.		
Beschreibung	Erfasst flüchtige organische Verbindungen (VOCs), Stickoxide und andere Vorläufersubstanzen, die unter Sonneneinstrahlung zur Bildung von Photooxidantien beitragen.		
Methodisches Vorgehen	Identifizierung aller relevanten Emissionen, besonders aus Beschichtungen, Klebstoffen, Verbrennungsprozessen und Transportemissionen gemäß EN 15978.		
Bewertung / Berechnung	Die Emissionen werden in Ethen-Äquivalente (kg C ₂ H ₄ -eq) umgerechnet. Die Bewertung erfolgt nach der CML-Methode unter Berücksichtigung regionaler Bedingungen.		
Eingangsdaten	- Emissionen aus Baumaterialien (Beschichtungen, Lacke, Klebstoffe, etc.) - Verbrennungsemissionen (Transport) und Produktionsprozessdaten - Charakterisierungsfaktoren für verschiedene Emissionen		
Output Daten	- Gesamtes POCP in kg C₂H₄-eq - Aufschlüsselung nach Emissionsquellen - Identifikation der Hauptbeiträger		
Ergänzende Kommentare / Hinweise	-		

9.1.14 Kumulierter Energieaufwand (KEA)

GreenInfraTwins	Ökologische Qualität		
Indikatorengruppe	Ökobilanz	Nummer	1.5.6
Ermittlungsart	Berechnung	Einheit	MJ
Zielsetzung	Erfassung und Reduzierung des gesamten Energieaufwands über den kompletten Lebensweg eines Produkts oder Gebäudes, um die Energieeffizienz zu verbessern und energiebedingte Umweltbelastungen zu minimieren.		
Beschreibung	Der KEA quantifiziert die Summe aller primärenergetischen Aufwendungen, die für Herstellung, Transport, Nutzung und Entsorgung eines Produkts oder Objekts erforderlich sind. Im Kontext der EN 15804/15978 wird dieser Indikator durch PERT (Primary Energy Renewable Total) und PENRT (Primary Energy Non-Renewable Total) abgebildet, die zusammen den Gesamtprimärenergiebedarf darstellen.		
Methodisches Vorgehen	Systematische Erfassung aller Energieflüsse über den gesamten Lebenszyklus gemäß VDI-Richtlinie 4600 sowie EN 15804/15978. Dabei werden sowohl direkt verbrauchte Energieträger als auch indirekte Energieaufwendungen für vorgelagerte Prozesse bilanziert und nach erneuerbaren und nicht-erneuerbaren Quellen differenziert.		
Bewertung / Berechnung	Die Formel zur Bewertung des Indikators für einen Baustofftyp setzt sich aus den Materialmengen und dem Datensatz aus dem „ÖkobaDat“ zusammen $CED = M \cdot \sum_{P_1}^{P_n} (PERT + PENRT)$ Legende: CED Synonym für KEA (cumulated energy demand) M EPD-bezogene Menge [m², m³, kg] P₁, P_n jeweilige Lebensphase (A1-3, B1-8, C1-4, D) einer Tätigkeit PERT Gesamtverbrauch von erneuerbarer Primärenergie [MJ/Materialeinheit] PENRT Summe nicht erneuerbarer Primärenergie [MJ/ Materialeinheit]		
Eingangsdaten	• Detaillierte Materialinventare mit Herstellungsenergien • Energieverbrauchsdaten für alle Prozesse • Transportdistanzen und -mittel • Betriebsenergiebedarf während der Nutzungsphase • Energiebedarf für Wartung, Instandhaltung und Entsorgung • Primärenergiefaktoren für alle Energieträger, getrennt nach erneuerbaren und nicht-erneuerbaren Anteilen		

Output Daten	• Gesamtprimärenergie (KED) in MJ • Aufschlüsselung nach Lebenszyklusphasen gemäß EN 15978 (A1-A3, B6, etc.)
Ergänzende Kommentare / Hinweise	In der EN 15804/15978-Methodik werden PERT und PENRT weiter in Unterkategorien aufgeteilt (z.B. als Rohstoff verwendete vs. als Energieträger verwendete Primärenergie). Der KEA nach VDI 4600 kann stofflich gebundene Energie etwas anders berücksichtigen als die EN-Normen. Bei der DGNB-Zertifizierung werden vor allem die Indikatoren gemäß EN 15978 (PERT, PENRT) herangezogen, während der KEA nach VDI 4600 als ergänzender Indikator dienen kann. Für eine konsistente Bewertung ist die verwendete Methodik stets klar zu dokumentieren.

9.1.15 Materialkosten, prozessbezogene Kosten

GreenInfraTwins	Ökonomische Qualität		
Indikatorengruppe	Bauwerksbezogene Lebenszykluskosten	Nummer	2.1
Ermittlungsart	Berechnung	Einheit	
Zielsetzung	Erfassung und Reduzierung der gesamten Materialkosten sowie der prozessbezogenen Kosten über den kompletten Lebensweg eines Produkts oder Gebäudes, um die Wirtschaftlichkeit zu verbessern und kostenbedingte Belastungen zu minimieren.		
Beschreibung	Die Materialkosten und prozessbezogenen Kosten quantifizieren die Summe aller kostenrelevanten Aufwendungen, die für Materialbeschaffung, Herstellung, Transport, Nutzung/Instandhaltung sowie Rückbau und Entsorgung eines Produkts oder Objekts erforderlich sind. Im Kontext der Lebenszykluskostenbetrachtung werden diese durch die Materialkosten (z. B. Rohstoffe, Bauteile) und die prozessbezogenen Kosten (z. B. Fertigungs-, Montage-, Transport- und Entsorgungsprozesse) abgebildet, die zusammen die gesamten kostenbezogenen Aufwendungen über den Lebenszyklus darstellen.		
Methodisches Vorgehen	Systematische Erfassung aller Materialkosten sowie prozessbezogenen Kosten über den gesamten Lebenszyklus gemäß den Grundsätzen der Lebenszykluskostenrechnung nach EN 16627 und ISO 15686-5. Dabei werden sowohl direkt anfallende Materialaufwendungen als auch indirekte Kosten für vorgelagerte und begleitende Prozesse (z. B. Herstellung, Transport, Montage, Betrieb/Instandhaltung sowie Rückbau und Entsorgung) bilanziert und getrennt nach Materialkosten und Prozesskosten ausgewiesen.		
Bewertung / Berechnung	Die Bewertung erfolgt mittels Lebenszykluskostenrechnung (LCC) über den definierten Betrachtungszeitraum T. Die Gesamtkosten ergeben sich aus der Summe von Materialkosten und prozessbezogenen Kosten: $K_{\text{ges}} = \sum_{i=1}^n (K_{\text{Mat},i} + K_{\text{Proz},i})$ Materialkosten werden über Mengen und Einheitspreise bilanziert: $K_{\text{Mat}} = \sum_{j=1}^m q_j \cdot p_j$ Prozessbezogene Kosten werden je Prozessschritt aggregiert: $K_{\text{Proz}} = \sum_{k=1}^r c_k$ Optional erfolgt eine Abzinsung auf den Barwert:		

	$PV = \sum_{t=0}^T \frac{K(t)}{(1+d)^t}$
Eingangsdaten	• Materialmengen q_j und Einheitspreise p_j (Preisstand/Bezugsjahr) • Prozessdaten je Schritt k: Kosten c_k bzw. Zeit/Menge t_k und Kostensatz s_k • Zuordnung zu Lebenszyklusphasen i sowie Betrachtungszeitraum T • Optional: Diskontsatz d, Austauschzyklen/Instandhaltungsintervalle
Output Daten	• Materialkosten K_{Mat} und prozessbezogene Kosten K_{Proz} je Phase i • Gesamtkosten über den Lebenszyklus K_{ges} (Summe) • Optional: Barwert PV der Lebenszykluskosten • Kostenanteile / Kostentreiber (z. B. Anteil Material vs. Prozess)
Ergänzende Kommentare / Hinweise	

9.1.16 Kosten aufgrund von Zeitverlusten, Umleitungen und erhöhten Fahrzeugbetriebskosten

GreenInfraTwins	Ökonomische Qualität		
Indikatorengruppe	Externe Kosten	Nummer	2.2
Ermittlungsart	Berechnung	Einheit	EUR
Zielsetzung	Ermittlung und Quantifizierung von baustelleninduzierten und verkehrsbedingten Verspätungskosten. Hierdurch werden nicht nur die Lebenszykluskosten auf Bauwerksebene in eine Entscheidungsfindung, sondern auch die monetarisierten externen Effekte aufgrund von Verkehrsbehinderungen.		
Beschreibung	Für eine ganzheitliche Analyse müssen die Wechselwirkungen zwischen Bauwerk und Verkehr in Form von externen Effekten in die Entscheidungsfindung mit einbezogen werden. Die externen Effekte aus dem Verkehr werden durch eine Differenzbetrachtung zwischen dem Normalbetrieb und dem Baustellenbetrieb ermittelt.		
Methodisches Vorgehen	Für die Berechnung wird ein makroskopisches, deterministisches Warteschlangenmodell eingesetzt, das auch in den Indikatorensteckbriefen der BAST in ähnlicher Form beschrieben wird. Eine Ausführliche Erläuterung der Berechnungsschritte findet sich in Zinke, 2016.		
Bewertung / Berechnung	Die zusätzlichen Reisezeiten der betroffenen Verkehrsteilnehmenden aufgrund von Kapazitätsreduzierungen und Umleitungen sowie die dadurch entstehenden Fahrzeugbetriebskosten werden ermittelt und in Geldeinheiten übersetzt. Die Monetarisierungsraten orientieren sich dabei an aktuellen Studien im deutschsprachigen Raum. Die Berechnung findet in einem externen Service statt, der in einem mehrschrittigen Verfahren die Leistungsfähigkeit der jeweiligen Verkehrsführung im Baustellenbereich sowie die vorhandene Verkehrsnachfrage berechnet, wobei beide Parameter für jede Baustunde bestimmt werden. Im Anschluss werden zwei Berechnungsfälle unterschieden werden: zum einen das Herabsetzen der Grenzkapazität von Straßen durch die Einrichtung von Baustellen und zum anderen Sperrungen von Straßen, die das Fahren von Umleitungen erfordern. Der letzte Fall führt zu Mehrkilometern in Abhängigkeit der Umleitungslänge sowie der vorhandenen Verkehrsnachfrage.		
Eingangsdaten	- Dauer der zu untersuchenden Baumaßnahmen - Für die Maßnahmendauer erforderliche Verkehrsführung - Verkehrsganglinien und Fahrzeugflottenzusammensetzung repräsentativ für den Standort des Brückenbauwerks		
Output Daten	Liste mit externen Kosten aus Verkehrsbeeinträchtigungen für einzelne Baumaßnahmen		
Ergänzende Kommentare / Hinweise			

9.1.17 Lärmbeeinträchtigung von Menschen

GreenInfraTwins	Sozio-kulturelle und funktionale Qualität		
Indikatorengruppe	Schutzgut Mensch	Nummer	3.1.1
Ermittlungsart	Berechnung	Einheit	
Zielsetzung	Ermittlung und Quantifizierung der durch Baustellenbetrieb und verkehrsbedingte Änderungen verursachten Lärmbeeinträchtigung von Menschen . Damit werden neben Umweltauswirkungen auf Bauwerksebene auch die zusätzlichen Belastungen für Anwohner und Nutzer durch Baustellenverkehr, Stau und Umleitungen in die Entscheidungsfindung einbezogen.		
Beschreibung	Für eine ganzheitliche Bewertung sind die Wechselwirkungen zwischen Bauwerk und Verkehr als externe Effekte zu berücksichtigen. Die Lärmauswirkungen werden über eine Differenzbetrachtung zwischen dem Normalbetrieb (ohne Baustelle) und dem Baustellenbetrieb (mit veränderter Verkehrsführung, Kapazitätseinbußen, Stau/Stop-and-Go und Umleitungen) bestimmt. Zusätzlich können – je nach Maßnahme – Baulärmquellen (z. B. Fräsen, Rammarbeiten, Abbruch, Betonage) berücksichtigt werden.		
Methodisches Vorgehen	Die Berechnung erfolgt in einem mehrstufigen Verfahren: Verkehrszustände je Stunde (Normalbetrieb vs. Baustellenbetrieb) Verkehrsmenge, Geschwindigkeit, Anteil Schwerverkehr, Stop-and-Go/Staulängen Ermittlung der Lärmemissionen des Verkehrs schalltechnische Emissionsberechnung je Fahrstreifen/Richtung Schallausbreitung / Immissionen an Rezeptoren Berechnung der Pegel an repräsentativen Immissionsorten (Wohnbebauung, sensible Nutzungen) Bewertung der Betroffenheit Aggregation nach Zeiträumen (Tag/Abend/Nacht) Vergleich von Varianten und Maßnahmen Als Ergebnis werden Immissionspegel und/oder Bevölkerungsbetroffenheit in einem konsistenten Bewertungsrahmen ausgewiesen (z. B. zusätzliche Personen mit Pegeln oberhalb definierter Schwellen).		
Bewertung / Berechnung	Gemessen bzw. bewertet werden: Immissionspegel an Gebäuden/Immissionsorten (z. B. L_{den}, L_{night} oder Tag/Abend/Nacht-Pegel) Lärmbetroffenheit (z. B. Anzahl betroffener Personen/Wohneinheiten je Pegelklasse) Zusatzbelastung durch Baustelle als Differenz (Baustellenbetrieb – Normalbetrieb)		

	optional: monetarisierte Lärmkosten zur Integration in Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen Die Berechnung kann zwei Hauptfälle unterscheiden: Kapazitätsreduktion / Engpass im Baustellenbereich → geringere Geschwindigkeit, Stau, Stop-and-Go, erhöhte Pegel in unmittelbarer Nähe Sperrungen / Umleitungen → Verlagerung von Verkehrslärm in neue Bereiche, Mehrkilometer und Belastung zusätzlicher Anwohner
Eingangsdaten	Dauer der Baumaßnahme und Bauphasen (inkl. Tages-/Nachtarbeit) Verkehrsführung im Baustellenbereich (Fahrstreifen, Geschwindigkeit, Sperrungen, Umleitungen) Verkehrsganglinien und Flottenzusammensetzung (PKW/LKW-Anteile) standortrepräsentativ Geometrie/Netz (Straßenlage, Querschnitt, Steigungen) Relevante Immissionsorte (Gebäude/Schutzobjekte), ggf. Bevölkerungsdaten optional: Baulärmquellen inkl. Einsatzzeiten (Maschinenliste, Betriebsstunden, Schallleistungspegel)
Output Daten	Liste/Zeitraster der zusätzlichen Lärmimmissionen aus Verkehrsbeeinträchtigungen je Maßnahme/Phase Pegeländerungen an relevanten Immissionsorten (z. B. ΔL in dB) Betroffenheitskennwerte (z. B. Anzahl Personen/Wohneinheiten je Pegelklasse) optional: monetarisierte Lärmkosten bzw. Nutzen einer Minderungsmaßnahme
Ergänzende Kommentare / Hinweise	Für belastbare Ergebnisse ist eine zeitlich hochaufgelöste Betrachtung (mind. stündlich) sinnvoll, da Stau und Umleitungsverkehre stark schwanken. Die Auswahl der Immissionsorte sollte sensible Nutzungen berücksichtigen (Wohnbebauung, Schulen, Krankenhäuser). Maßnahmen zur Reduktion (Beispiele): temporäre Tempolimits, lärmarme Fahrbahnoberflächen, optimierte Umleitungsführung, Zeitfenstersteuerung für LKW, lärmarme Bauverfahren, mobile Lärmschutzwände. Wichtig ist eine klare Abgrenzung zwischen Verkehrslärm (indirekt durch Baustelle verursacht) und direktem Baulärm; beide können getrennt oder kombiniert ausgewiesen werden.

9.1.18 Arbeitssicherheit

GreenInfraTwins	Sozio-kulturelle und funktionale Qualität		
Indikatorengruppe	Schutzgut Mensch	Nummer	3.1.3
Ermittlungsart	Berechnung	Einheit	Anzahl
Zielsetzung	Ziel ist es Gesundheitsrisiken zu reduzieren sowie sichere und gesunde Arbeitsbedingungen zu fördern.		
Beschreibung	Der Indikator Arbeitssicherheit erfasst die Anzahl der Unfälle, die während der Bauphase auftreten, und spiegelt die Sicherheit für die am Bau beteiligten Personen wider. Die Unfallgefahr variiert je nach Arbeitsprozess, Maschineneinsatz und Baumaterialien; zudem sind Unfälle mit dem Verkehr (Eindringen in die Arbeitszone) zu vermeiden, da längere Bauzeiten das Risiko erhöhen.		
Methodisches Vorgehen	Der Indikator misst Unfälle mit Personenschäden und basiert auf einem im InfraROB-Projekt entwickelten Ansatz. Der Ansatz umfasst eine agentenbasierte Modellierung inkl. Monte-Carlo-Simulation. Die wichtigsten Parameter berücksichtigen die Merkmale des Arbeitsbereichs: Lage in Bezug auf den Verkehr, Geometrie, Anzahl und Art der Maschinen, Anzahl und Rolle der Arbeiter und die von ihnen ausgeführten Tätigkeiten, Dauer der Maßnahme sowie die Verkehrsbelastung. Die in einer Simulation ermittelten Werte werden anhand der beobachteten Unfallraten in den Arbeitsbereichen kalibriert.		
Bewertung / Berechnung	Die Agenten (Arbeiter, Maschinen, Verkehr) werden innerhalb der Arbeitszone bei Durchführung einer Baumaßnahme simuliert, während anhand einer Monte-Carlo-Simulation stochastische Verhaltensvariationen berücksichtigt werden. Zusammenstöße zwischen Arbeitern, Maschinen und Verkehr während der Durchführung einer Maßnahme werden als Unfall gezählt.		
Eingangsdaten	• Verkehrsdaten (DTV, zulässige Geschwindigkeit, Verkehrsführung) • Baustellenparameter (Dauer, Größe, Lage, Tätigkeiten) • Anzahl und Rolle der eingesetzten Arbeitenden und Maschinen • Unfallstatistiken von Bauprojekten • Arbeitsschutzrichtlinien und Sicherheitsberichte		
Output Daten	Anzahl der Arbeitsunfälle pro Tag einer Maßnahme, für Fälle mit und ohne Beteiligung des fließenden Verkehrs.		
Ergänzende Kommentare / Hinweise	Im Allgemeinen ist die erwartete Zahl der Unfälle gering. Der Hauptzweck dieses Indikators besteht darin, verschiedene Maßnahmen zu vergleichen, die sich in der angewandten Technologie und dem entsprechenden Ausführungsprozess unterscheiden.		

9.1.19 Reisezeitverlust

GreenInfraTwins	Sozio-kulturelle und funktionale Qualität		
Indikatorengruppe	Verfügbarkeit	Nummer	3.2
Ermittlungsart	Berechnung	Einheit	h
Zielsetzung	Sicherstellung und Erhaltung der funktionalen Qualität des Infrastrukturobjekts.		
Beschreibung	Unter Verfügbarkeit wird der prozentuale Anteil an Zeit innerhalb eines Zeitintervalls verstanden, in der ein Bauwerk die ihm zugewiesene Funktion erfüllt. Es ist hierbei unerheblich, ob die Funktionsausfälle infolge von geplanten Erhaltungsarbeiten oder infolge eines Versagens verursacht werden. Eine schnelle und effiziente Bauweise, die die Verkehrsbeeinträchtigungen minimiert, ist aus sozio-kultureller Sicht von großer Bedeutung.		
Methodisches Vorgehen	Es wird davon ausgegangen, dass es während der Maßnahme zu keinen Kapazitätseinschränkungen oder Verkehrsstaus kommt. Der Reisezeitverlust in Stunden [h] für alle Verkehrsteilnehmer, die die Brücke befahren, wird durch eine administrative Maßnahme (reduzierte Geschwindigkeit) entlang der Baustelle verursacht.		
Bewertung / Berechnung	Der Verlust von Reisezeit R ist berechnet: $R = DTV \cdot \Delta t \cdot \frac{T_A}{24h} = DTV \cdot \left(\frac{L}{V_{red}} - \frac{L}{V_{zul}} \right) \cdot \frac{T_A}{24h}$ $R = DTV \cdot \Delta t \cdot \frac{T_A}{24h} = DTV \cdot \left(\frac{L}{V_{red}} - \frac{L}{V_{zul}} \right) \cdot \frac{T_A}{24h}$		
Eingangsdaten	DTV: durchschnittliche tägliche Verkehrsstärke [Fz./24h] Δt: zusätzliche Reisezeit aufgrund einer Geschwindigkeitsreduzierung [h] L: Bauwerkslänge [m] V _{red} : reduzierte Geschwindigkeit entlang der Arbeitszone [km/h] V _{zul} : zulässige Geschwindigkeit ohne Maßnahme [km/h] T _A : Dauer der Aktivitäten in der Arbeitszone [h]		
Output Daten	Reisezeitverlust in Stunden [h]		
Ergänzende Kommentare / Hinweise	Sofern methodische Ansätze für eine Monetarisierung der Reisezeitverluste Anwendung finden, ist dieser Indikator der Indikatorengruppe „Externe Kosten“ im Rahmen der Ökonomischen Qualität zuzuordnen.		

9.1.20 Zuverlässigkeitsindex

GreenInfraTwins	Technische Qualität		
Indikatorengruppe	Zuverlässigkeit	Nummer	4.1
Ermittlungsart	Berechnung	Einheit	–
Zielsetzung	Ziel ist es, das Risiko eines strukturellen Versagens, eines Betriebsversagens oder eines anderen von der Norm vorgeschriebenen Versagens zu mindern, um die langfristige Nutzbarkeit eines Bauwerks zu gewährleisten.		
Beschreibung	Der Zuverlässigkeitsindex (meist β -Wert genannt) ist eine statistische Kennzahl zur Bewertung der Sicherheit und Zuverlässigkeit technischer Systeme, insbesondere in der Struktur- und Bauwerkszuverlässigkeit. Er wird verwendet, um die Wahrscheinlichkeit des Versagensmodus eines Systems zu bestimmen. Normen (z.B. Eurocode) schreiben die Schwellenwerte vor, die der β -Wert für einen Grenzzustand (z.B. Tragfähigkeit, Gebrauchstauglichkeit) erfüllen muss. Ein β -Wert z.B. > 4.7 zeigt eine hohe Zuverlässigkeit an, während ein β -Wert < 2.3 auf ein erhöhtes Versagensrisiko hinweist.		
Methodisches Vorgehen	In der Regel, basiert die Berechnung des β -Wertes auf probabilistischen Modellen. Dabei werden folgende Parameter und ihre Unsicherheiten berücksichtigt: Materialeigenschaften und Geometrie des Bauwerks, Belastungsszenarien und der aktuelle Zustand des Bauwerks. Die Auswirkungen von Schäden auf die strukturelle Widerstandsfähigkeit werden anhand ihrer Lage, Art und Schwere geschätzt. Für die Entscheidungsfindung bei der Maßnahmenauswahl ist es erforderlich, den zeitlichen Verlauf des β -Wertes unter Berücksichtigung der Vorhersage von Schadensentwicklungen am Bauwerk zu modellieren.		
Bewertung / Berechnung	In den meisten Fällen erfolgt die Berechnung von β -Werten mit der „First Order Reliability Method“ (FORM). Die Grenzzustandsfunktion wird für einen spezifischen Lastfall definiert und kann entweder für das gesamte Bauwerk (globaler Versagensmodus) oder für ein einzelnes Bauteil (lokaler Versagensmodus) formuliert werden.		
Eingangsdaten	• Bauwerksgeometrie und Materialeigenschaften • Belastungsmodell (z.B. Eurocode LM1) • Inspektionsergebnisse und Schadensberichte • Normative Vorgaben und Standards		
Output Daten	β -Werte für globalen und/oder lokalen Versagensmodus		
Ergänzende Kommentare / Hinweise	Da der β -Wert oberhalb eines durch eine Norm definierten Schwellenwertes liegen muss, bestimmt er den Erhaltungsbedarf während des Lebenszyklus eines Bauwerks. Dies wirkt sich direkt auf die Berechnung weiterer Indikatoren, wie z.B. die Verfügbarkeit und Nachhaltigkeit aus. Die Prognose der zeitlichen Entwicklung des β -Wert ist nicht im Rahmen dieses Projekts möglich.		

9.2 Informationsbedarf der Demonstratoren

Gemäß Kapitel 5 sind die detaillierten Informationsbedarfe der Demonstratoren in tabellarischer Form in den folgenden Abschnitten erfasst. Die erforderlichen Daten wurden in den Informationscontainer dann gespeichert.

9.2.1 Deutscher Demonstrator

Folgende Tabelle stellen die Informationsbedarf für Anwendungsfall 1 – Betriebliche Aufgabe mit Maßnahme Grünschnitt gemäß LOIN Konzept dar.

Ziel	1.5.1 Globales Erwärmungspotential (GWP)		
Beschreibung	Aktivität Dauer * Betriebsmittel Verbrauch je EPD bezogene Menge je Aktivität Zeiteinheit * GWP		
Meilenstein	Betriebliche Aktivität-AwF 1-DE		
ObjektType	Aktivität		
Alphanumerische Information	Eigenschaft	Wert	Einheit
	Aktivität Bezeichnung		[-]
	Aktivität Dauer		[h]
	Gerätebezeichnung (Einsatz)		[-]
Dokument	GrIT Daten		
ObjektType	Geräte		
Alphanumerische Information	Eigenschaft	Wert	Einheit
	Gerätebezeichnung		[-]
	Betriebsmittel Verbrauch je EPD_bezogene Menge je Aktivität Zeiteinheit		[MengeEinheit]
	Betriebsmittelbezeichnung (Einsatz)		[-]
Dokument	GrIT Daten		
ObjektType	Betriebsmittel		
Alphanumerische Information	Eigenschaft	Wert	Einheit
	Betriebsmittelbezeichnung		[-]
	GWP Datensatz		[kg CO2-äq]
Dokument	EPD Datenblatt		

Ziel	1.5.2 Eutrophierungspotential (EP)		
Beschreibung	Aktivität Dauer * Betriebsmittel Verbrauch je EPD bezogene Menge je Aktivität Zeiteinheit * EP		
Meilenstein	Betriebliche Aktivität-AwF 1-DE		
ObjektType	Aktivität		
Alphanumerische Information	Eigenschaft	Wert	Einheit
	Aktivität Bezeichnung		[-]
	Aktivität Dauer		[h]
	Gerätebezeichnung (Einsatz)		[-]
Dokument	GrIT Daten		
ObjektType	Geräte		
Alphanumerische Information	Eigenschaft	Wert	Einheit
	Gerätebezeichnung		[-]
	Betriebsmittel Verbrauch je EPD_bezogene Menge je Aktivität Zeiteinheit		[MengeEinheit]
	Betriebsmittelbezeichnung (Einsatz)		[-]
Dokument	GrIT Daten		
ObjektType	Betriebsmittel		
Alphanumerische Information	Eigenschaft	Wert	Einheit
	Betriebsmittelbezeichnung		[-]
	EP Datensatz		[kg PO4 ⁽³⁾ -äq]
Dokument	EPD Datenblatt		

Ziel	1.5.3 Ozonschichtabbaupotential (ODP)		
Beschreibung	Aktivität Dauer * Betriebsmittel Verbrauch je EPD bezogene Menge je Aktivität Zeiteinheit * ODP		
Meilenstein	Betriebliche Aktivität-AwF 1-DE		
ObjektType	Aktivität		
Alphanumerische Information	Eigenschaft	Wert	Einheit
	Aktivität Bezeichnung		[-]
	Aktivität Dauer		[h]
	Gerätebezeichnung (Einsatz)		[-]
Dokument	GrIT Daten		
ObjektType	Geräte		
Alphanumerische Information	Eigenschaft	Wert	Einheit
	Gerätebezeichnung		[-]
	Betriebsmittel Verbrauch je EPD_bezogene Menge je Aktivität Zeiteinheit		[MengeEinheit]
	Betriebsmittelbezeichnung (Einsatz)		[-]
Dokument	GrIT Daten		
ObjektType	Betriebsmittel		
Alphanumerische Information	Eigenschaft	Wert	Einheit
	Betriebsmittelbezeichnung		[-]
	ODP Datensatz		[kg R11-äq]
Dokument	EPD Datenblatt		

Ziel	1.5.4 Versauerungspotential (AP)		
Beschreibung	Aktivität Dauer * Betriebsmittel Verbrauch je EPD bezogene Menge je Aktivität Zeiteinheit * AP		
Meilenstein	Betriebliche Aktivität-AwF 1-DE		
ObjektType	Aktivität		
Alphanumerische Information	Eigenschaft	Wert	Einheit
	Aktivität Bezeichnung		[-]
	Aktivität Dauer		[h]
	Gerätebezeichnung (Einsatz)		[-]
Dokument	GrIT Daten		
ObjektType	Geräte		
Alphanumerische Information	Eigenschaft	Wert	Einheit
	Gerätebezeichnung		[-]
	Betriebsmittel Verbrauch je EPD_ bezogene Menge je Aktivität Zeiteinheit		[MengeEinheit]
	Betriebsmittelbezeichnung (Einsatz)		[-]
Dokument	GrIT Daten		
ObjektType	Betriebsmittel		
Alphanumerische Information	Eigenschaft	Wert	Einheit
	Betriebsmittelbezeichnung		[-]
	AP Datensatz		[kg SO ₂ -äq]
Dokument	EPD Datenblatt		

Ziel	1.5.6 Kumulierter Energieaufwand (KEA)		
Beschreibung	Aktivität Dauer * Betriebsmittel Verbrauch je EPD bezogene Menge je Aktivität Zeiteinheit * KEA		
Meilenstein	Betriebliche Aktivität-AwF 1-DE		
ObjektType	Aktivität		
Alphanumerische Information	Eigenschaft	Wert	Einheit
	Aktivität Bezeichnung		[-]
	Aktivität Dauer		[h]
	Gerätebezeichnung (Einsatz)		[-]
Dokument	GrIT Daten		
ObjektType	Geräte		
Alphanumerische Information	Eigenschaft	Wert	Einheit
	Gerätebezeichnung		[-]
	Betriebsmittel Verbrauch je EPD_ bezogene Menge je Aktivität Zeiteinheit		[MengeEinheit]
	Betriebsmittelbezeichnung (Einsatz)		[-]
Dokument	GrIT Daten		
ObjektType	Betriebsmittel		
Alphanumerische Information	Eigenschaft	Wert	Einheit
	Betriebsmittelbezeichnung		[-]
	KEA Datensatz		[kg C ₂ H ₄ -äq]
Dokument	EPD Datenblatt		

Ziel	2.1.1.1 Materialkost		
Beschreibung	Summe (Betriebsmittel Verbrauch je EPD_bezogene Menge je Aktivität Zeiteinheit * Aktivität Dauer) [EUR]		
Meilenstein	Betriebliche Aktivität-AwF 1-DE		
ObjektType	Aktivität		
Alphanumerische Information	Eigenschaft	Wert	Einheit
	Aktivität Bezeichnung		[-]
	Aktivität Dauer		[h]
	Gerätebezeichnung (Einsatz)		[-]
Dokument	GrIT Daten		
ObjektType	Geräte		
Alphanumerische Information	Eigenschaft	Wert	Einheit
	Gerätebezeichnung		[-]
	Betriebsmittel Verbrauch je EPD_bezogene Menge je Aktivität Zeiteinheit		[MengeEinheit]
	Betriebsmittelbezeichnung (Einsatz)		[-]
Document:	GrIT Daten		
ObjektType	Betriebsmittel		
Alphanumerische Information	Eigenschaft	Wert	Einheit
	Betriebsmittelbezeichnung		[-]
	Einheitspreis der Betriebstoff		[EUR/Einheit]
Dokument	LCA Datenblatt		

Ziel	2.1.1.2 Prozessbezogene Kosten		
Beschreibung	Summe (Gerätekosten je Aktivität Zeiteinheit * Aktivität Dauer) [EUR]		
Meilenstein	Betriebliche Aktivität-AwF 1-DE		
ObjektType	Aktivität		
Alphanumerische Information	Eigenschaft	Wert	Einheit
	Aktivität Bezeichnung		[-]
	Aktivität Dauer		[h]
	Gerätebezeichnung (Einsatz)		[-]
Dokument	GrIT Daten		
ObjektType	Geräte		
Alphanumerische Information	Eigenschaft	Wert	Einheit
	Gerätebezeichnung		[-]
	Gerätekosten je Aktivität Zeiteinheit		[MengeEinheit]
Dokument	LCA Datenblatt (Inventar Datenblatt)		

Ziel	2.2.1 Kosten aufgrund von Zeitverlusten, Umleitungen und erhöhten Fahrzeugbetriebskosten		
Beschreibung	Ergebnis durch Externe Berechnung [EUR]		
Meilenstein	Betriebliche Aktivität-AwF 1-DE		
ObjektType	Aktivität		
Dokument	Ergebnis der externen Abrechnung über Kosten Zeitverlust (Format: XML)		

Folgend Tabelle stellen die Informationsbedarf für Anwendungsfall 4 – Rückbau gemäß LOIN Konzept dar.

Ziel	1.1.1 Materialität des Bauwerks		
Beschreibung	Masse [Material] / Gesamtmasse des Bauwerks [Masse-%]		
Meilenstein	Rückbauplan-AwF 4-DE		
ObjektType	Brücke		
Alphanumerische Information	Eigenschaft	Wert	Einheit
	Berücke Bezeichnung		[-]
	Gesamtmasse des Bauwerks		[t]
Dokument	IFC Model		
ObjektType	Bauteil		
Alphanumerische Information	Eigenschaft	Wert	Einheit
	Bauteil Bezeichnung		[-]
	Material Bezeichnung		[-]
	Masse		[t]
ObjektType	Bauteil		
Alphanumerische Information	Eigenschaft	Wert	Einheit
	Bauteil Bezeichnung		[-]
	Material Bezeichnung	[Beton, Stahlbeton]	[-]
	Volumen		[m3]
	Dichte		[t/m3]
	Bewehrungsgrad		[-]
Dokument	IFC Model		

Ziel	1.1.2 Monetärer des Bauwerks		
Beschreibung	Masse [Material] * Restwert [Material] [EUR]		
Meilenstein	Rückbauplan-AwF 4-DE		
ObjektType	Bauteil		
Alphanumerische Information	Eigenschaft	Wert	Einheit
	Bauteil Bezeichnung		[-]
	Material Bezeichnung		[-]
	Masse		[t]
ObjektType	Bauteil		
Alphanumerische Information	Eigenschaft	Wert	Einheit
	Bauteil Bezeichnung		[-]
	Material Bezeichnung	[Beton, Stahlbeton]	[-]
	Volumen		[m3]
	Dichte		[t/m3]
	Bewehrungsgrad		[-]
Dokument	IFC Model		
ObjektType	Material		
Alphanumerische Information	Eigenschaft	Wert	Einheit
	Material Bezeichnung		[-]
	Restwert		[EUR/t]
Dokument	LCA-Material-Datenblatt		

Ziel	1.1.4 Demontagefähigkeit (Indikator)		
Beschreibung	Masse [Bauteilen je Demontagefähigkeitsklasse] [t]		
Meilenstein	Rückbauplan-AwF 4-DE		
ObjektType	Bauteil		
Alphanumerische Information	Eigenschaft	Wert	Einheit
	Bauteil Bezeichnung		[-]
	Material Bezeichnung		[-]
	Masse		[t]
	Bauteilklasse	[Unterbau, Oberbau, Fahrbahn, Schutzeinrichtung]	[-]
	Demontagefaehigkeitsklass	[optimiert, verbessert, standard, kritisch, nicht bewertbar]	[-]
ObjektType	Bauteil		
Alphanumerische Information	Eigenschaft	Wert	Einheit
	Bauteil Bezeichnung		[-]
	Material Bezeichnung	[Beton, Stahlbeton]	[-]
	Volume		[m3]
	Dichte		[t/m3]
	Bauteilklasse	[Unterbau, Oberbau, Fahrbahn, Schutzeinrichtung]	[-]
	Demontagefaehigkeitsklass	[optimiert, verbessert, standard, kritisch, nicht bewertbar]	[-]
Document:	IFC Model		

Ziel	1.1.5 Materialverwertung (Indikator)		
Beschreibung	Masse [Material] * [Anteil der Recyclebarkeit , Anteil der Verwertbarkeit] [Masse-%]		
Meilenstein	Rückbauplan-AwF 4-DE		
ObjektType	Bauteil		
Alphanumerische Information	Eigenschaft	Wert	Einheit
	Bauteil Bezeichnung		[-]
	Material Bezeichnung		[-]
	Masse		[t]
ObjektType	Bauteil		
Alphanumerische Information	Eigenschaft	Wert	Einheit
	Bauteil Bezeichnung		[-]
	Material Bezeichnung	[Beton, Stahlbeton]	[-]
	Volumen		[m3]
	Dichte		[t/m3]
	Bewehrungsgrad		[-]
Dokument	IFC Model		
ObjektType	Material		
Alphanumerische Information	Eigenschaft	Wert	Einheit
	Material Bezeichnung		[-]
	Recyckubganteil-aktuell		[-]
	Recyckubganteil-zukunft		[-]
	Verwertungsanteil-aktuell		[-]
	Verwertungsanteil-zukunft		[-]
Dokument	LCA-Material-Datenblatt		

Ziel	1.3.1 Flächeninanspruchnahme Bauwerk 1.3.1.1(dauer(Indikator)
Beschreibung	Ergebnis durch Externe Berechnung für vorübergehend und dauerhaft Fläche [gewichtete m2]
Meilenstein	Rückbauplan-AwF 4-DE
ObjektType	Brücke
Document	Ergebnis der externen Abrechnung über vorübergehend und dauerhaft Fläche in eine Dokument (in PDF)

9.2.2 Schweizer Demonstrator

Die folgende Tabelle zeigt den Informationsbedarf für den Anwendungsfall 2 Instandsetzung mit der Maßnahme Erneuerung der Fahrbahn mit zwei Betongütern als Variantenvergleich gemäß LOIN-Konzept.

Ziel	1.5.1 Globales Erwärmungspotential (GWP)		
Beschreibung	EPD-bezogene Masse * GWP [kg CO ₂ -äq.]		
Meilenstein	Instandsetzung-AwF 2-CH		
ObjektType	Aktivität		
Alphanumerische Information	Eigenschaft	Wert	Einheit
	Aktivitätsbezeichnung		[-]
	EPD-bezogene Lebensphase	[A, B, C, D]	[-]
	Bauteilbezeichnung (umzubauend)		[-]
Dokument	GrIT Daten		
ObjektType	Bauteil		
Alphanumerische Information	Eigenschaft	Wert	Einheit
	Bauteilbezeichnung		[-]
	EPD-bezogene Menge		[MengeEinheit]
	EPD Datenbank Link		[-]
Dokument	IFC model		
ObjektType	Ökobaudat-Daten		
Alphanumerische Information	Eigenschaft	Wert	Einheit
	EPD Datenbank Link		[-]
	GWP Datensatz		[kg CO ₂ -äq.]
Dokument	Ökobaudat		

Ziel	1.5.6 Ressourcenverbrauch - Cumulative Energy Dem (Indikator)		
Beschreibung	Summe (EPD-bezogene Masse * (PERT+PENRT)) [MJ]		
Meilenstein	Ausführung-Instandsetzung-AwF 2-CH		
ObjektType	Aktivität		
Alphanumerische Information	Eigenschaft	Wert	Einheit
	Aktivitätsbezeichnung		[-]
	EPD-bezogene Lebensphase	[A, B, C, D]	[-]
	Bauteilbezeichnung (umzubauend)		[-]
Dokument	GrIT Daten		
ObjektType	Bauteil		
Alphanumerische Information	Eigenschaft	Wert	Einheit
	Bauteilbezeichnung		[-]
	EPD-bezogene Menge		[MengeEinheit]
	EPD Datenbank Link		[-]
Dokument	IFC model		
ObjektType	Ökobaumat-Daten		
Alphanumerische Information	Eigenschaft	Wert	Einheit
	EPD Datenbank Link		[-]
	PERT Datensatz		[MJ]
	PENRT Datensatz		[MJ]
Dokument	Ökobaumat		

Ziel	2.1.1.1 Materialkosten (Indikator)		
Beschreibung	Einheitspreis des Produkt * Menge des Produkt [EUR]		
Meilenstein	Ausführung-Instandsetzung-AwF 2-CH		
ObjektType	Aktivität		
Alphanumerische Information	Eigenschaft	Wert	Einheit
	Aktivitätsbezeichnung		[-]
	EPD-bezogene Lebensphase	[A, B, C, D]	[-]
	Bauteilbezeichnung (umzubauend)		[-]
Dokument	GrIT Daten		
ObjektType	Bauteil		
Alphanumerische Information	Eigenschaft	Wert	Einheit
	Bauteilbezeichnung		[-]
	Material Bezeichnung		[-]
	Preis-bezogene Menge		[MengeEinheit]
Dokument	IFC Model		
ObjektType	Material		
Alphanumerische Information	Eigenschaft	Wert	Einheit
	Material Bezeichnung		[-]
	Neupreis je Menge Einheit		[EUR/MengeEinheit]
Dokument:	GrIT Daten		

Ziel	2.1.1.2 Prozessbezogene Kosten (Indikator)		
Beschreibung	Summe Kosten (Abbruch+Einbauen) [EUR]		
Meilenstein	Ausführung-Instandsetzung-AwF 2-CH		
ObjektType	Aktivität		
Alphanumerische Information	Eigenschaft	Wert	Einheit
	Aktivität Bezeichnung	[Einbau, Betrieb, Abbruch]	[-]
	Aktivität Kosten		[EUR]
Dokument	GrIT Daten		

Ziel	3.1.3 Arbeitssicherheit (Indikator)		
Beschreibung	Anzahl an Unfällen / Unfallrate im Baustellenbereich [pax / -]. Detail Formel: Summe (Dauer je Aktivität * (AUMV*Verkehrsbelastung DTV/10000 + AUoV)		
Meilenstein	Ausführung-Instandsetzung-AwF 2-CH		
ObjektType	Brücke		
Alphanumerische Information	Eigenschaft	Wert	Einheit
	Brückebezeichnung		[-]
	Verkehrsbelastung DTV		[fz./Tag]
Dokument	IFC Model		
ObjektType	Maßnahme		
Alphanumerische Information	Eigenschaft	Wert	Einheit
	Maßnahme Bezeichnung		[-]
	Anzahl der Bauphase	[2,3]	[-]
	zul. Geschwindigkeit entlang der Zone	[60,80]	[km/h]
Dokument	GrIT Daten		
ObjektType	Maßnahme		
Alphanumerische Information	Eigenschaft	Wert	Einheit
	Maßnahme Bezeichnung		[-]
	AUMV-AUoV-Daten		[-]
Dokument:	Unfall-Datenblatt		
ObjektType	Aktivität		
Alphanumerische Information	Eigenschaft	Wert	Einheit
	Aktivität Bezeichnung	[Abbruch; Einbau]	[-]
	Aktivität Dauer		[Tage]
Dokument	GrIT Daten		

Ziel	3.2.1 Zeitverluste der Reisezeit (Indikator)		
Beschreibung	Verkehrsbelastung DTV * summe(Aktivität Dauer) * (Länge des Arbeitsraum / (1000*zulässige Geschwindigkeit entlang der Zone) – Länge des Arbeitsraum / (1000*zulässige Geschwindigkeit))		
Meilenstein	Ausführung-Instandsetzung-AwF 2-CH		
ObjektType	Brücke		
Alphanumerische Information	Eigenschaft	Wert	Einheit
	Brückebezeichnung		[-]
	Verkehrsbelastung DTV		[fz./Tag]
	zul. Geschwindigkeit Bauwerk		[km/h]
Dokument	IFC Model		
ObjektType	Maßnahme		
Alphanumerische Information	Eigenschaft	Wert	Einheit
	Maßnahme Bezeichnung		[-]
	Länge des Arbeitsraum		[m]
	zul. Geschwindigkeit entlang der Zone	[60,80]	[km/h]
Dokument	GrIT Daten		
ObjektType	Aktivität		
Alphanumerische Information	Eigenschaft	Wert	Einheit
	Aktivität Bezeichnung	[Abbruch; Einbau]	[-]
	Aktivität Dauer		[Tage]
Dokument	GrIT Daten		

9.2.3 Österreichischer Demonstrator

Die folgende Tabelle stellt den Informationsbedarf für den Anwendungsfall 2 – Instandhaltung mit der Maßnahme Periodische Instandsetzung der Fahrbahnübergänge gemäß LOIN Konzept dar.

Ziel	1.5.1 Globales Erwärmungspotential (GWP)		
Beschreibung	EPD-bezogene Menge * GWP [kg CO ₂ -äq.]		
Meilenstein	Periodische-Erhaltungsplan-Lebensdauer-AwF 2-A		
ObjektType	Brücke		
Alphanumerische Information	Eigenschaft	Wert	Einheit
	Brückebezeichnung		[-]
	Nutzungsdauer des Bauwerks		[Jahr]
ObjektType	Bauteil		
Alphanumerische Information	Eigenschaft	Wert	Einheit
	Bauteilbezeichnung	Dehnungsfuge	[-]
	EPD-bezogene Menge		[MengeEinheit]
Dokument	IFC Model		
ObjektType	Produkt-Dehnungsfuge		
Alphanumerische Information	Eigenschaft	Wert	Einheit
	Produktbezeichnung		[-]
	Nutzungsdauer des Produkts		[Jahr]
Dokument	GrIT Daten		
ObjektType	Produkt-Dehnungsfuge		
Alphanumerische Information	Eigenschaft	Wert	Einheit
	Produktbezeichnung		[-]
	GWP Datensatz		[kg CO ₂ -äq.]
Dokument	EPD Datenblatt		

Ziel	2.1.1.1 Materialkosten (Indikator)		
Beschreibung	Preis des Produkt * Menge des Produkt * Anzahl des Wechsel [EUR]		
Meilenstein	Periodische-Erhaltungsplan-Lebensdauer-AwF 2-A		
ObjektType	Brücke		
Alphanumerische Information	Eigenschaft	Wert	Einheit
	Brückebezeichnung		[-]
	Nutzungsdauer Brücke		[Jahre]
ObjektType	Bauteil		
Alphanumerische Information	Eigenschaft	Wert	Einheit
	Bauteil Bezeichnung	Dehnungsfuge	[-]
	Preis-bezogene Menge		[MengeEinheit]
Dokument	IFC Model		
ObjektType	Produkt-Dehnungsfuge		
Alphanumerische Information	Eigenschaft	Wert	Einheit
	Produktbezeichnung		[-]
	Neupreis je Menge Einheit		[EUR/MengeEinheit]
	Nutzungsdauer des Produkts		[Jahr]
Dokument	GrIT Daten		

Ziel	2.1.1.2 Prozessbezogene Kosten - Betrieb (Indikator)		
Beschreibung	Betrieb Kosten – je Jahr je Betrieb Menge * Nutzungsdauer des Bauwerks * Betrieb-bezogene Menge		
Meilenstein	Periodische-Erhaltungsplan-Lebensdauer-AwF 2-A		
ObjektType	Brücke		
Alphanumerische Information	Eigenschaft	Wert	Einheit
	Brückebezeichnung		[-]
	Nutzungsdauer Brücke		[Jahre]
ObjektType	Bauteil		
Alphanumerische Information	Eigenschaft	Wert	Einheit
	Bauteil Bezeichnung	Dehnungsfuge	[-]
	Betrieb-bezogene Menge		[MengeEinheit]
Dokument	IFC Model		

Die folgende Tabelle stellt den Informationsbedarf für den Anwendungsfall 3 – Lebensdauererlängerung mit der Maßnahme Verstärkung der kritischen Zone gemäß LOIN-Konzept dar.

Ziel	1.5.1 Globales Erwärmungspotential (GWP) (Indikator)		
Beschreibung	EPD-bezogene Menge * GWP [kg CO ₂ -äq.]		
Meilenstein	Erhaltungsplan-Kritische Zone-Lebensdauererlängerung-AwF 3-A		
ObjektType	Bauteil		
Alphanumerische Information	Eigenschaft	Wert	Einheit
	Bauteilbezeichnung	Kritische Element	[-]
	EPD-bezogene Menge		[MengeEinheit]
Dokument	IFC Model		
ObjektType	Produkt-Kritische Element		
Alphanumerische Information	Eigenschaft	Wert	Einheit
	Produktbezeichnung		[-]
	GWP Datensatz		[kg CO ₂ -äq.]
Dokument	EPD Datenblatt		

Ziel	2.1.1.1 Materialkosten (Indikator)		
Beschreibung	Preis des Produkt * Menge des Produkt [EUR]		
Meilenstein	Erhaltungsplan-Kritische Zone-Lebensdauererlängerung-AwF 3-A		
ObjektType	Bauteil		
Alphanumerische Information	Eigenschaft	Wert	Einheit
	Bauteilbezeichnung	Kritische Element	[-]
	Preis-bezogene Menge		[MengeEinheit]
Dokument	IFC Model		
ObjektType	Produkt-Kritische Element		
Alphanumerische Information	Eigenschaft	Wert	Einheit
	Produktbezeichnung		[-]
	Neupreis je Menge Einheit		[EUR/MengeEinheit]
Dokument	GrIT Daten		

Ziel	2.1.1.2 Prozessbezogene Kosten - Einbau-Betrieb-Abt (Indikator)		
Beschreibung	Summe Kosten (Einbau + Betrieb + Abbruch)		
Meilenstein	Erhaltungsplan-Kritische Zone-Lebensdauererlängerung-AwF 3-A		
ObjektType	Aktivität		
Alphanumerische Information	Eigenschaft	Wert	Einheit
	Aktivität Bezeichnung	[Einbau, Betrieb, Abbruch]	[-]
	Aktivität Kosten		[EUR]
Dokument	GrIT Daten		

Ziel	3.1.1. Lärmbeeinträchtigung von Menschen (Indikator)		
Beschreibung	Lärm / Betroffenen Personenanzahl [dB/pax]		
Meilenstein	Erhaltungsplan-Kritische Zone-Lebensdauerverlängerung-AwF 3-A		
ObjektType	Aktivität		
Alphanumerische Information	Eigenschaft	Wert	Einheit
	Aktivität Bezeichnung		[-]
	Gerätebezeichnung / ID (zum Einsatz)		[-]
	Mannschaftsstärke		[Personen]
Dokument	GrIT		
ObjektType	Geräte		
Alphanumerische Information	Eigenschaft	Wert	Einheit
	Geräte Bezeichnung		[-]
	Geräte Oberer Schallleistungspegel		[dB]

Ziel	4.1.1 Zuverlässigkeitsindex (β -Wert) (Indikator)		
Beschreibung	Externe Berechnung		
Meilenstein	Erhaltungsplan-Kritische Zone-Lebensdauerverlängerung-AwF 3-A		
ObjektType	Kritische Element		
Alphanumerische Information	Eigenschaften	Wert	Einheit
	β -Wert		[-]
Dokument	IFC Model		
ObjektType	Kritische Element		
Dokument	Ergebnis Dokument der Tragwerksberechnung mit Lastmodel (Format: PDF)		

9.3 Details zum Demonstrator Deutschland

9.3.1 Modellierungsansatz

Der deutsche Demonstrator ist darauf ausgerichtet, typische und häufig im deutschen Bundesfernstraßennetz existierende Brücken abzubilden. Aus diesem Grund ist die geometrische Darstellung so ausgebildet, dass sie als Managementmodell in der Nutzungsphase eingesetzt werden kann. Die geometrische Detaillierung kann als LOG 200-Modell charakterisiert werden und ist in Abbildung 9-1 dargestellt. Hieraus ergibt sich, dass Hauptmengen und -massen aus dem 3D-Modell ableitbar sind, detaillierte Angaben wie die Bewehrungsmassen allerdings nicht, da die Bewehrung nicht im Modell dargestellt ist. Dies ist für die AWF 01 und 04, für die der deutsche Demonstrator entwickelt wurde, auch nicht erforderlich. Aus diesem Grund müssen für eine Ableitung aller erforderlichen Mengen und Massen Nebenrechnungen im Digitalen Zwilling durchgeführt werden. Dies stellt eine Besonderheit des deutschen Demonstrators dar und zeigt, dass die im nachfolgenden Abschnitt vorgestellten Modellierungsvorgaben eingehalten werden müssen, damit eine Verwendung der Daten aus dem 3D-Modell erfolgen kann.

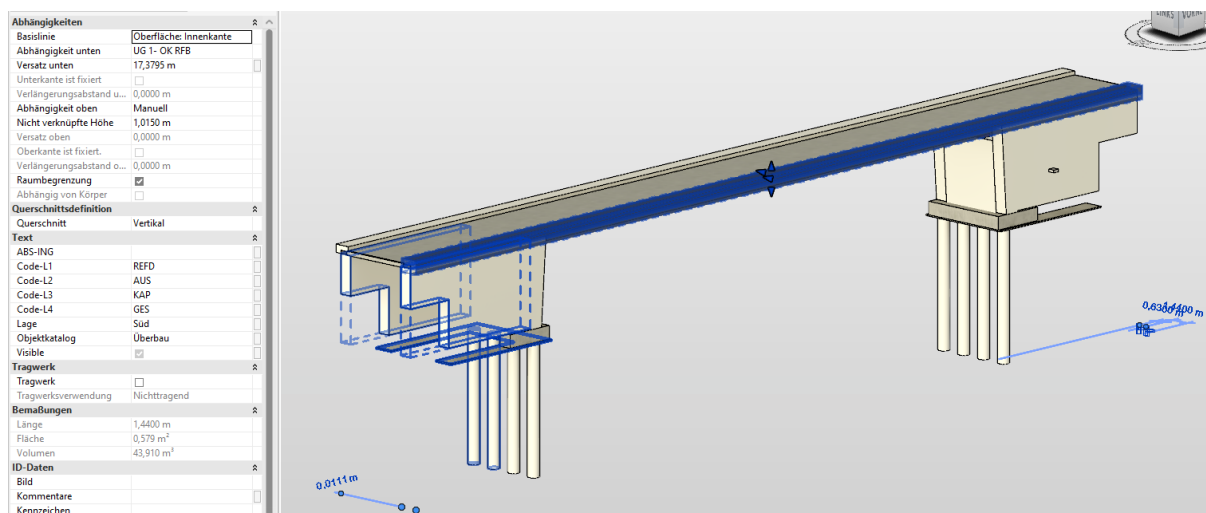


Abbildung 9-1. Darstellung des geometrischen Modells in der Autorensoftware Revit

9.3.2 Modellierungsrichtlinien

Neben den allgemeinen Vorgaben für die Erstellung von BIM-Modellen werden die darzustellenden Modellelemente auf Basis der Abbildung 9-2 eindeutig spezifiziert. Für das Softwareprodukt Revit werden in diesem Zug auch die zu verwendenden Familien benannt

(grün markierte Spalten in Abbildung 9-2). Auf dieser Basis können die Exporteinstellungen in das IFC-Schema eindeutig definiert werden. Es werden dabei die in der IFC-Version 4.3 ADD 2 für Brücken existierenden Klassen verwendet (rot markierte Spalten).

Modellierungswerkzeug		IFC Schema			Objektkatalog - Deutsches Bundesfernstraßen							
Modellelement	Revit	IfcFacility	IfcFacilityPart	IfcBridge_PREDEFINEDTYPE	Code_GIT1	Name_GIT1	Code_GIT2	Name_GIT2	Code_GIT3	Name_GIT3	Code_GIT4	Name_GIT4
Fahrbahn Deckschicht	Floor	IfcBridge	IfcBridgePart	IfcBridgePart.DECK	REFD	Referenzbrücke	OBE	Überbau	BKA	Brückenaufdeckung	DSCH	Fahrbahn Deckschicht
Längsträger	Beam	IfcBridge	IfcBridgePart	IfcFooting.PLE_CAP	REFD	Referenzbrücke	UNT	Unterbau	TRA	Tragwerk Überbau	LTR	Längsträger
Längsträger	Beam	IfcBridge	IfcBridgePart	IfcBeam.TBeam	REFD	Referenzbrücke	OBE	Überbau	TRA	Tragwerk Überbau	LTR	Längsträger
Längsträger	Beam	IfcBridge	IfcBridgePart	IfcBeam.Notdefined	REFD	Referenzbrücke	OBE	Überbau	TRA	Tragwerk Überbau	LTR	Längsträger
Längsträger	Beam	IfcBridge	IfcBridgePart	IfcBeam.TBeam	REFD	Referenzbrücke	OBE	Überbau	TRA	Tragwerk Überbau	LTR	Längsträger
Querträger	Beam	IfcBridge	IfcBridgePart	IfcFooting.PLE_CAP	REFD	Referenzbrücke	OBE	Überbau	TRA	Tragwerk Überbau	QTR	Querträger
Gesamt												
Geländerkonstruktion	Railing	IfcBridge	IfcBridgePart	IfcRailing	REFD	Referenzbrücke	AUS	Ausstattung	GEL	Geländer	GES	Gesamt-Geländerkonstruktion
Bohrpfahl	Foundation	IfcBridge	IfcBridgePart	IfcPile.BORED	REFD	Referenzbrücke	UNT	Unterbau	GRU	Gründung	BOR	Bohrpfahl
Gesamt-Brückenkappe				IfcBridgePart.SUPERSTR								
inkl. Abdichtung	Component	IfcBridge	IfcBridgePart	UCTURE	REFD	Referenzbrücke	AUS	Ausstattung	KAP	Brückenkappe	GES	Gesamt-Brückenkappe inkl. Abdichtung
Gesamt-Brückenlager	Component	IfcBridge	IfcBridgePart	IfcBearing.Notdefined	REFD	Referenzbrücke	UNT	Unterbau	LAG	Brückenlager	GES	Gesamt-Brückenlager
Fahrbahnübergang	Beamfloor	IfcBridge	IfcBridgePart	IfcBridgePart.DECK_SEG	REFD	Referenzbrücke	OBE	Überbau	UKO	Fahrbahnübergang	GES	Gesamt-Fahrbahnübergang
Entwässerungsrohre	Pipe	IfcBridge	IfcBridgePart	IfcPipeSegment.Notdefin	REFD	Referenzbrücke	AUS	Ausstattung	WAB	Brückenentwässerung	BOH	Entwässerungsrohre
Rohrbogen	Component	IfcBridge	IfcBridgePart	IfcPipeFittingType.BEND	REFD	Referenzbrücke	AUS	Ausstattung	WAB	Brückenentwässerung	BOG	Rohrbogen
Rohrverbinder	Component	IfcBridge	IfcBridgePart	IfcPipeFittingType.Juncti	REFD	Referenzbrücke	AUS	Ausstattung	WAB	Brückenentwässerung	VER	Rohrverbinder
Treppe	Stair	IfcBridge	IfcBridgePart	IfcStair.StraightRunStair	REFD	Referenzbrücke	UNT	Unterbau	WID	Brückenwiderlager	TRE	Treppe
Widerlagerkammerwand	Wall	IfcBridge	IfcBridgePart	IfcBridgePart.Abutment	REFD	Referenzbrücke	UNT	Unterbau	WID	Brückenwiderlager	WKD	Widerlagerkammerwand
Seitenflügel	Wall	IfcBridge	IfcBridgePart	IfcBridgePart.Abutment	REFD	Referenzbrücke	UNT	Unterbau	WID	Brückenwiderlager	SFL	Seitenflügel
Widerlagerwand	Wall	IfcBridge	IfcBridgePart	IfcBridgePart.Abutment	REFD	Referenzbrücke	UNT	Unterbau	WID	Brückenwiderlager	WST	Widerlagerwand
Widerlagerwand	Wall	IfcBridge	IfcBridgePart	IfcBridgePart.Abutment	REFD	Referenzbrücke	UNT	Unterbau	WID	Brückenwiderlager	WST	Widerlagerwand

Abbildung 9-2. Für die Modellerstellung verwendete Modellelemente inkl. Angabe der in der Autorensoftware verwendeten Familien (grün), Angaben der IFC-Exporteinstellungen (rot) sowie verwendete vierstufige Datenstruktur (gelb)

Darüber hinaus wird zur eindeutigen Identifizierbarkeit der Modellelemente ein vierstufiges Klassifikationsschema verwendet (gelb markierte Spalten), das sich in die für deutsche Bundesfernstraßen entwickelte Systematik des Objektkatalogs einordnet und mit diesem kompatibel ist. Lediglich die erste Ebene „Bauwerk“ ist hinzugefügt worden, um unterschiedliche Brückentypen abbilden zu können. Jedes Modellelement muss mit vier Attributen entsprechend der Klassifikation versehen werden (Code GIT1 bis Code GIT4). Auf dieser Basis können im DZ spezifische Rechenregeln konfiguriert und eine Ergebnisaggregation auf verschiedenen Ebenen durchgeführt werden. Die benannten Codes werden auch für die Filterung der Ergebnisse verwendet.

Des Weiteren werden insbesondere für den Anwendungsfall 4 alle für die Indikatorenermittlung erforderlichen Attribute in das 3D-Modell integriert. Zur Gewährleistung einer einheitlichen Schreibweise und der Einhaltung von Datentypen werden die zu verwendenden Attribute durch eine in die Autorensoftware einladbare Vorlagedatei bereitgestellt (shared parameter file, Abbildung 9-3). Auf diese Weise können die Modellierungsanforderungen über verschiedene Projekte hinweg einfach weitergegeben werden. Das Setzen der Werte für die einzelnen Attribute erfolgt in der Autorensoftware.

GIT_DemonstratorD_SharedParam

Datei Bearbeiten Ansicht H1 **B** *I*

```
# This is a Revit shared parameter file.
# Do not edit manually.
*META VERSION MINVERSION
META 2 1
*GROUP ID NAME
GROUP 1 Indikatoren
GROUP 2 Bauwerk
*PARAM GUID NAME DATATYPE DATACATEGORY GROUP VISIBLE DESCRIPTION USERMODIFIABLE HIDEWHENNOVALUE
PARAM 40141b00-426c-4dcc-b51e-82c26203c4fe Demontagefaehigkeitsklasse TEXT 1 1 1 0
PARAM 7345e503-1b56-49c4-a706-0539dc6b9b9c Baujahr TEXT 2 1 1 0
PARAM fe97770b-62b1-4bf5-8684-8843581f5ba4 Masse NUMBER 1 1 1 0
PARAM 2084cf37-8db5-4166-ac26-076686b299c4 Schad-Risikostoff-Bezeichnung TEXT 1 1 1 0
PARAM c7c3b94c-1031-4c62-a44d-d528ee205c0e Bewehrungsgrad NUMBER 1 1 1 0
PARAM ca1dc45a-f5e2-4b17-8c22-f5a004fcaa42 Projektbezeichnung TEXT 2 1 1 0
PARAM 17586683-59cd-48dc-b78e-4f1d8dfa93ae Schad-Risikostoff-vorhanden YESNO 1 1 1 0
PARAM b0fcbc8c-ce37-4217-b0fb-77c307a1f912 Materialklasse TEXT 1 1 1 0
PARAM 37ef9db4-a686-4e4a-9085-fb53fb9dce7e Dichte MASS_DENSITY 1 1 1 0
PARAM 17692ad5-67bb-4308-b938-bee28f564ef1 Flaecheninanspruchnahme TEXT 1 1 1 0
PARAM d763cedd-1380-4fda-a96d-2d8939029dc8 Wiederverwendbarkeitsklasse TEXT 1 1 1 0
PARAM f7323ceb-69ff-40da-a96d-4a82717e7a57 Flaecheninanspruchnahme AREA 2 1 1 0
PARAM a723c5f2-a013-443f-9262-ae7c6dd5ded6 Material_Bezeichnung TEXT 1 1 1 0
```

Abbildung 9-3. Bereitstellung der zu verwendenden Attribute als Shared-Parameter-Liste (dateibasiert)

Ein alternativer Weg für die Festlegung der Attributwerte wäre die Zuordnung von Modellelementen zu den Werten in einer separaten Datei über die GUIDs (Global Unique Identifier) der Modellelemente. Auf diese Weise können die Erstellung des geometrischen Modells und die Integration der alphanumerischen Information voneinander getrennt werden. Dies ist vorteilhaft, wenn unterschiedliche Personen für die jeweiligen Informationsarten verantwortlich sind.

Das Ergebnis nach dem Einladen der Vorlagedatei und Zuweisung der Attributwerte in der Autorensoftware Revit ist in Abbildung 9-4 für eine Kappe dargestellt. Es ist ersichtlich, dass die Zuweisung der Attributwerte für alle Modellelemente separat erfolgen muss. Dies kann im dargestellten Eigenschaftsfenster oder in für die Modellelemente erzeugten Listen erfolgen. Für die Integration der alphanumerischen Informationen ist der Modellautor im umgesetzten Prozessablauf verantwortlich.

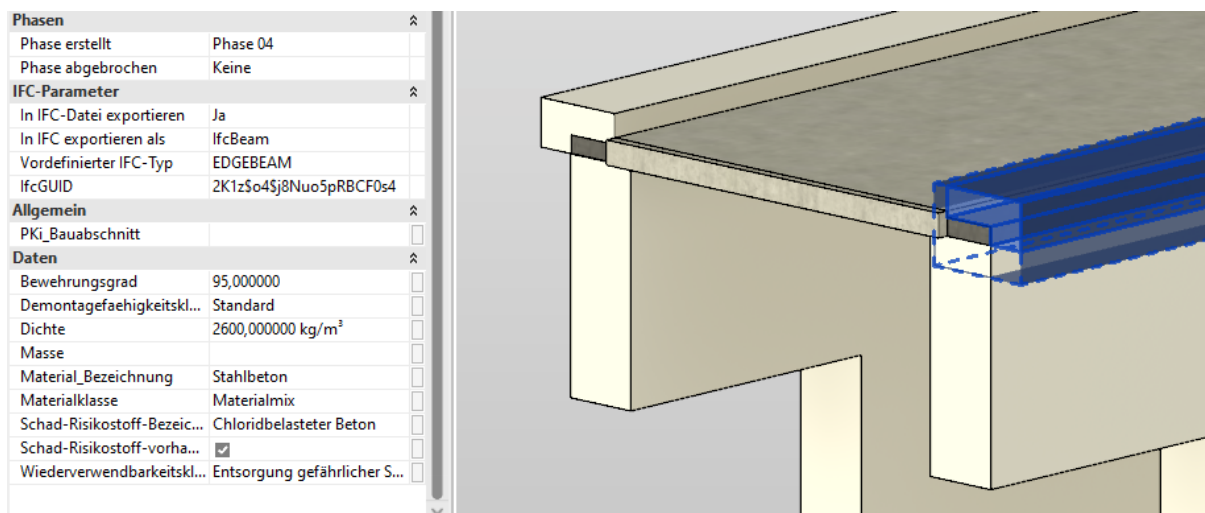


Abbildung 9-4. Verwendung der Shared-Parameter-Liste in der Autorensoftware

9.3.3 IFC-Dateien

Nach der Modellerstellung in der Autorensoftware erfolgt der Export in eine IFC-Datei, die anschließend in den Digitalen Zwilling geladen wird. Für die Verwendbarkeit ist die Einhaltung der Modellstruktur essenziell. Um die eindeutige Speicherung der Attribute in der IFC-Datei sicherzustellen, werden drei projektspezifische PropertySets definiert, in denen alle erforderlichen Attribute (und Klassifikationen) enthalten sind. Dies sind zum einen die Attribute zur Beschreibung der Projektdatenstruktur (PDS), die im PropertySet „PSet_GrIT_PDS“ zusammengefasst werden. Die für den AWF 04 erforderlichen Attribute werden im PropertySet „PSet_GrT_AWF4“ gespeichert, allgemeine Bauwerksdaten im „PSet_GrIT_Bauwerk“. Der Anwendungsfall 01 benötigt für die Umsetzung lediglich die Attribute der Projektdatenstruktur und der Bauwerksebene, daher ist hier keine Definition eines eigenen PropertySets erforderlich.

Zur einheitlichen Umsetzung der Exporteinstellungen werden diese in einer Datei zusammengefasst und den Anwendenden bereitgestellt. Der Inhalt der Exportdatei ist in Abbildung 9-5 dargestellt. Darin wird für alle Modellelemente festgelegt, welche Attribute (in Revit werden Attribute als Eigenschaften bezeichnet) in welchen PropertySets mit spezifischen Namen gespeichert werden müssen. Als Ergebnis werden in dem Digitalen Zwilling weiterverwendbare IFC-Modelle erzeugt.

```

GIT_DemonstratorD_UserDefinedP
+
Datei Bearbeiten Ansicht H1  B I  A

#
# User Defined PropertySet Definition File
# Project: Green Infra Twins (GrIT)
#
# Format:
#   PropertySet:    <Pset Name>          I[instance]/T[type]          <element list separated by '>
#                   <Property Name 1>    <Data type>                <[opt] Revit parameter name, if different from IFC>
#                   <Property Name 2>    <Data type>                <[opt] Revit parameter name, if different from IFC>
#   ...
#
# Data types supported: Area, Boolean, ClassificationReference, ColorTemperature, Count, Currency,
# ElectricalCurrent, ElectricalEfficacy, ElectricalVoltage, Force, Frequency, Identifier,
# Illuminance, Integer, Label, Length, Logical, LuminousFlux, LuminousIntensity,
# NormalisedRatio, MassDensity, PlaneAngle, Positivelength, PositivePlaneAngle, PositiveRatio,
# Power, Pressure, Ratio, Real, Text, ThermalTransmittance, ThermodynamicTemperature, Volume,
# VolumetricFlowRate
#

#Projektinformationen an allen enthaltenen Ifc-Klassen
PropertySet:  PSet_GrIT_PDS    I    IfcPile, IfcFooting, IfcWall, IfcBeam, IfcSlab, IfcPavement, IfcBearing, IfcDiscreteAccessory
              Code_GrIT-L1    Text  Code-L1
              Code_GrIT-L2    Text  Code-L2
              Code_GrIT-L3    Text  Code-L3
              Code_GrIT-L4    Text  Code-L4

#Projektinformationen an allen enthaltenen Ifc-Klassen
PropertySet:  PSet_GrIT_AWF4    I    IfcPile, IfcFooting, IfcWall, IfcBeam, IfcSlab, IfcPavement, IfcBearing, IfcDiscreteAccessory
              Bauteil_Bezeichnung Text Typ
              Material_Bezeichnung Text Material_Bezeichnung
              Volumen Volumen Volumen
              Dichte Real Dichte
              Masse Real Masse
              Bewehrungsgrad Real Bewehrungsgrad
              Materialklasse Text Materialklasse
              Schad-Risikostoff-vorhanden Boolean Schad-Risikostoff-vorhanden
              Schad-Risikostoff-Bezeichnung Text Schad-Risikostoff-Bezeichnung
              Demontagefaehigkeitsklasse Text Demontagefaehigkeitsklasse
              Wiederverwendbarkeitsklasse Text Wiederverwendbarkeitsklasse

#Projektinformationen am Nullkörper (nur ein Modellelement)
PropertySet:  PSet_GrIT_Bauwerk I    IfcBridge
              Flaecheninanspruchnahme Area Flächeninanspruchnahme
              Baujahr Text Baujahr
              Projektbezeichnung Text Projektbezeichnung
#

```

Abbildung 9-5. Bereitstellung der IFC-Exporteinstellungen als dateibasiertes Übergabeformat

Das Ergebnis nach dem Export kann mit IFC-Viewern kontrolliert werden. In Abbildung 9-6 sind für das Modellelement Kappe am linken unteren Rand die im PropertySet „PSet_GrIT_AWF4“ enthaltenen Attribute dargestellt.

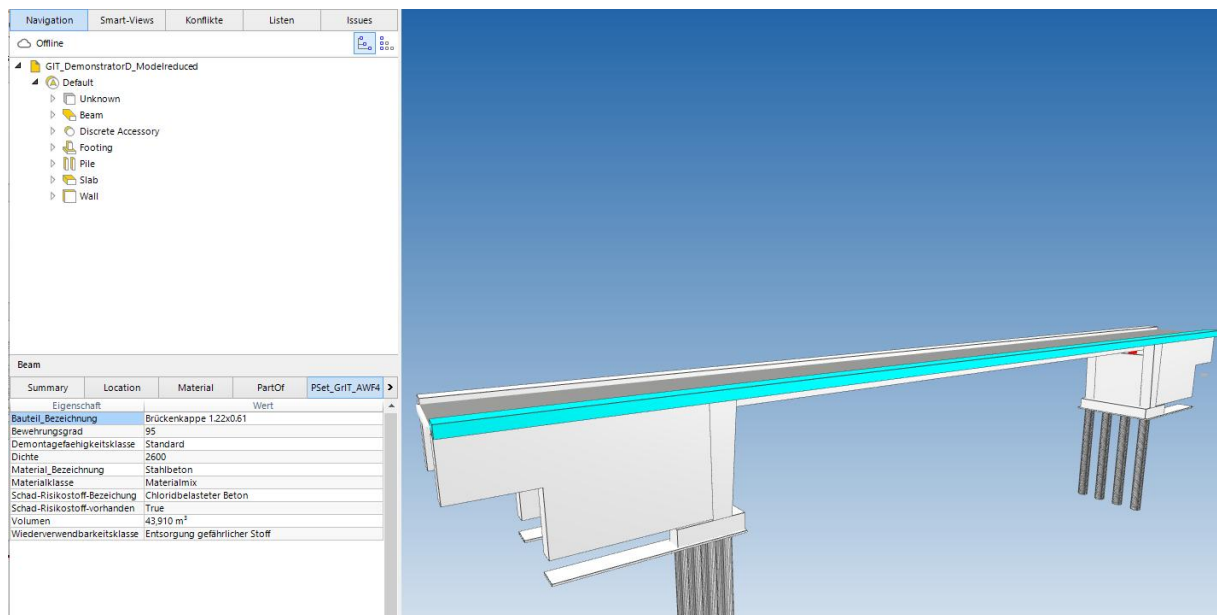


Abbildung 9-6. Ergebnis des IFC-Export, hier: Attributliste AWF 4 angezeigt in einem IFC-Viewer

Die Abbildung 9-7 zeigt für dasselbe Modellelement der Kappe die Attribute zur Elementklassifikation auf Basis der Projektdatenstruktur (im PSet_GrIT_PDS). Die eingetragenen Attributwerte sind die Basis für die Aufbereitung der Ergebnisse im DZ, siehe auch Abschnitt 7.5.5.

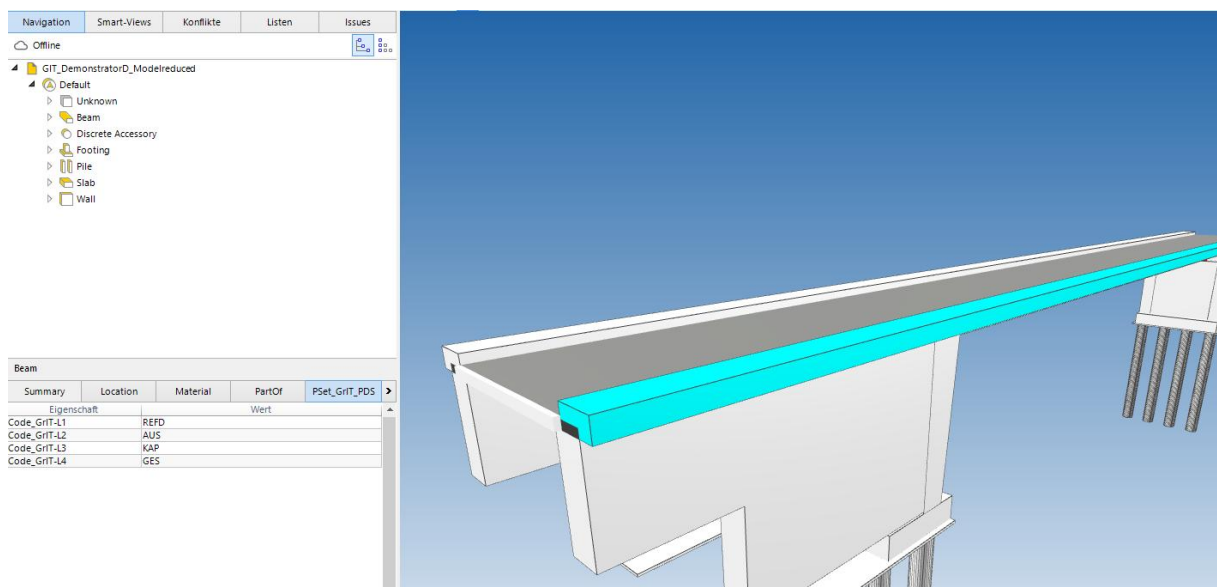


Abbildung 9-7. Ergebnis des IFC-Exports, hier: Datenstruktur angezeigt in einem IFC-Viewer

9.3.4 Weitere Daten

Insbesondere die Datenbereitstellung für den AWF 01 – Betriebsprozesse erfolgt auf Basis von mindestens jährlich zu erhebenden Prozessdaten. Für den aufgesetzten Demonstrator werden die Ergebnisse dateibasiert in den Digitalen Zwilling integriert. Für eine praktische Anwendung ist es empfehlenswert, eine Eingabe über ein Formularsystem aufzubauen, um die Verwendbarkeit durch eine Vielzahl von ausführenden Firmen sicherzustellen.

Das Formularsystem kann über eine internetbasierte Oberfläche bereitgestellt werden, die Daten werden in einer zentralen Datenbank erfasst. Diese Daten werden dann über den Linked-Data-Ansatz mit dem 3D-Modell verknüpft. Dazu muss die verwendete Projektdatenstruktur in den Formularen integriert sein, sodass den Anwendenden die Möglichkeit gegeben wird, die Eingaben räumlich zu verorten. Auf diese Weise wird eine Datenverwendbarkeit im Digitalen Zwilling sichergestellt.

9.4 Details zum Demonstrator Schweiz

9.4.1 Einführung

Für die Brücke am Berner Ostring (siehe Kapitel 7.3), die Gegenstand des Anwendungsfalls 2 war, wurden die Auswirkungen von zwei Maßnahmenvarianten auf die Nachhaltigkeitsindikatoren verglichen. Die Maßnahme 1 wurde tatsächlich durchgeführt, die Maßnahme 2 wurde für die Zwecke dieses Projekts ausgearbeitet, um eine Alternative zu untersuchen und die Verwendung des Prototyps zu demonstrieren. Maßnahme 1 umfasste zwei Aktivitäten:

- Aktivität Abbruch – folgende Elemente wurden von der Brücke entfernt
 - zwei Lärmschutzwände, Sicherheitsausrüstung,
 - Brückenbelag, Abdichtung, zwei Fahrbahnübergänge, 5 x Lager (Wiederlager Thun)
 - drei Leitmauern mit Bewehrung
- Aktivität Einbau – folgende Elemente wurden nach dem Abbruch eingebaut (Variante 1)
 - In den 7 Stützenreihen: Pilze mit Bewehrung & Schrägdübel und Durchstanzdübelgruppen
 - Auf dem Hauptträger: Querkraftdübelgruppen & Aufbeton (8 cm dick) mit Bewehrung
 - zwei Leitmauern mit Bewehrung; Abdichtung; Brückenbelag; Leitmauer in der Mitte
 - zwei Fahrbahnübergänge, 7 x Lager (WL Thun), zwei Lärmschutzwände.

In Maßnahme 1 wurden für alle Stahlbetonelemente Beton der Klasse C30/37 sowie Bewehrungsstahl der Klasse B500B verwendet. Für Maßnahme 2 wurde angenommen, dass der Abbruch identisch mit dem Abbruch in Maßnahme 1 erfolgt. Die Unterschiede im Einbau (Variante 2) betreffen drei Bauteile (zwei Leitmauern und den Aufbeton), für die angenommen wurde, dass sie aus UHFB und B500B bestehen. Da UHFB als wasserbeständig gilt, konnte auf eine Abdichtung zwischen Hauptträger und Aufbeton verzichtet werden. Alle übrigen Bauteile und Materialien wurden identisch mit Variante 1 angenommen. Weitere Gründe für die Wahl von Variante 2 waren, dass einige UHFB-Elemente schlanker ausgeführt werden können und nur eine minimale oder gar keine Bewehrung benötigen (siehe Abbildung 9-8 und Tabelle 13) sowie die kürzere erforderliche Aushärtungszeit.

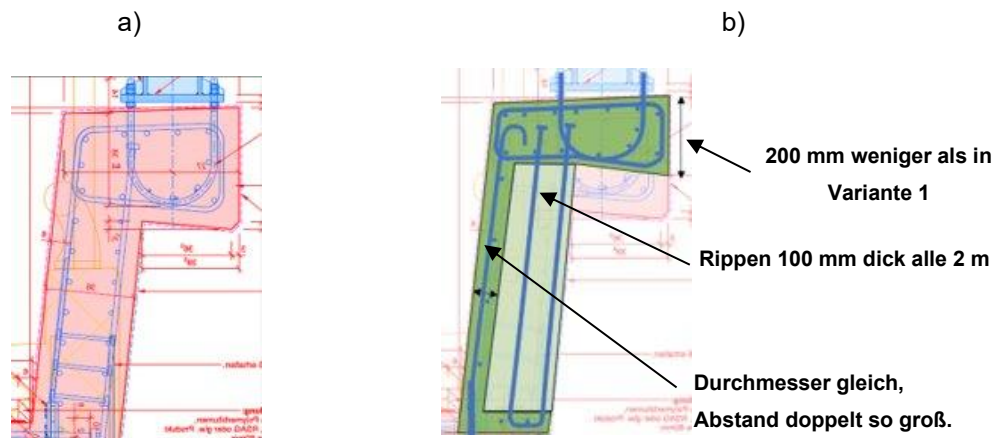


Abbildung 9-8: Unterschiedliche Detaillierung der Leitmauer in den Varianten 1 (a) und 2 (b)

Element	Variante 1		Variante 2	
	Materialien			
	C30/37 [m³]	B500B [t]	UHFB [m³]	B500B [t]
Aufbeton	297.6	105.9	297.6	0.0
2 x Leitmauer	206.5	36.1	104.8	20.5
Total:	504.1 m³	142.0 t	402.4 m³	20.5 t

Tabelle 13: Menge der verwendeten Materialien der Varianten 1 und 2

Verfügbare Informationen:

- KUBA-Daten (Bauwerksteile und ihre Merkmale)
- Projektunterlagen (Technischer Bericht, Bestandspläne, Bau-/Detailpläne)

Nicht berücksichtigt in der Analyse oder Modellierung:

- Instandsetzung der beschädigten Elemente
- Unterschied in der Verlängerung der Lebensdauer für zwei untersuchte Maßnahmen

9.4.2 Aufbereitung der Eingabedaten für Nachhaltigkeitsindikatoren

Für die Nachhaltigkeitsbewertung werden pro Nachhaltigkeitsdimension (Ökologie, Ökonomie und Sozio-kultur) zwei Indikatoren ausgewählt, um die Unterschiede zwischen den beiden Maßnahmevarianten zu analysieren.

Ökologische Indikatoren: Global Warming Potential (GWP) [kg CO₂ Äqv]; Cumulative Energy Demand (CED) [MJ]

Für die Berechnung der Indikatoren wurden Eingangsdaten aus der Umweltdatenbank Ökobaumat verwendet (Werte für Abbruch - Module C und den Einbau Module - A). UHFB ist aktuell nicht in der Datenbank enthalten, jedoch können die Werte anhand der Grundmaterialien, die in UHFB enthalten sind (Zement, Wasser, Fasern, Quarzmehl), abgeschätzt werden. Hierzu wurden Annahmen zu den verwendeten Materialien auf der Grundlage von Bertola and Brühwiler (2025) [128] getroffen. Folgende Werte wurden für den Einbau von UHFB (1m^3 : GWP = 800 kg CO₂ Äqv. ; PERT = 1.000 MJ; PENERT = 4.100 MJ) angenommen; e.g. aus Ökobaumat für C30/37 (Firmengruppe Max Bögl) (1m^3 : GWP= 175,2 kg CO₂ Äqv.; PERT= 183,4 MJ; PENERT=578,1 MJ).

Folgende Hypothesen wurden aufgestellt:

- Geringerer Materialverbrauch bei UHFB, aber höherer Energiebedarf (CED) und höhere Emissionen (GWP) bei der Einbau.
- Keine Abdichtung in Variante 2 führt zu weniger Kosten und geringeren Auswirkungen auf CED und GWP.

Ökonomische Indikatoren: Material- und prozessbezogene Kosten [EUR]

Für die ausgeführte Variante 1 lagen lediglich grobe Kostenschätzungen für verschiedene Aktivitäten vor. Daher wurden die Kosten für die Varianten auf Basis von Leistungsverzeichnissen mehrerer ausgeführter Projekte abgeschätzt. Die Herausforderung bestand darin, zwischen Kostenkategorien für Materialmengen und bauprozess- bzw. aktivitätsbezogenen Kosten im Zusammenhang mit dem Material zu differenzieren. Leistungsverzeichnisse sind in den meisten Fällen auf Aktivitätsebene angegeben und berücksichtigen sowohl Material als auch die Komplexität einer bestimmten Bauphase bzw. eines Bauprozesses für bestimmte Elemente. Zudem werden für Kostenschätzungen teilweise andere Einheiten für Bauelemente verwendet (z. B. Stück), während die zugehörigen Einheiten in Umwelt-Datenbanken materialbezogen angegeben sind (z. B. Fläche, Volumen oder Masse). Zur Vereinfachung wurde daher die Menge eines spezifischen Materials (d. h. nicht an ein einzelnes Element gebunden) sowohl für die Berechnung der ökonomischen als auch der ökologischen Indikatoren verwendet. Die in der Tabelle 14 aufgeführten Werte wurden im GrIT-Prototyp vorab als JSON-Datei zur Verfügung gestellt.

Baumaterial	Einheit	Abbruch (CHF)	Einbau (CHF)
Beton	m ³	40	720
UHFB	m ³	-	6.000
Bewehrung	Tonne	40	1.200
Baustahl	Tonne	50	14.500
Asphalt	kg	0,015	0,6
Elastomer	kg	6	1.200
Polymergebundenes Material	kg	1	18
Polymermodifizierten Bitumen	m ²	6	125

Tabelle 14: Übernommene Kosten für spezifische Baumaterialien

Folgende Hypothesen wurden aufgestellt:

- Geringerer Materialverbrauch bei Variante 2, aber kostenintensiver in der Produktion (Materialkosten) sowie bei den prozessbezogenen Kosten.
- Keine Abdichtung in Variante 2 führt zu weniger Kosten.

Sozio-kulturelle Indikatoren: Reisezeitverluste [Stunden], Unfallrate [Zahl der Unfälle]

Hier basieren die Eingangswerte für die Berechnung auf den Eigenschaften der Arbeitszone. Im Bauprojekt gab es vier Zonen, die durch die komplexe Brückengeometrie und die Bau- und Verkehrsanforderungen erforderlich waren. Dazu wurde in der Modellierung eine Vereinfachung vorgenommen: Im GriT-Prototyp kann man zwischen 2 und 3 Zonen wählen, und die Geschwindigkeit in der Arbeitszone kann 60 oder 80 km/h betragen. Die Anzahl der Fahrzeuge wird mit 80.000 Fz./24h angenommen. Die ursprüngliche Geschwindigkeit im Normalbetrieb wurde mit 100 km/h angenommen. Die Dauer der Maßnahme 1 betrug insgesamt 90 Tage (30 Tage Abbruch + 60 Tage Variante 1), und im Fall von Maßnahme 2 wurden 70 Tage angenommen (30 Tage Abbruch + 40 Tage Variante 2). Es wird davon ausgegangen, dass es aufgrund der reduzierten Kapazität während der Arbeiten auf der Brücke zu keinen Verkehrsbehinderungen kommen wird. Alle Verkehrsteilnehmende, die mit reduzierter Geschwindigkeit über die Brücke fahren, werden entlang der gesamten Länge der Baustelle erfasst, um die Zeitverluste während der Dauer der Maßnahme zu ermitteln.

Zur Bewertung der Anzahl an Unfällen (Personenschaden) wurde ein im Rahmen des InfraROB-Projekts [129] entwickelter Ansatz, der auf einer agentenbasierten Simulationen beruht, verwendet (Abbildung 9-9). Die entsprechende Bewertung ist standort- bzw. tätigkeitsspezifisch und berücksichtigt die folgenden Hauptkategorien von Parametern:

- **Geometrie der Arbeitszone:** Die gesamte Länge der Brücke wird berücksichtigt als Arbeitszone. Die Anzahl der Arbeitsphasen bestimmt die durchschnittliche Breite der Arbeitszone. In der Arbeitszone können die Arbeiter auch verletzt werden, wenn Maschinen in Betrieb sind. Von Bedeutung ist hierbei, wie die Verkehrsführung entlang des Baustellenfeldes erfolgt (einseitige oder zweiseitige Führung des Verkehrs).
- **Anzahl der Fahrzeuge (DTV) und die Geschwindigkeit entlang der Arbeitszone:** Die potenzielle Gefahr für die Sicherheit geht von den Fahrzeugen aus, die in der Arbeitszone fahren. Dies wirkt sich auf die Eintrittswahrscheinlichkeit (und Schwere) eines Unfalls aus, bei dem ein Bauarbeiter verletzt werden kann.
- **Anzahl der Bauarbeiter und Maschinen und die Art der Tätigkeiten, die in der Arbeitszone durchgeführt werden:** Nicht alle Bauarbeiter sind in gleicher Weise unfallgefährdet. Im Allgemeinen bedienen einige Bauarbeiter Maschinen, während sich andere frei in der Zone bewegen. Der Einsatz von Maschinen folgt einem Arbeitsprozess, aber das Verhalten der anderen Bauarbeiter ist zufällig.

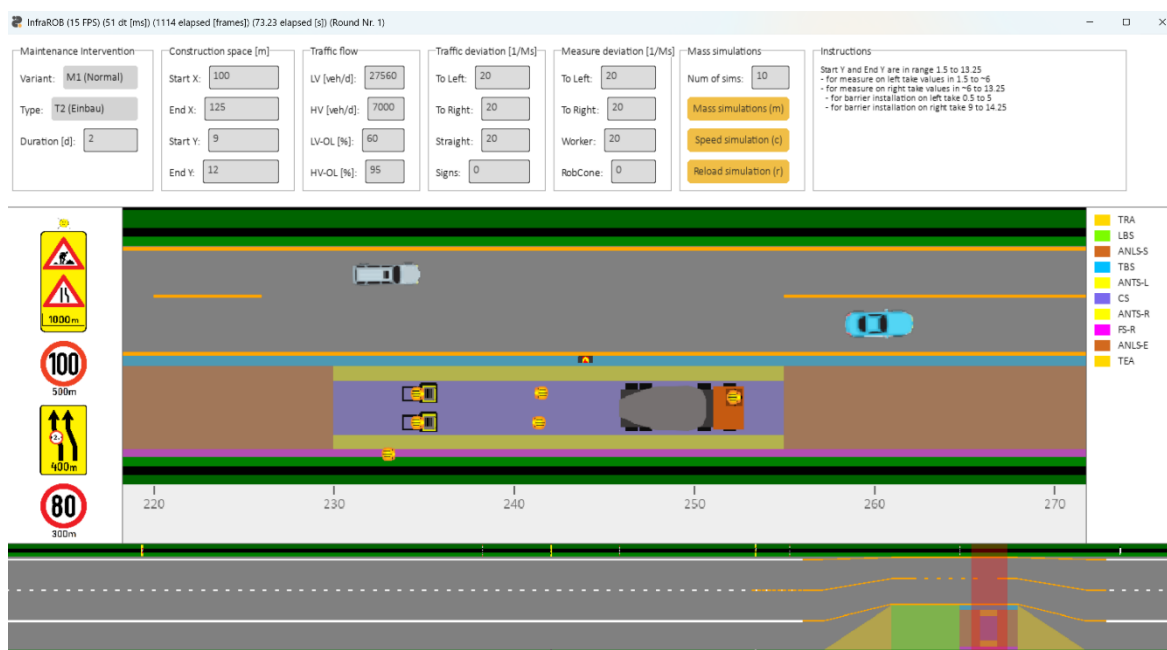


Abbildung 9-9. Aufbau einer Simulation im InfraROB-Tool - Variante 1

Es wurden drei Aktivitäten (inkl. Maschinen, Bauarbeiter) modelliert – **Abbruch, Einbau (C30/37) und Einbau (UHFB)** – sowie zwei Typen von Unfällen auf der Baustelle, d.h. mit bzw. ohne Verkehr, für die beiden Fälle (zwei bzw. drei Arbeitszonen) ergeben sich insgesamt **12 verschiedene Simulationen** im InfraROB-Tool. Die Ergebnisse stehen tabellarisch in einer .xls-Datei zur Verfügung (Tabelle 15) und werden im GriT-Prototyp weiterverwendet.

Tabelle 15: Ergebnisse der 12 Simulationen aus dem InfraROB-Prototyp

Aktivität	Anzahl der Arbeitszonen	zul. Geschwindigkeit [km/h]	Unfälle/Tag (mit_Verkehr)	Unfälle/Tag (ohne_Verkehr)
Abbruch	2	60	0,0002188	0,0001044
Einbau (Variante 1)	2	60	0,0001897	0,0001429
Einbau (Variante 2)	2	60	0,0002136	0,0000684
Abbruch	3	80	0,0003756	0,0001080
Einbau (Variante 1)	3	80	0,0003839	0,0001128
Einbau (Variante 2)	3	80	0,0003807	0,0000760
Abbruch	2	80	0,0003036	0,0001008
Einbau (Variante 1)	2	80	0,0002911	0,0001152
Einbau (Variante 2)	2	80	0,0002838	0,0000732
Abbruch	3	60	0,0003122	0,0001028
Einbau (Variante 1)	3	60	0,0002885	0,0001409
Einbau (Variante 2)	3	60	0,0003045	0,0000700

Aus den Ergebnissen geht hervor, dass Variante 1 bei Unfällen innerhalb der Arbeitszone die schlechtesten Ergebnisse aufweist, gefolgt von der Abbruchaktivität, während Variante 2 die niedrigsten Zahlen aufweist. In Fällen, in denen Unfälle durch Verkehrsverstöße innerhalb der Arbeitszone verursacht werden, weisen alle drei Szenarien ähnliche Ergebnisse auf, wobei der Abbruch erneut die höchsten Auswirkungen zeigt.

Folgende Hypothesen wurden aufgestellt:

- Unterschiede sind ebenfalls in der Arbeitssicherheit aufgrund der verwendeten Maschinen und des Engagements der Bauarbeiter (Unfallrate) zu erwarten.
- Kürzere Aushärtungszeit für UHFB führt zu weniger Verkehrsbehinderungen (d. h. geringere Reisezeitverluste).

Die Ergebnisse der Indikatorberechnung im GrIT-Prototyp werden in Kapitel 7.5 erläutert.

9.4.3 BIM-Modellgenerierung und semantische Anreicherung

Um die Eigenschaften der beiden Maßnahmenvarianten zu erfassen und die Berechnung der Nachhaltigkeitsindikatoren zu ermöglichen, wurden drei BIM-Modelle entwickelt:

- Modell 1.ifc: Fokus auf Abbruch-Elementen (Abbildung 9-10)
- Modell 2.ifc: Fokus auf Einbau-Elementen für Variante 1 (Abbildung 9-11)
- Modell 3.ifc: Fokus auf Einbau-Elementen für Variante 2 (Abbildung 9-12)

Details werden insbesondere auf die Elemente gelegt, die aus dem Bauwerk entfernt oder hinzugefügt wurden (Modelle 1,2,3), während die übrigen Elemente mit einem geringeren

Detaillierungsgrad modelliert werden (diese sind in den Modellen in grau dargestellt). Um die Gesamtwirkung der Maßnahme korrekt zu erfassen, wurden daher alle Elemente der Brücke modelliert – nicht nur jene, die sich zwischen Variante 1 und Variante 2 unterscheiden (in den Modellen ist angegeben, zu welcher Aktivität sie gehören). Daher war es beabsichtigt, die Geometrie der Bauwerkselemente inkl. Bewehrung basierend auf Bestands- und Bauplänen. Die BIM-Modelle wurden mit einem Level of Detail (LOD) von 350 erstellt:

- Autodesk Revit 2025 wurde für die Entwicklung der Elemente verwendet (Building Element Proxy; IFC 4), während ALLPLAN 2025 für die Bewehrung eingesetzt wurde. Die Bewehrung wurde für alle Betonelemente modelliert, die im Umfang von Abbruch oder Einbau enthalten sind.
- Die Revit- und Allplan-Dateien wurden mithilfe interner heuristischer Python-Skripte zu einzelnen IFC-Dateien zusammengeführt, um sie zu einzelnen IFC-Modellen zu verknüpfen und die Modelle 1, 2 und 3 zu erstellen.

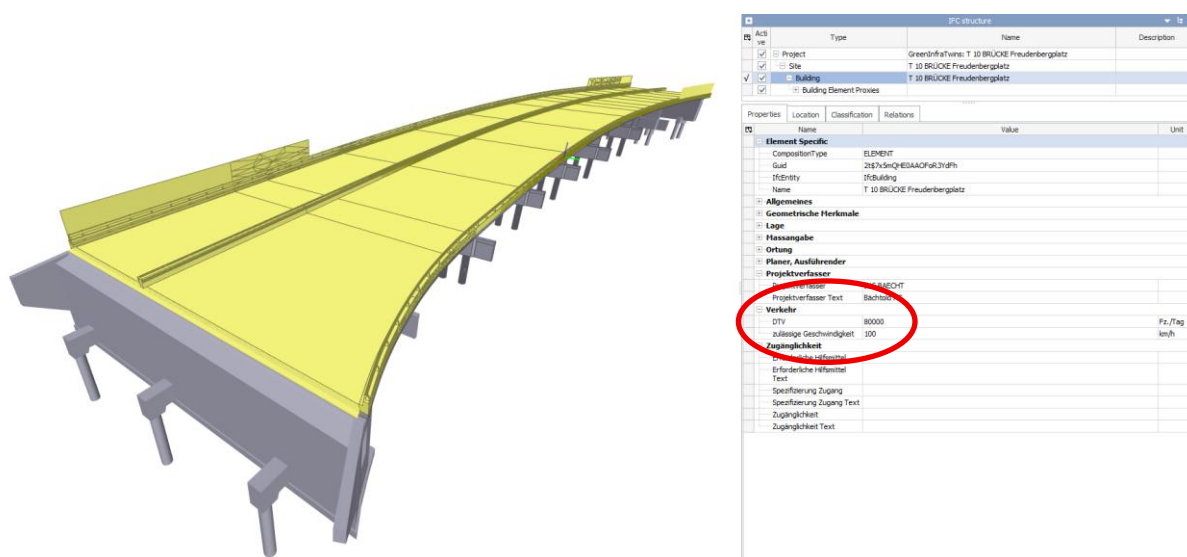
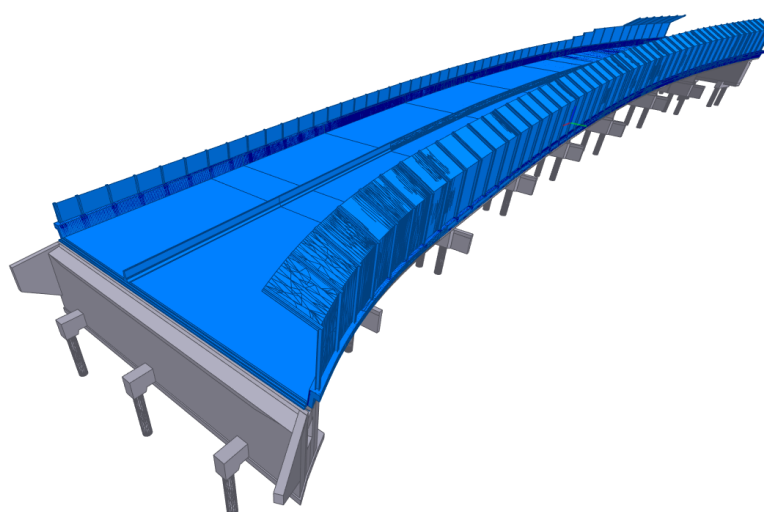
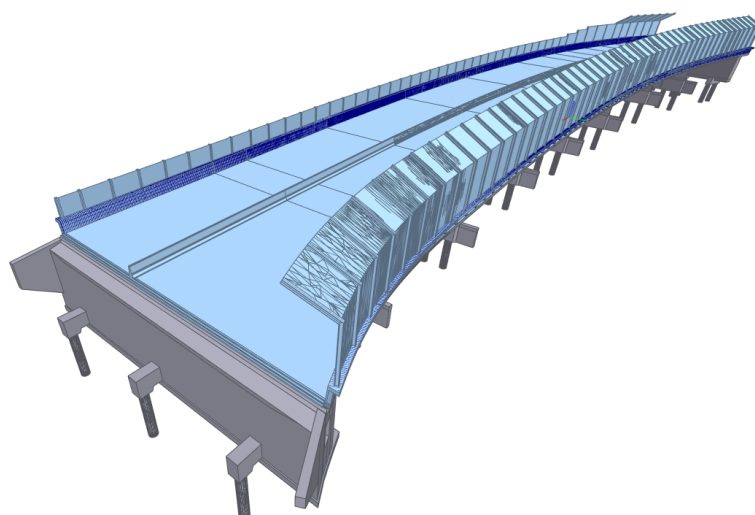


Abbildung 9-10. Model 1: Abbruch - Die Elemente für Abbruch sind in gelb dargestellt; die Merkmale auf Brückenebene, die in die Berechnung einbezogen wurden, sind eingekreist. (BIM Vision 2.27)



Act	Type	Name	Description
Project		GreenInfraTwins: T 10 BRÜCKE ...	
Site		T 10 BRÜCKE Freudenberglatz	
Building		T 10 BRÜCKE Freudenberglatz	
Building Element Proxy	111.1	Widerlager Bern	
Building Element Proxy	111.2	Widerlager Thun	
Building Element Proxy	131.2	Stützenreihe Ave 2	
Building Element Proxy	131.2-2	Beton-Pilze	
Building Element Proxy	131.2-3	Bewehrung-Pilze	
Building Element Proxy	131.2-4	Durchstandsübelgrup...	
Building Element Proxy	131.3	Stützenreihe Ave 3	
Building Element Proxy	131.3-2	Beton-Pilze	
Building Element Proxy	131.3-3	Bewehrung-Pilze	
Building Element Proxy	131.3-4	Durchstandsübelgrup...	
Building Element Proxy	131.4	Stützenreihe Ave 4	
Building Element Proxy	131.4-2	Beton-Pilze	
Building Element Proxy	131.4-3	Bewehrung-Pilze	
Building Element Proxy	131.4-4	Durchstandsübelgrup...	
Building Element Proxy	131.5	Stützenreihe Ave 5	
Building Element Proxy	131.5-2	Beton-Pilze	
Building Element Proxy	131.5-3	Bewehrung-Pilze	
Building Element Proxy	131.5-4	Durchstandsübelgrup...	
Building Element Proxy	131.6	Stützenreihe Ave 6	
Building Element Proxy	131.6-2	Beton-Pilze	
Building Element Proxy	131.6-3	Bewehrung-Pilze	
Building Element Proxy	131.6-4	Durchstandsübelgrup...	
Building Element Proxy	131.7	Stützenreihe Ave 7	
Building Element Proxy	131.7-2	Beton-Pilze	
Building Element Proxy	131.7-3	Bewehrung-Pilze	
Building Element Proxy	131.7-4	Durchstandsübelgrup...	
Building Element Proxy	131.8	Stützenreihe Ave 8	
Building Element Proxy	131.8-2	Beton-Pilze	
Building Element Proxy	131.8-3	Bewehrung-Pilze	
Building Element Proxy	131.8-4	Durchstandsübelgrup...	

Abbildung 9-11. Model 2: Variante 1 - Die Elemente für Einbau sind in dunkelblau dargestellt; die Hierarchie der Elemente ist rechts dargestellt. (BIM Vision 2.27)



Act	Type	Name	Description
Project		GreenInfraTwins: T 10 BRÜCKE ...	
Site		T 10 BRÜCKE Freudenberglatz	
Building		T 10 BRÜCKE Freudenberglatz	
Building Element Proxies			
Building Element Proxy	111.1	Widerlager Bern	
Building Element Proxy	111.2	Widerlager Thun	
Building Element Proxy	131.2	Stützenreihe Ave 2	
Building Element Proxy	131.2-2	Beton-Pilze	
Building Element Proxy	131.2-3	Bewehrung-Pilze	
Building Element Proxy	131.2-4	Durchstandsübelgrup...	
Building Element Proxy	131.3	Stützenreihe Ave 3	
Building Element Proxy	131.3-2	Beton-Pilze	
Building Element Proxy	131.3-3	Bewehrung-Pilze	
Building Element Proxy	131.3-4	Durchstandsübelgrup...	
Building Element Proxy	131.4	Stützenreihe Ave 4	
Building Element Proxy	131.4-2	Beton-Pilze	
Building Element Proxy	131.4-3	Bewehrung-Pilze	
Building Element Proxy	131.4-4	Durchstandsübelgrup...	
Building Element Proxy	131.5	Stützenreihe Ave 5	
Building Element Proxy	131.5-2	Beton-Pilze	
Building Element Proxy	131.5-3	Bewehrung-Pilze	
Building Element Proxy	131.5-4	Durchstandsübelgrup...	
Building Element Proxy	131.6	Stützenreihe Ave 6	
Building Element Proxy	131.6-2	Beton-Pilze	
Building Element Proxy	131.6-3	Bewehrung-Pilze	
Building Element Proxy	131.6-4	Durchstandsübelgrup...	
Building Element Proxy	131.7	Stützenreihe Ave 7	
Building Element Proxy	131.7-2	Beton-Pilze	
Building Element Proxy	131.7-3	Bewehrung-Pilze	
Building Element Proxy	131.7-4	Durchstandsübelgrup...	
Building Element Proxy	131.8	Stützenreihe Ave 8	
Building Element Proxy	131.8-2	Beton-Pilze	
Building Element Proxy	131.8-3	Bewehrung-Pilze	
Building Element Proxy	131.8-4	Durchstandsübelgrup...	

Abbildung 9-12. Model 3: Variante 2 - Die Elemente für den Einbau sind in hellblau dargestellt; die Hierarchie der Elemente ist rechts dargestellt. (BIM Vision 2.27)

Im Hinblick auf die semantische Anreicherung wurden die Elemente entsprechend der Elementstruktur der schweizerischen KUBA-Datenbank gruppiert, wobei die gleichen Merkmalsstrukturen und der Inhalt beibehalten wurden. Für die Elemente, die nicht in KUBA existieren – aus Beton (Pilze und Aufbeton) und Stahl (Bewehrung, verschiedene Dübelgruppe) – wurden eigene Merkmalsgruppen als separate Elemente erstellt, entsprechend der Hierarchie der Elemente durch Benennung. Die auf Brückenebene hinzugefügten Merkmale beziehen sich auf die Verkehrsinformationen (DTV und zulässige Geschwindigkeit als numerische Felder), die für die Berechnung erforderlich sind (Abbildung 9-10. Darüber hinaus wurden die für eine Nachhaltigkeitsbewertung erforderlichen

Informationen als Nachhaltigkeitsmerkmalgruppe zu jedem Brückenelement im Model mit den Merkmalen hinzugefügt:

- Activity Type (Textfeld; Identifier für Aktivität Abbruch, Einbau, -)
- EPD-Bezogene Menge (numerisches Feld; die Einheit ist vordefiniert für jede Kombination von Element & Material)
- EPD-Verbindung (Textfeld – der Link zum Ökobaudat oder lokale Speicher)

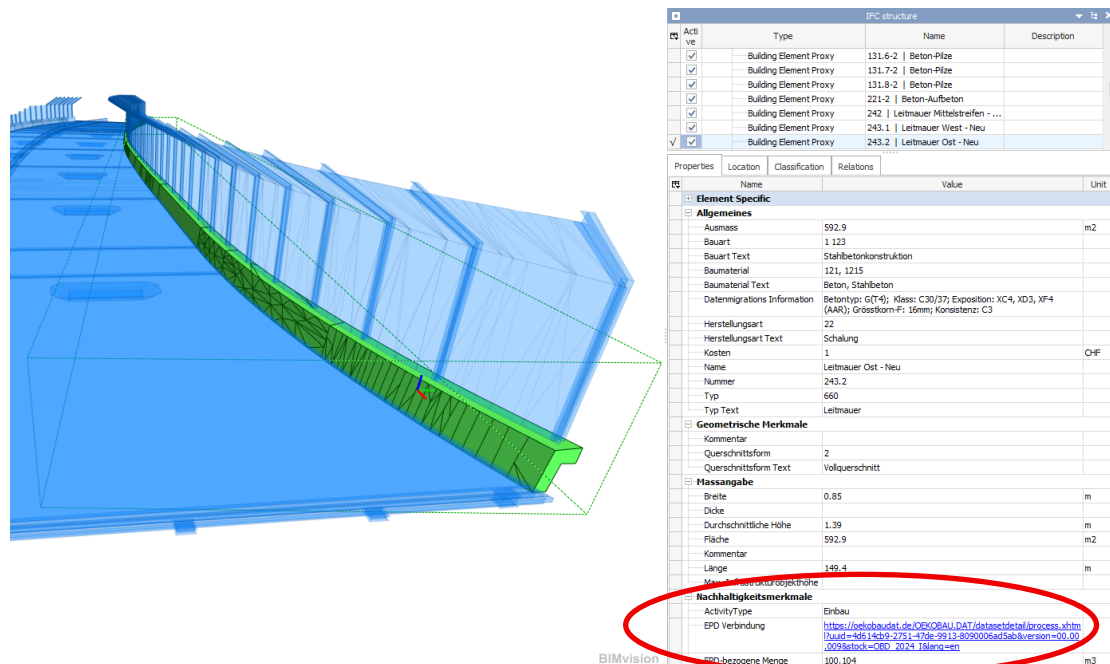


Abbildung 9-13. Model 2: Variante 1 - Merkmale für Element 243.2 Leitmauer Ost – Neu, einschließlich der zusätzlichen Nachhaltigkeitseigenschaften (eingekreist) (BIM Vision 2.27)

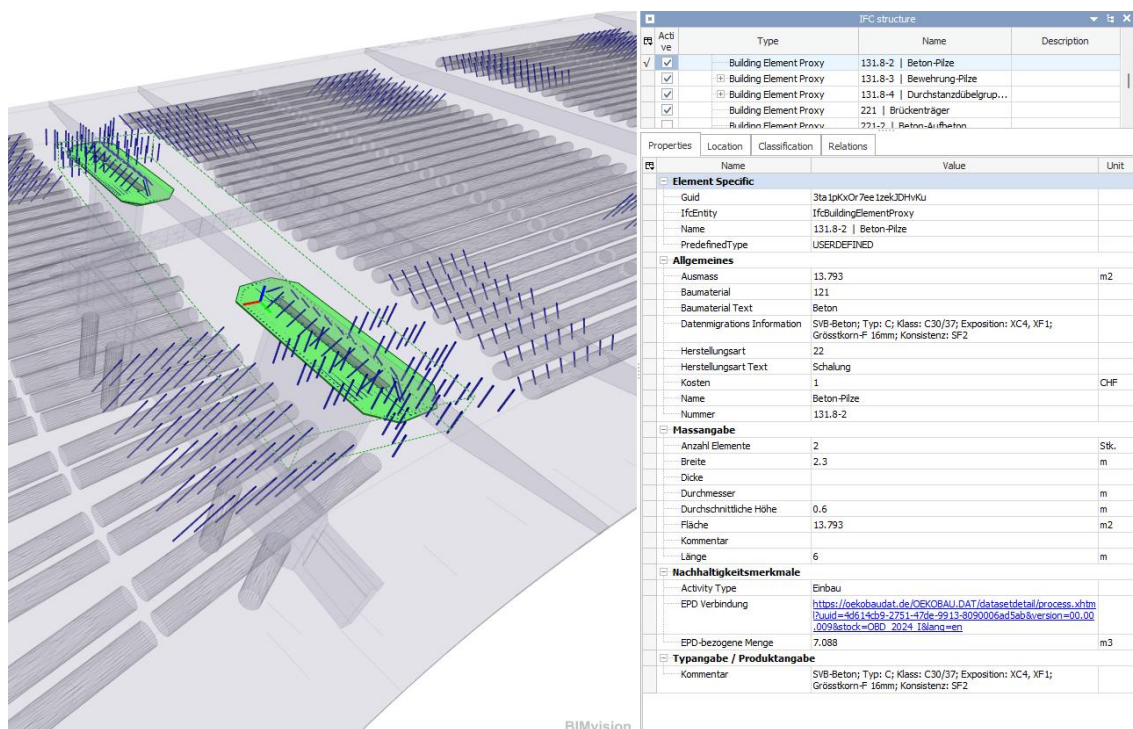


Abbildung 9-14. Model 2: Variante 1, Merkmale für Element 131.8-2 Beton-Pilze in Stützenreihe Achse 8. (BIM Vision 2.27)

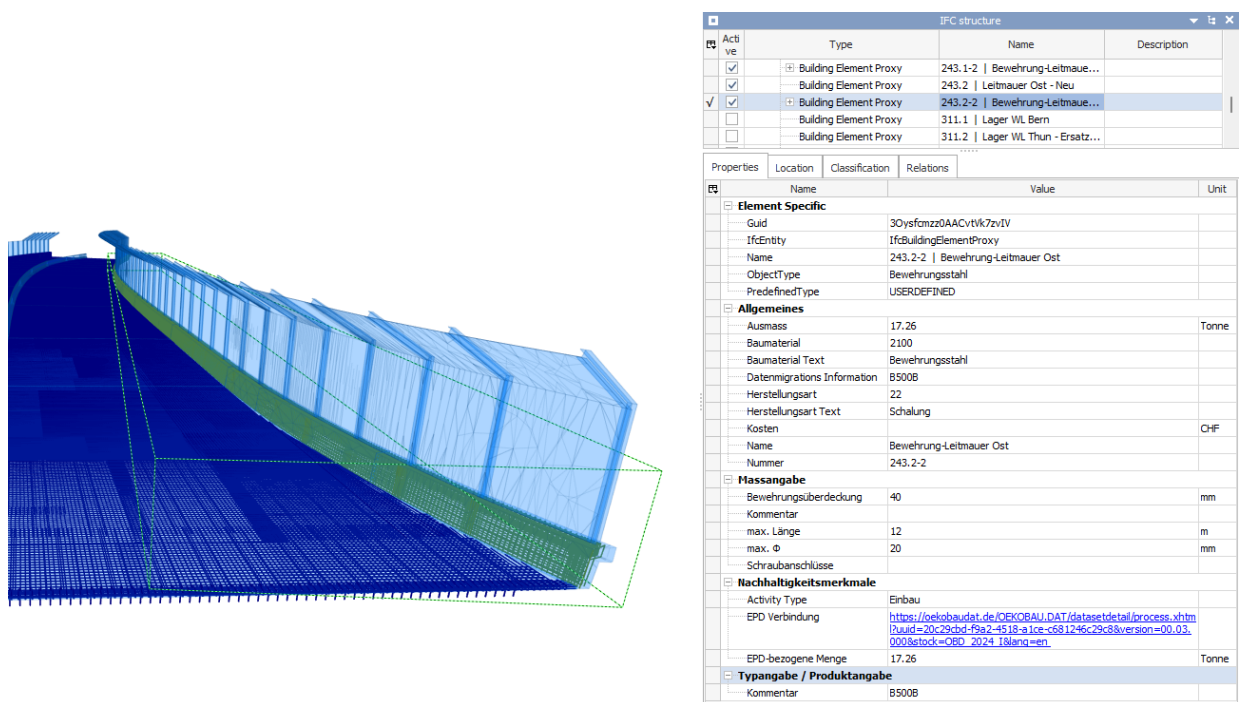


Abbildung 9-15. Model 2: Variante 1, Merkmale für Element Bewehrung-Leitmauer Ost (BIM Vision 2.27)

Um eine hohe Nutzerfreundlichkeit (Performance) bei der Darstellung im BIM-Viewer des GrIT-Prototyps zu ermöglichen, wurden die entwickelten Modelle entsprechend angepasst. Die Bewehrungselemente wurden aus den Modellen 1, 2 und 3 entfernt, sodass diese nur noch die Elemente enthalten, die im Fokus stehen, während alle übrigen Elemente, die sich nicht ändern, in ein separates Modell übertragen wurden. Die zugehörigen .ifc-Dateien sind:

1. AwF2_CH_As_built.ifc (enthält nur die abgerissenen Elemente)
2. AwF2_CH_As_Var1_Beton.ifc (enthält nur die Elemente, die in Variante 1 gebaut werden)
3. AwF2_CH_As_Var2_UHPC.ifc (enthält nur die Elemente, die in Variante 2 gebaut werden)
4. AwF2_CH_As_Remaining.ifc (enthält nur die Elemente, die sich nicht ändern)

9.5 Details zum Demonstrator Österreich

9.5.1 Einführung

Die Seitenhafenbrücke in Wien wird als Demonstrationsbauwerk für die Fallstudien ausgewählt. Die Brücke ist in Abbildung 9-16 dargestellt. Die Straßenbrücke wurde 2011 für den Verkehr freigegeben und weist eine Gesamtlänge von 128,69 m sowie eine Breite von 15,00 m auf. Sie ist als integrales Bauwerk konzipiert und besteht aus einem fünf-feldrigen vorgespannten Stahlbetonüberbau, der von V-förmigen Stahlstreben getragen wird.



Abbildung 9-16 Rendering der Seitenhafenbrücke

Strukturelle Bewertung und Identifikation vulnerabler Zonen

Zur Ermittlung von Wartungs- und Eingriffsbedarf wurden kritische Bereiche der Struktur anhand von Experteninterviews mit dem Eigentümer/Betreiber und Tragwerksplanern sowie durch die Analyse verfügbarer Planungs- und Ausführungsunterlagen bestimmt. Zwei dieser Bereiche wurden für eine vertiefte Untersuchung ausgewählt und sind in Abbildung 9-17 hervorgehoben. Auf Grundlage des Alterungsmodells gemäß RVS 13.05.11 wurden Dehnfugen (Übergangskonstruktionen) als besonders kritische Bauteile identifiziert, da sie einen hohen Wartungsaufwand erfordern. Im Gegensatz zu den meisten anderen Brückenbauteilen, die in der Regel partiell instandgesetzt werden, müssen Dehnfugen in regelmäßigen Abständen vollständig ersetzt werden.

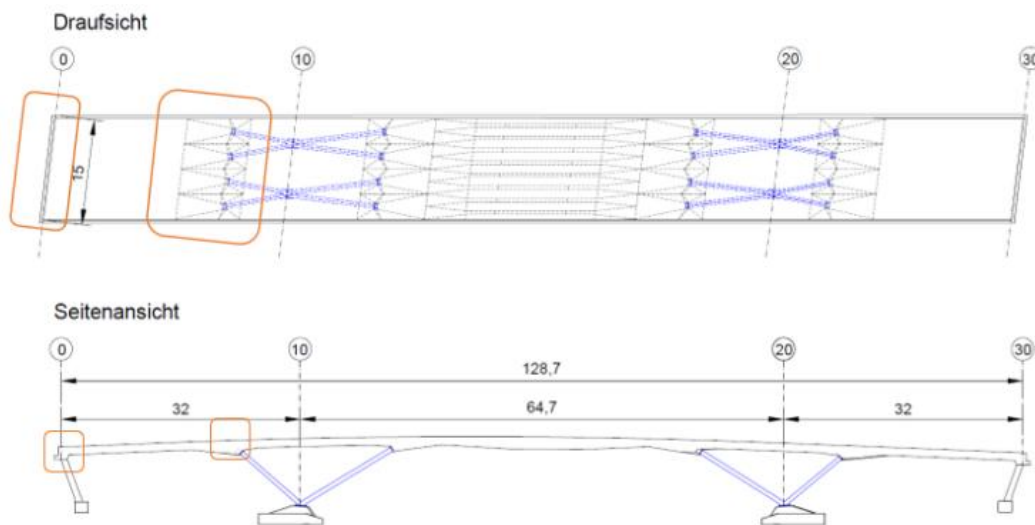


Abbildung 9-17 Grundriss und Ansicht der Seitenhafenbrücke mit Hervorhebung kritischer Bereiche.

Weitere als vulnerable Zone identifiziert, ist Übergangsbereich zwischen dem Betonüberbau und den Stahlstreben. Diese wurde für eine detaillierte Untersuchung ausgewählt, da die starre Verbindung ohne Lager zu hohen Biegemomenten und Schubkräften führt, die vom Bauwerk aufgenommen werden müssen. Auf Grundlage der strukturellen Bewertung wurden zwei Fallstudien abgeleitet, die sich jeweils auf die periodische Instandhaltung bzw. die Lebensdauererweiterung konzentrieren.

BIM-Modellgenerierung und semantische Anreicherung

Für die automatische Berechnung der relevanten Indikatoren wurde ein Revit-BIM-Modell aufgebaut, das alle benötigten Dokumente und Eingabedaten bündelt. In Abbildung 9-18 und Abbildung 9-19 sind die davor genannten Bauteilbereiche der Anwendungsfälle farblich markiert.

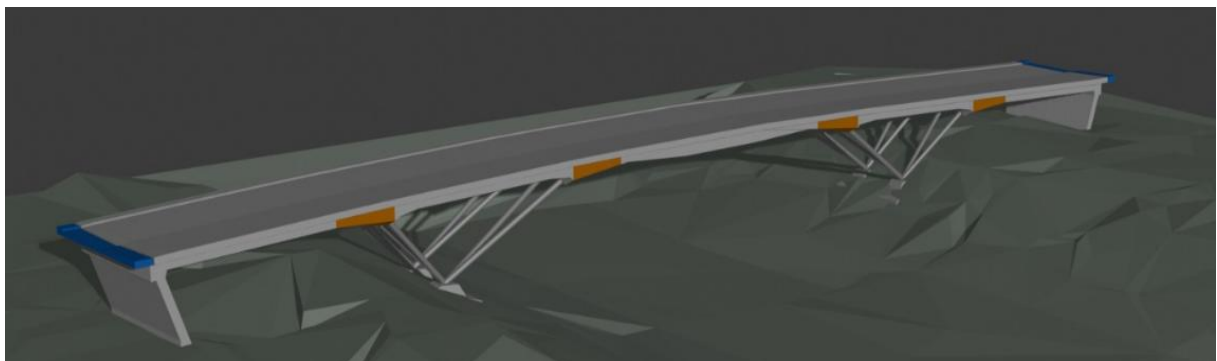


Abbildung 9-18 Auszug des Revit Modells zur Seitenhafenbrücke. In blau markiert die Fahrbahnübergänge und in orange die Zonen der Querkraftverstärkung.

Den beschriebenen Bauteilen wurden dafür gezielt Attribute zugewiesen, unter anderem Geometrie, Stückzahl, GWP-Werte sowie Nutzungsdauer, die direkt in die Indikatorenberechnung einfließen. Ergänzend werden externe Informationen eingebunden, wie EPD-Datenblätter, extern berechnete Indikatoren, Kosten gemäß RVS, Steckbriefe der Maßnahmen und die zugrunde gelegten Lastkombinationen.

9.5.2 Beschreibung der Fallstudien

Auf Grundlage der strukturellen Bewertung und der Identifikation verwundbarer Zonen wurden zwei Fallstudien ausgearbeitet. In der ersten Fallstudie wird die bestehende Übergangskonstruktion (Dehnfuge) mit einer alternativen Variante verglichen. Die zweite Fallstudie vergleicht zwei Optionen zur Lebensdauerverlängerung der Brücke durch Querkraftverstärkung.

Für die vergleichende Analyse beider Fallstudien wurden die folgenden drei Nachhaltigkeitsindikatoren ausgewählt: Der Indikator für das Treibhauspotenzial (Global Warming Potential, Fallstudie 1 und 2) gehört zur übergeordneten Kategorie Ökologie und ist Teil der Gruppe der Lebenszyklusanalyse. Der Indikator der Lebenszykluskosten (Life Cycle Costs, Fallstudie 1 und 2) gehört zur übergeordneten Kategorie Ökonomie und ist Teil der Gruppe der strukturbezogenen Kosten. Der technische Zuverlässigkeitsindex (Fallstudie 2) ist Teil der technischen Qualität.

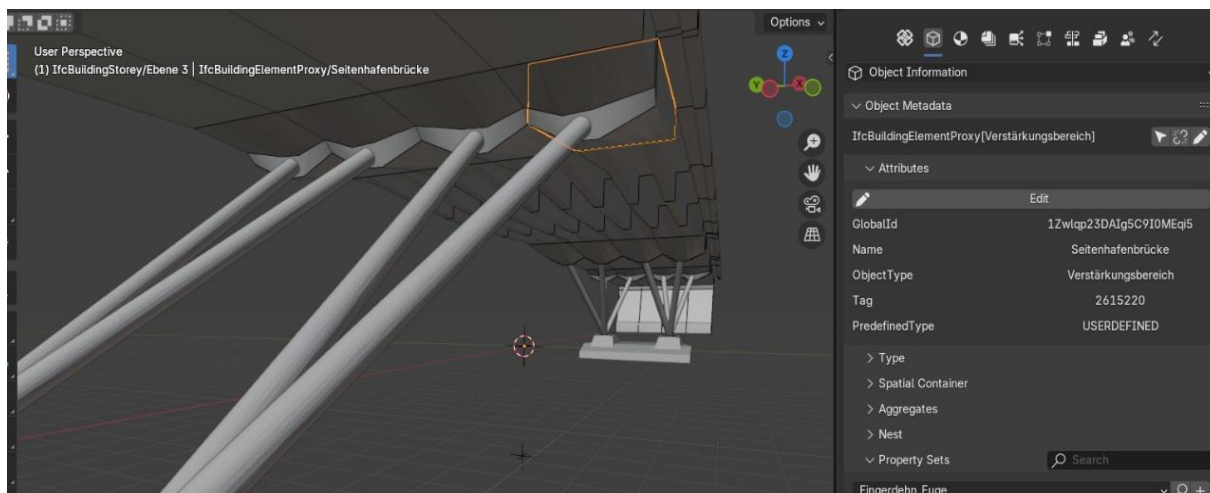


Abbildung 9-19 Auszug des BIM- Modells mit Darstellung der Attribute

Ziel dieser Fallstudien ist es, die beste Variante zu bestimmen, indem die ausgewählten Nachhaltigkeitsindikatoren berechnet und miteinander verglichen werden.

Anwendung der Bewertungsmethodik

Als erster Schritt wurden alle notwendigen Daten für die Berechnung der Nachhaltigkeitsindikatoren gesammelt. Die verwendeten Daten stammten aus verschiedenen Quellen, von denen nicht alle öffentlich zugänglich sind (Abbildung 9-20). Ein Großteil dieser Daten musste aufbereitet und verarbeitet werden, bevor er im Digitalen Zwilling genutzt werden konnte, da er nicht für eine direkte Implementierung geeignet war. Jeder Datentyp wurde mit einem angepassten Ansatz in den Digitalen Zwilling integriert. Die Pläne wurden beispielsweise verwendet, um die Brückenstruktur im IFC-Modell aufzubauen. Dieses Modell enthält wesentliche Details zur Brücke, wie Abmessungen und Materialien, und ermöglicht zugleich die Ergänzung weiterer Informationen wie Nutzungsdauer und Treibhauspotenzial.

Da das Projekt jedoch weder die Entwicklung noch die Einbindung von Datenbanken – etwa für EPDs oder Richtlinien – umfasste, wurden diese Ressourcen stattdessen als PDF-Dateien importiert und als Referenzmaterialien genutzt. Die Indikatoren wurden extern in Excel berechnet, dort weiter analysiert und bewertet. Die Ergebnisse wurden anschließend in den Digitalen Zwilling integriert.

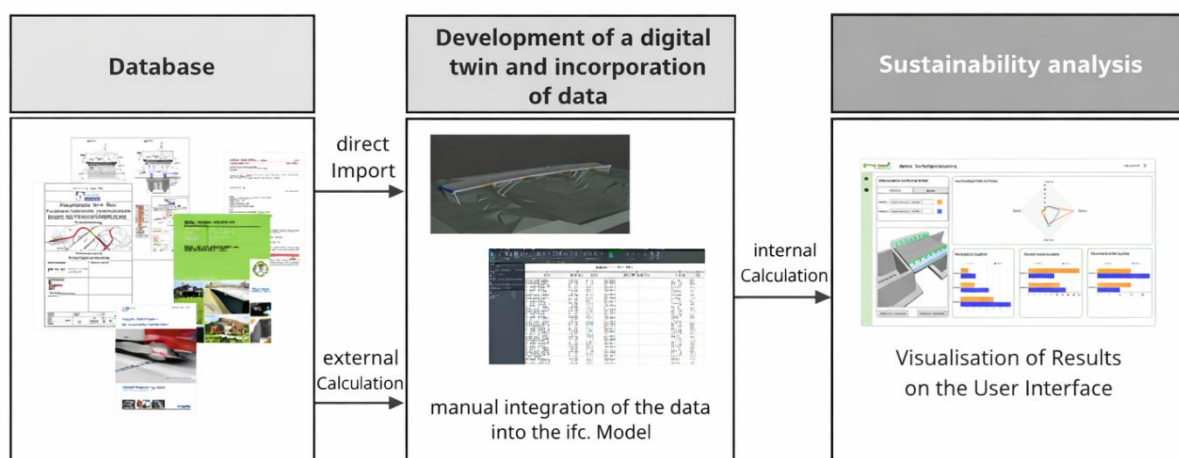


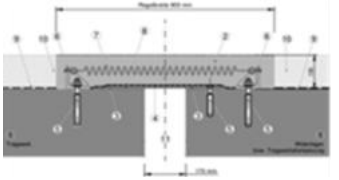
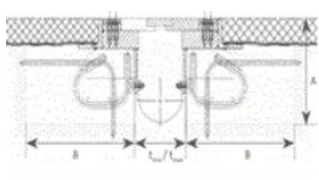
Abbildung 9-20. zeigt den Ablauf der Bewertungsmethodik von der Sammlung der Daten, Integrierung in den digitalen Zwilling bis hin zur Verknüpfung mit der GrIT-Plattform

Anwendungsfall 2 - Instandhaltung: Flexible Fahrbahnübergangskonstruktion- Periodische Instandhaltung:

Die bestehende flexible Übergangskonstruktion (Silent Joint RESA 900 S) wird mit einer alternativen Kragfingerfuge (TENZA®FINGER Typ RSFD) verglichen. In Tabelle 16 ist ein

Vergleich beider Varianten dargestellt, die sich insbesondere in Material und Lebensdauer unterscheiden.

Tabelle 16. Beschriftung und Kenngröße der ausgewählten Varianten – AT – AwF 2

	 <u>Variante 1</u>	 <u>Variante 2</u>
Beschreibung	Eingebaute flexible Dehnfuge	Stahlfingerfuge
Breite	900mm	610mm
Material	Polymer- modifiziertes Bitumen	Stahl
Nutzungsdauer	5	20

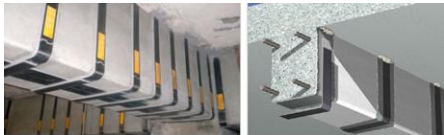
Anwendungsfall 3 - Lebensdauererlängerung: Querkraftverstärkung- Verlängerung der Nutzungsdauer

Anwendungsfall 3 konzentriert sich auf die Verlängerung der Nutzungsdauer der Brücke durch Erhöhung ihrer Scherkapazität. Auf Basis der statischen Beurteilung wurden zwei Verstärkungslösungen entwickelt. Beide Systeme ermöglichen den Einbau unterlaufendem Verkehr und minimieren dadurch betriebliche Beeinträchtigungen (siehe Tabelle 17).

Die Verbund-Ankerschraube wird zur nachträglichen Verstärkung an der Unterseite der Betonfahrbahnplatte eingebaut. Die Montage erfolgt, indem die Ankerschraube in ein gebohrtes, mit Verbundmörtel gefülltes Loch eingeschraubt wird.

Kohlenstofffaserverstärkte Kunststofflamine (CFK-Lamine) werden zur Scherverstärkung bestehender Betontragwerke eingesetzt. Vorgefertigte Lamellenelemente werden als Scherwinkel aufgebracht und mit Epoxidharz an die Struktur geklebt. Zusätzlich werden die Lamellen in die Betonoberfläche eingeschnittene Nuten verankert.

Tabelle 17. Beschreibung der ausgewählten Varianten – AT – AwF3

	 <u>Variante 1</u>	 <u>Variante 2</u>
Beschreibung	Verbundankerschrauben	CFK-Lamellen
Breite		
Material	Stahl	Kohlenstoffverstärkter Kunststoff

9.5.3 Ergebnisse

Das Treibhauspotenzial (GWP), ausgedrückt in Kilogramm CO₂-Äquivalent, wird für die Lebenszyklusphasen A1–A3 berechnet, die Rohstoffbereitstellung, Transport und Herstellung umfassen. Die nachstehende Tabelle 18 zeigt die absoluten GWP-Werte für beide Varianten, berechnet über einen Referenzzeitraum von 86 Jahren, entsprechend der verbleibenden Nutzungsdauer der Brücke.

Für die Erfassung der Daten wurden EPD Werte herangezogen. Diese sind jedoch Materialbedingt und stark von der Geometrie der Fuge abhängig, da keine EPDs für die Gesamtkonstruktion mit all ihren Einzelteilen existiert.

$$GWP_{total} = Einheit * m_x$$

Formel 1 - GWP

Unit	Volumen des Materials [m ³], Masse des Materials [kg]
M _x	Module für die Lebenszyklusphase [kg CO ₂ - äquiv.]
GWP _{total}	Globales Erderwärmungspotential [kg CO ₂ - äquiv.]

Hinsichtlich der Umweltleistung der Übergangskonstruktionen schneidet die Stahlfingerfuge aufgrund ihrer längeren Lebensdauer besser ab als die bestehende Fuge, trotz höherer materialbedingter Emissionen.

Tabelle 18. Ergebnisse des GWP- Indikators

Globales Erderwärmungspotential	Variante 1	Variante 2
GWP für 1 kg joint [CO2-equiv.]	1,11	1,13
GWP für einen Austausch [kg CO2-equiv.]	6.406,09	21.611,25
GWP über die Restnutzungsdauer der Brücke [kg CO2- equiv.]	110. 184,71	92.928,38

Die Ergebnisse der Lebenszykluskostenanalyse (LCC), zusammengefasst in Tabelle 18, sind in Euro (€) angegeben und stellen die Gesamtkosten dar, die mit dem Austausch der jeweiligen Brückenfuge über die verbleibende Nutzungsdauer von 86 Jahren verbunden sind. Die Analyse berücksichtigt allgemeine Baustellengemeinkosten, Verwaltungskosten, jährliche betriebliche Instandhaltungskosten sowie jährliche Inspektionskosten. Zusätzlich umfasst der Einheitspreis die Kosten für Material, Einbau (Bauausführung) und Ausbau (Rückbau).

$$LZK(t) = \sum_{j=1}^e \sum_{i=1}^n B_{1i} * B_{2i} * B_{3i} + t * B_4 * Fl$$

Formel 2 - Lebenszykluskosten

- B_{1i} Bauteilmasse i
- B_{2i} Einheitspreis des Bauteils i
- B_{3i} Umfang der bauteilbezogenen Instandhaltungsarbeit [%]
- Fl Brückenfläche [m²]
- i fortlaufender Index des Bauteils
- j Laufindex der Interventionen
- t Beobachtungszeitraum [Jahre]

Alle in der Analyse verwendeten Werte stammen aus den Richtlinien und Vorschriften für den Straßenbau (RVS 13.05.11 Lebenszykluskosten für Brücken). Trotz eines höheren Einheitspreises ist die Stahlfingerfuge im Vergleich zur bestehenden Fuge die wirtschaftlichere Option.

Tabelle 19. Ergebnisse der Lebenszykluskostenanalyse

<u>Lebenszykluskosten</u>	<u>Variante 1</u>	<u>Variante 2</u>
Einheitspreis	60 000,00	90 000,00
Kosten für einen einmaligen Austausch	60 608,00	90 881,52
Kosten summiert über die Restnutzungsdauer der Brücke	1 049 888,00	400 545,00

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1. Methodisches Vorgehen bei der Projektbearbeitung	11
Abbildung 2-1. Die Evolution des DZ im Bauwesen [2]	16
Abbildung 2-2. Prozesskreislauf eines Infrastrukturbauwerks mit Zeitpunkten des Datenaustauschs zwischen den Prozessbeteiligten [19]	23
Abbildung 2-3. Phasenmodell der BIM-Implementierungsstrategie erweitert um den Beitrag zum Masterplan Digitaler Zwillings Bundesfernstraßen [28]	27
Abbildung 2-4. Stufenplan des ASTRA zur Einführung von BIM [32]	29
Abbildung 2-5. Schematische Darstellung des DZ mit Bauwerkszustandsbewertung [42] ...	31
Abbildung 2-6. Schematische Darstellung des DZ für die Erhaltung von Tunneln [45].	32
Abbildung 2-7. Schematische Darstellung des DZ für Fahrbahnüberwachung [48]	34
Abbildung 2-8. Meilensteine der übergeordneten Nachhaltigkeitsentwicklung in Bezug auf Konferenzen und Berichte	39
Abbildung 2-9. Arbeitsprogramm CEN/TC 350 und Nennung von wichtigen ISO-Standards [73]	42
Abbildung 2-10. Qualitative Darstellung der Funktionsweise von Bewertungssystemen zur Berechnung von Indices unter Verwendung von Indikatoren, Kriterien, Nachhaltigkeitsdimensionen	44
Abbildung 2-11. Gliederungssystematik für die Ergebnisdarstellung im gesamten Lebenszyklus eines Bauwerks [73]	45
Abbildung 2-12. Übertragung auf andere Phasengliederungen [74]	45
Abbildung 2-13. Beispiel einer smarten Metrik aus der Envision Zertifizierung	50
Abbildung 2-14. Einbettung der KNA und der KWA in die NISTRA-Bewertung [93]	53
Abbildung 2-15. Handbuch NISTRA 2022	54
Abbildung 2-16. Bewertungskriterien aus 10 Bereichen [94]	56
Abbildung 2-17. Auswertungen im Tool „SNBS“ in Form eines Spinnendiagramms [95]	57
Abbildung 3-1. Übersicht der Faktoren für den Top-Down Ansatz	66

Abbildung 3-2. Beispielhafte Auflistung von Indikatoren mit ihrer Relevanz für Zielerreichung in den drei Nachhaltigkeitsqualitäten.....	67
Abbildung 3-3. Zeitliche Verortung der Anwendungsfälle im Lebenszyklus	69
Abbildung 5-1. Prozessablauf der Anwendungsfälle in dem zu entwickelnden Prototyp....	107
Abbildung 5-2. Verknüpfung des standardbasierten Ontologie-Netzwerks gemäß [121] mit der GreenInfraTwins Datenstruktur zur Standardisierung der Indikatordefinition.	110
Abbildung 5-3. Softwarearchitektur des GreenInfraTwins Prototyps.....	112
Abbildung 6-1. Darstellung GrIT-Ontologie mit den Hauptklassen.....	119
Abbildung 6-2. XML-Schemastruktur der Ökobaumat [126]	122
Abbildung 7-1. Ebenen der räumlichen Systemgrenzendefinition [52].....	127
Abbildung 7-2. Reales Bauwerk und abgeleitetes Referenzbauwerk als 3D-Modell	127
Abbildung 7-3. Das Brückenbauwerk am Berner Ostring: Alter Zustand (links) und neuer Zustand (rechts).....	129
Abbildung 7-4. Visualisierung der Seitenhafenbrücke	130
Abbildung 7-5. Demonstrator Deutschland des GrIT-Prototyps: Maßnahmenspezifische Übersicht über die berechneten Indikatoren.....	131
Abbildung 7-6. Demonstrator Deutschland des GrIT-Prototyps: Gesamtübersicht über die berechneten Indikatoren (hier dargestellt sind die Indikatoren der ökologischen Qualität)	132
Abbildung 7-7. Demonstrator Schweiz des GrIT-Prototyps: BIM-Modell, das die Brücke nach Anwendung der Maßnahme mit Variante 1 (Verwendung von Beton 30/37) darstellt.....	133
Abbildung 7-8. Demonstrator Schweiz des GrIT-Prototyps: Anzeige berechneter Indikatoren über gestapelte Diagramme (links) und Radardiagramme (rechts)	133
Abbildung 7-9. Demonstrator Österreich des GrIT-Prototyps: BIM-Modell, das die Brücke mit den Fahrbahnübergängen und Querkraftverstärkungsmaßnahmen darstellt.....	135
Abbildung 7-10. Demonstrator Österreich des GrIT-Prototyps: AwF 2 Ergebnisse der Studie: Anzeige berechneter Indikatoren über gestapelte Diagramme (links) und Radardiagramme (rechts)	135
Abbildung 7-11. Demonstrator Österreich des GrIT-Prototyps: BIM-Modell, das die Brücke mit den farblich markierten Zonen der Querkraftverstärkung zeigt.....	137

Abbildung 7-12. Demonstrator Österreich des GrIT-Prototyps: Anzeige berechneter Indikatoren über gestapelte Diagramme (links) und Radardiagramme (rechts) Diskussion der Ergebnisse.....	137
Abbildung 7-13. Demonstrator Deutschland des GrIT-Prototyps: Übersicht über die Indikatoren und Bauteilgruppen für den AWF Rückbau	139
Abbildung 7-14. Demonstrator Deutschland des GrIT-Prototyps: Übersicht über die Indikatoren und Bauteilgruppen für den AWF Rückbau	140
Abbildung 9-1. Darstellung des geometrischen Modells in der Autorensoftware Revit	195
Abbildung 9-2. Für die Modellerstellung verwendete Modellelemente inkl. Angabe der in der Autorensoftware verwendeten Familien (grün), Angaben der IFC-Exporteinstellungen (rot) sowie verwendete vierstufige Datenstruktur (gelb).....	196
Abbildung 9-3. Bereitstellung der zu verwendenden Attribute als Shared-Parameter-Liste (dateibasiert).....	197
Abbildung 9-4. Verwendung der Shared-Parameter-Liste in der Autorensoftware.....	198
Abbildung 9-5. Bereitstellung der IFC-Exporteinstellungen als dateibasiertes Übergabeformat	199
Abbildung 9-6. Ergebnis des IFC-Export, hier: Attributliste AWF 4 angezeigt in einem IFC-Viewer	200
Abbildung 9-7. Ergebnis des IFC-Exports, hier: Datenstruktur angezeigt in einem IFC-Viewer	200
Abbildung 9-8: Unterschiedliche Detaillierung der Leitmauer in den Varianten 1 (a) und 2 (b)	203
Abbildung 9-9. Aufbau einer Simulation im InfraROB-Tool - Variante 1	206
Abbildung 9-10. Model 1: Abbruch - Die Elemente für Abbruch sind in gelb dargestellt; die Merkmale auf Brückenebene, die in die Berechnung einbezogen wurden, sind eingekreist. (<i>BIM Vision 2.27</i>)	208
Abbildung 9-11. Model 2: Variante 1 - Die Elemente für Einbau sind in dunkelblau dargestellt; die Hierarchie der Elemente ist rechts dargestellt. (<i>BIM Vision 2.27</i>)	209
Abbildung 9-12. Model 3: Variante 2 - Die Elemente für den Einbau sind in hellblau dargestellt; die Hierarchie der Elemente ist rechts dargestellt. (<i>BIM Vision 2.27</i>)	209

Abbildung 9-13. Model 2: Variante 1 - Merkmale für Element 243.2 Leitmauer Ost – Neu, einschließlich der zusätzlichen Nachhaltigkeitseigenschaften (eingekreist) (<i>BIM Vision 2.27</i>)	210
Abbildung 9-14. Model 2: Variante 1, Merkmale für Element 131.8-2 Beton-Pilze in Stützenreihe Achse 8. (<i>BIM Vision 2.27</i>)	211
Abbildung 9-15. Model 2: Variante 1, Merkmale für Element Bewehrung-Leitmauer Ost (<i>BIM Vision 2.27</i>)	211
Abbildung 9-16 Rendering der Seitenhafenbrücke	213
Abbildung 9-17 Grundriss und Ansicht der Seitenhafenbrücke mit Hervorhebung kritischer Bereiche.	214
Abbildung 9-18 Auszug des Revit Modells zur Seitenhafenbrücken. In blau markiert die Fahrbahnübergänge und in orange die Zonen der Querkraftverstärkung.	214
Abbildung 9-19 Auszug des BIM- Modells mit Darstellung der Attribute	215
Abbildung 9-20. zeigt den Ablauf der Bewertungsmethodik von der Sammlung der Daten, Integrierung in den digitalen Zwilling bis hin zur Verknüpfung mit der GrIT-Plattform	216

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1. Vergleich verwendeter Kategorien in internationalen Nachhaltigkeitsbewertungssystemen und -ansätzen.....	47
Tabelle 2. Beispiel einer Kosten-Nutzen-Analyse (KNA)	55
Tabelle 3. Initiativen des europäischen Green Deals	60
Tabelle 4. Übersicht Nachhaltigkeitsindikatoren als Basis für die Umsetzung in DZ.....	78
Tabelle 5: Zuordnung der betrachteten Indikatoren je Anwendungsfall	104
Tabelle 6. Funktion: "Auswählen eines Demonstrators"	115
Tabelle 7. Funktion: "Darstellen der Eingaben"	115
Tabelle 8. Funktion: "Zusammenstellen der Eingaben"	115
Tabelle 9. Funktion: "Durchführen der Nachhaltigkeitsbewertung"	116
Tabelle 10. Funktion: "Darstellen der Bewertungsergebnis"	116
Tabelle 11. Exemplarischer Datensatz in der EPD Konvertierung.....	124
Tabelle 12. Übersicht Nachhaltigkeitsindikatoren als Basis für die Umsetzung in DZ.....	152
Tabelle 13: Menge der verwendeten Materialien der Varianten 1 und 2.....	203
Tabelle 14: Übernommene Kosten für spezifische Baumaterialien.....	205
Tabelle 15: Ergebnisse der 12 Simulationen aus dem InfraROB-Prototyp	207
Tabelle 16. Beschriftung und Kenngröße der ausgewählten Varianten – AT – AwF 2.....	217
Tabelle 17. Beschreibung der ausgewählten Varianten – AT – AwF3.....	218
Tabelle 18. Ergebnisse des GWP- Indikators.....	219
Tabelle 19. Ergebnisse der Lebenszykluskostenanalyse	220

Literaturverzeichnis

- [1] D.-G. J. Opoku, S. Perera, R. Osei-Kyei, and M. Rashidi, "Digital twin application in the construction industry: A literature review," *Journal of Building Engineering*, vol. 40, p. 102726, 2021, doi: 10.1016/j.jobbe.2021.102726.
- [2] C. Boje, A. Guerriero, S. Kubicki, and Y. Rezgui, *Towards a semantic Construction Digital Twin: Directions for future research*: Elsevier B.V, *Automation in Construction*, vol. 114.
- [3] F. Jiang, L. Ma, T. Broyd, and K. Chen, "Digital twin and its implementations in the civil engineering sector," *Automation in Construction*, vol. 130, p. 103838, 2021, doi: 10.1016/j.autcon.2021.103838.
- [4] Muhammad Shahzad, Muhammad Tariq Shafiq, Dean Douglas, and Mohamad Kassem, "Digital Twins in Built Environments: An Investigation of the Characteristics, Applications, and Challenges," *Buildings*, vol. 12, no. 2, 2022, doi: 10.3390/buildings12020120.
- [5] M. Deng, C. C. Menassa, and V. R. Kamat, "From BIM to digital twins: a systematic review of the evolution of intelligent building representations in the AEC-FM industry," *ITcon*, vol. 26, pp. 58–83, 2021, doi: 10.36680/j.itcon.2021.005.
- [6] S. H. Khajavi, N. H. Motlagh, A. Jaribion, L. C. Werner, and J. Holmstrom, "Digital Twin: Vision, Benefits, Boundaries, and Creation for Buildings," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 147406–147419, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2946515.
- [7] J. M. Davila Delgado and L. Oyedele, "Digital Twins for the built environment: learning from conceptual and process models in manufacturing," *Advanced Engineering Informatics*, vol. 49, p. 101332, 2021, doi: 10.1016/j.aei.2021.101332.
- [8] A. Fazekas *et al.*, *DIGITALER ZWILLING BUNDESFERNSTRASSEN: Definition und Konzeption*. Rahmendokument Version 1.0. [Online]. Available: https://www.bim-bundesfernstrassen.de/fileadmin/user_upload/Rahmendokumente/bim-rd-digitaler-zwilling-definition.pdf (accessed: Mar. 27 2025).
- [9] T. D. Nguyen and S. Adhikari, "The Role of BIM in Integrating Digital Twin in Building Construction: A Literature Review," *Sustainability (Switzerland)*, vol. 15, no. 13, p. 10462, 2023, doi: 10.3390/su151310462.
- [10] F. Tao, H. Zhang, A. Liu, and A. Y. C. Nee, "Digital Twin in Industry: State-of-the-Art," *IEEE Trans. Ind. Inf.*, vol. 15, no. 4, pp. 2405–2415, 2019, doi: 10.1109/TII.2018.2873186.

- [11] S. Boschert and R. Rosen, "Digital Twin—The Simulation Aspect," in *Springer eBook Collection Engineering, Mechatronic Futures: Challenges and Solutions for Mechatronic Systems and their Designers*, P. Hehenberger and D. Bradley, Eds., Cham: Springer, 2016, pp. 59–74.
- [12] C. Boje, S. Kubicki, A. Guerriero, Y. Rezugui, and A. Zarli, "Digital twins for the built environment," in *Buildings and semantics: Data models and web technologies for the built environment*, P. Pauwels and K. McGlinn, Eds., Leiden, The Netherlands, Boca Raton, FL: CRC Press/Balkema, 2022, pp. 179–199.
- [13] S. Kosse, P. Hagedorn, and M. König, "Analyzing Modularity in Construction Digital Twins for Developing a Dynamic Modular Reference Architecture," in *Computing in Civil Engineering 2023: Data, Sensing, and Analytics*, Y. Turkan, J. Louis, F. Leite, and S. Ergun, Eds., Reston: American Society of Civil Engineers, 2024, pp. 614–622.
- [14] S. Kosse, V. Betker, P. Hagedorn, M. König, and T. Schmidt, "A Semantic Digital Twin for the Dynamic Scheduling of Industry 4.0-based Production of Precast Concrete Elements: Akzeptiert zur Veröffentlichung," *Advanced Engineering Informatics*, vol. 62, p. 102677, 2024, doi: 10.1016/j.aei.2024.102677.
- [15] S. Kosse, O. Vogt, M. Wolf, M. König, and D. Gerhard, "Digital Twin Framework for Enabling Serial Construction," *Front. Built Environ.*, vol. 8, 2022, doi: 10.3389/fbuil.2022.864722.
- [16] M. Polter and R. J. Scherer, "Towards a multimodel BIM based approach for smart digital twins," in *Proceedings of the 14th European Conference on Product & Process Modelling 2022 (ECPPM), Trondheim, Norway, 2022*.
- [17] H. H. Hosamo, A. Imran, J. Cardenas-Cartagena, P. R. Svennevig, K. Svidt, and H. K. Nielsen, "A Review of the Digital Twin Technology in the AEC-FM Industry," *Advances in Civil Engineering*, vol. 2022, pp. 1–17, 2022, doi: 10.1155/2022/2185170.
- [18] R. Al-Sehrawy and B. Kumar, "Digital Twins in Architecture, Engineering, Construction and Operations. A Brief Review and Analysis," in *Lecture Notes in Civil Engineering, Proceedings of the 18th International Conference on Computing in Civil and Building Engineering*, E. Toledo Santos and S. Scheer, Eds., Cham: Springer International Publishing, 2021, pp. 924–939.
- [19] R. Hajdin *et al.*, "BIM-Erweiterung durch Implementierung der Nutzung baustofftechnischer Daten von Straßen und Brücken im AMS (BIM4AMS): Abschlussbericht," D-A-CH Kooperation Verkehrsinfrastrukturforschung, Wien, 2022. [Online]. Available: https://projekte.ffg.at/anhang/63bebbc1a24d3_BIM4AMS_Ergebnisbericht.pdf

- [20] International Federation for Structural Concrete, *fib Model Code*. [Online]. Available: <https://fib-international.org/publications/model-codes/model-code-2020.html>
- [21] DIN 1076, *Ingenieurbauwerke im Zuge von Straßen und Wegen: Überwachung und Prüfung*. Berlin: Beuth Verlag, 1999.
- [22] FSV, *RVS 13.03.11, Straßenbrücken*. Wien: Österreichische Forschungsgesellschaft Straße – Schiene - Verkehr, 2011.
- [23] ASTRA 12002, *Überwachung und Unterhalt der Kunstbauten der Nationalstraßen: Richtlinie*. Bern: Bundesamt für Strassen ASTRA, Abteilung Strassennetze, Standards, Forschung, Sicherheit, 2005.
- [24] ASFINAG, *IMT Datenbankstruktur – Generelle Vorgaben und Grundlagen: IT-Dokumentation*. Wien, 2016.
- [25] OKSTRA, *Objektkatalog für das Straßen- und Verkehrswesen*. Bergisch Gladbach: Bundesanstalt für Straßenwesen, 2021. [Online]. Available: <https://www.okstra.de/>
- [26] ASTRA 61017, *MISTRA Trasse: TRA Organisationhandbuch*. Bern: Bundesamt für Strassen ASTRA, 2023.
- [27] M. Stöckner *et al.*, "Exchange and Exploitation of Data from Asset Management Systems using Vendor Free Format," CEDR Transnational Road Research Programme / Call 2018. Stockholm, 2022. [Online]. Available: <https://www.cedr.eu/docs/view/62b2d2904e9f5-en>
- [28] A. Meister, F. Scholz, and S. Banemann, "Masterplan BIM Bundesfernstraßen: Digitalisierung des Planens, Bauens, Erhaltens und Betreibens im Bundesfernstraßenbau mit der Methode Building Information Modeling (BIM)," Berlin, 2021. [Online]. Available: <https://bmdv.bund.de/SharedDocs/DE/Anlage/StB/bim-rd-masterplan-bundesfernstrassen.pdf>
- [29] M. Wenner *et al.*, "Digitaler Zwilling von Brücken – Beitrag zum Masterplan Digitaler Zwilling Bundesfernstraßen," 2023. [Online]. Available: <https://digitalerzwillig.bundesfernstrassen.de/wp-content/uploads/2023/08/Digitaler-Zwilling-von-Brucken-Beitrag-zum-Masterplan-Digitaler-Zwilling-Bundesfernstrassen.pdf>
- [30] Bundesministerium für Digitalisierung und Wirtschaftsstandort, *Digital Roadmap Austria*, 2016. [Online]. Available: <https://www.digitalroadmap.gv.at/>
- [31] AGoeAG, *Positionspapier ÖIAV Arbeitsgruppe öffentliche Auftraggeber*, 2023. [Online]. Available: https://www.oia.v.at/wp-content/uploads/2023/10/AGoeAG_Positionspapier_2023.pdf
- [32] Bundesamt für Strassen ASTRA, "Teilstrategie Digitale Ausrichtung: Ausgabe 2023 V1.0," 2023. [Online]. Available: <https://www.astra.admin.ch/dam/astra/de/dokumente/>

- direktion/teilstrategie-digitale-ausrichtung.pdf.download.pdf/
Teilstrategie%20Digitale%20Ausrichtung.pdf
- [33] Bundesamt für Strassen ASTRA, *Teilstrategie Daten: Ausgabe 2022 V1.0*, 2022.
[Online]. Available: <https://www.astra.admin.ch/dam/astra/de/dokumente/direktion/teilstrategie-daten.pdf.download.pdf/Teilstrategie%20Daten.pdf>
- [34] Bundesamt für Strassen ASTRA, *Teilstrategie Building Information Modeling: Ausgabe 2021 V2*, 2022. [Online]. Available: [https://www.astra.admin.ch/dam/astra/de/dokumente/direktion/teilstrategie-bim.pdf.download.pdf/Teilstrategie%20Building%20Information%20Modeling%20\(BIM\).pdf](https://www.astra.admin.ch/dam/astra/de/dokumente/direktion/teilstrategie-bim.pdf.download.pdf/Teilstrategie%20Building%20Information%20Modeling%20(BIM).pdf)
- [35] R. Sacks, I. Brilakis, E. Pikas, H. S. Xie, and M. Girolami, "Construction with digital twin information systems," *DCE*, vol. 1, 2020, doi: 10.1017/dce.2020.16.
- [36] L. Hou, S. Wu, G. Zhang, Y. Tan, and X. Wang, "Literature Review of Digital Twins Applications in Construction Workforce Safety," *Applied Sciences*, vol. 11, no. 1, p. 339, 2021, doi: 10.3390/app11010339.
- [37] Q. Lu, X. Xie, A. K. Parlikad, and J. M. Schooling, "Digital twin-enabled anomaly detection for built asset monitoring in operation and maintenance," *Automation in Construction*, no. 118, 2020, doi: 10.1016/j.autcon.2020.103277.
- [38] L. Raes *et al.*, "DUET: A Framework for Building Interoperable and Trusted Digital Twins of Smart Cities," *IEEE Internet Comput.*, vol. 26, no. 3, pp. 43–50, 2022, doi: 10.1109/MIC.2021.3060962.
- [39] M. Wenner, M. Meyer-Westphal, M. Herbrand, and C. Ullerich, "The concept of digital twin to revolutionise infrastructure maintenance: The pilot project smartBRIDGE Hamburg," in *Proceedings of the 27th ITS world congress, Hamburg, Germany, 2021*, pp. 11–15.
- [40] M. Mahmoodian, F. Shahrivar, S. Setunge, and S. Mazaheri, "Development of Digital Twin for Intelligent Maintenance of Civil Infrastructure," *Sustainability*, vol. 14, no. 14, p. 8664, 2022, doi: 10.3390/su14148664.
- [41] V. Nicoletti, R. Martini, S. Carbonari, and F. Gara, "Operational Modal Analysis as a Support for the Development of Digital Twin Models of Bridges," *Infrastructures*, vol. 8, no. 2, p. 24, 2023, doi: 10.3390/infrastructures8020024.
- [42] F. Collin, L. Ulbrich, and F. Jesse, "Konzept eines Digitalen Zwillings für Brückenbauwerke in der Betriebsphase," *Bautechnik*, 2024, doi: 10.1002/bate.202400003.

- [43] Y. Gao, H. Li, G. Xiong, and H. Song, "AloT-informed digital twin communication for bridge maintenance," *Automation in Construction*, vol. 150, p. 104835, 2023, doi: 10.1016/j.autcon.2023.104835.
- [44] Y. Shen, J. Ling, X. Li, H. Li, S. Feng, and H. Zhu, "Holistic digital-twin-based framework to improve tunnel lighting environment: From methodology to application," *Building and Environment*, vol. 224, p. 109562, 2022, doi: 10.1016/j.buildenv.2022.109562.
- [45] G. Yu, Y. Wang, Z. Mao, M. Hu, V. Sugumaran, and Y. K. Wang, "A digital twin-based decision analysis framework for operation and maintenance of tunnels," *Tunnelling and Underground Space Technology*, vol. 116, p. 104125, 2021, doi: 10.1016/J.TUST.2021.104125.
- [46] X. Yang *et al.*, "Application of a digital twin for highway tunnels based on multi-sensor and information fusion," *Front. Phys.*, vol. 12, 2024, doi: 10.3389/fphy.2024.1335494.
- [47] F. Jiang, L. Ma, T. Broyd, W. Chen, and H. Luo, "Building digital twins of existing highways using map data based on engineering expertise," *Automation in Construction*, vol. 134, p. 104081, 2022, doi: 10.1016/j.autcon.2021.104081.
- [48] Z. Ye *et al.*, "IoT-enhanced smart road infrastructure systems for comprehensive real-time monitoring," *Internet of Things and Cyber-Physical Systems*, vol. 4, pp. 235–249, 2024, doi: 10.1016/j.iotcps.2024.01.002.
- [49] A. Consilvio *et al.*, "Towards a digital twin-based intelligent decision support for road maintenance," *Transportation Research Procedia*, vol. 69, pp. 791–798, 2023, doi: 10.1016/j.trpro.2023.02.237.
- [50] E. Thonhofer *et al.*, "Infrastructure-Based Digital Twins for Cooperative, Connected, Automated Driving and Smart Road Services," *IEEE Open J. Intell. Transp. Syst.*, vol. 4, pp. 311–324, 2023, doi: 10.1109/OJITS.2023.3266800.
- [51] Y. Li, Q. Wang, X. Pan, J. Zuo, J. Xu, and Y. Han, "Digital Twins for Engineering Asset Management: Synthesis, Analytical Framework, and Future Directions," *Engineering*, 2024, doi: 10.1016/j.eng.2023.12.006.
- [52] T. Zinke, "Nachhaltigkeit von Infrastrukturbauwerken – Ganzheitliche Bewertung von Autobahnbrücken unter besonderer Berücksichtigung externer Effekte," 2016.
- [53] A. Jamison, "The Shaping of the Global Environmental Agenda: The Role of Non-Governmental Organisations," in *Risk, Environment and Modernity: Towards a New Ecology*, S. Lash, B. Szerszynski, and B. Wynne, Eds., 1 Oliver's Yard, 55 City Road, London EC1Y 1SP United Kingdom: SAGE Publications Ltd, 1998, pp. 224–245.
- [54] B. Littig and E. Grießler, *Soziale Nachhaltigkeit*. Wien: Bundeskammer für Arbeiter und Angestellte Österreich, 2004.

- [55] D. H. Meadows, D. L. Meadows, J. Randers, and W. W. Behrens, "The limits to growth: A report for the club of rome's project on the predicament of mankind," *Demography*, vol. 10, no. 2, pp. 289–299, 1973, doi: 10.2307/2060819.
- [56] P. Schröder, "Limits and beyond: 50 years on from The limits to growth what did we learn and what's next?," *International Affairs*, vol. 99, no. 3, pp. 1342–1343, 2023, doi: 10.1093/ia/iad085.
- [57] G. H. Brundtland, *Our common future [Brundtland report]: Report of the World Commission on Environment and Development*. UN, 1987. [Online]. Available: <https://digitallibrary.un.org/record/139811?v=pdf>
- [58] UNCED, *Agenda 21: Programme of action for sustainable development ; Rio declaration on environment and development ; statement of forest principles ; the final text of agreements negotiated by governments at the United Nations Conference on Environment and Development (UNCED), 3 - 14 June 1992, Rio de Janeiro, Brazil*, 2nd ed. New York, NY: Department of Public Information United Nations, 1993. [Online]. Available: <https://digitallibrary.un.org/record/170126>
- [59] UN, *Report of the World Summit on Sustainable Development, Johannesburg, South Africa, 26 August-4 September 2002: United Nations publication A/CONF.199/20*. New York: Johannesburg, South Africa: UN, 2002. [Online]. Available: <https://digitallibrary.un.org/record/478154?v=pdf>
- [60] N. Stern, "The Stern Review on the Economic Effects of Climate Change," *Population & Development Rev*, vol. 32, no. 4, pp. 793–798, 2006, doi: 10.1111/j.1728-4457.2006.00153.x.
- [61] H.-P. Meister, P. H. Feindt, J. Tscheulin, and S. Lehmann, *Bausteine für ein zukunftsfähiges Deutschland: Diskursprojekt im Auftrag von VCI und IG Chemie-Papier-Keramik*. Wiesbaden: Gabler, 1997.
- [62] SRU, "Umweltgutachten 1996: Zur Umsetzung einer dauerhaft umweltgerechten Entwicklung: Drucksache 13/4108 vom 14.03.1996," 1996. [Online]. Available: https://www.umweltrat.de/SharedDocs/Downloads/DE/01_Umweltgutachten/1994_2000/1996_Umweltgutachten_Bundestagsdrucksache.html
- [63] S. Lutter *et al.*, "Die Nutzung natürlicher Ressourcen: Ressourcenbericht für Deutschland 2022," [Online]. Available: <https://www.umweltbundesamt.de/ressourcenbericht2022>
- [64] A. Fiedler, B. Offergeld, J. Jens Funke, K. Eschenbruch, A. Fandrey, and H. Röwekamp, "Verfahren zur Berücksichtigung von Nachhaltigkeitskriterien bei der Ausschreibung von

- Elementen der Straßeninfrastruktur: BAST-Bericht V 271," 2016. [Online]. Available: <https://bast.opus.hbz-nrw.de/frontdoor/index/index/docId/1691>
- [65] C.-A. Graubner and T. Mielecke, "Nachhaltige Ingenieurbauwerke," *Bauingenieur*, vol. 87, pp. 156–164, 2012.
- [66] T. Zinke, R. Diel, M. Mensinger, and T. Ummenhofer, "Nachhaltigkeitsbewertung von Brückenbauwerken," *Stahlbau*, vol. 79, no. 6, pp. 448–455, 2010, doi: 10.1002/stab.201001332.
- [67] T. Zinke, G. Schmidt-Thrö, and T. Ummenhofer, "Entwicklung und Verwendung von externen Kosten für die Nachhaltigkeitsbewertung von Verkehrsinfrastruktur," *Beton und Stahlbetonbau*, vol. 107, no. 8, pp. 524–532, 2012, doi: 10.1002/best.201200021.
- [68] F. Hermann, P. C. Max, and M. Kunz, "Automatisierte, BIM-basierte Ökobilanzierung am Beispiel des Infrastrukturbaus," *Bautechnik*, vol. 101, no. 2, pp. 128–133, 2024, doi: 10.1002/bate.202300115.
- [69] S. Kaewunruen and Q. LIAN, "Digital twin aided sustainability-based lifecycle management for railway turnout systems," *Journal of Cleaner Production*, vol. 228, pp. 1537–1551, 2019, doi: 10.1016/j.jclepro.2019.04.156.
- [70] S. Kaewunruen and N. Xu, "Digital Twin for Sustainability Evaluation of Railway Station Buildings," *Front. Built Environ.*, vol. 4, 2018, doi: 10.3389/fbuil.2018.00077.
- [71] S. Kaewunruen, J. Sresakoolchai, W. Ma, and O. Phil-Ebosie, "Digital Twin Aided Vulnerability Assessment and Risk-Based Maintenance Planning of Bridge Infrastructures Exposed to Extreme Conditions," *Sustainability*, vol. 13, no. 4, p. 2051, 2021, doi: 10.3390/su13042051.
- [72] J.-I. Jäkel, M. Kaus, and K. Klemm-Albert, "Sustainability assessment of bridge structures in the operation phase based on a digital twin," *ce papers*, vol. 6, no. 5, pp. 667–674, 2023, doi: 10.1002/cepa.1988.
- [73] DIN EN 15643, *Nachhaltigkeit von Bauwerken – Allgemeine Rahmenbedingungen zur Bewertung von Gebäuden und Ingenieurbauwerken*. Berlin: Beuth Verlag, 2021.
- [74] SIA 112/2, *Nachhaltiges Bauen - Tiefbau und Infrastrukturen*, 1st ed. Zürich: Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein (SIA), 2016.
- [75] W. R. Ott, *Environmental indices: Theory and practice*. Ann Arbor, Mich.: Ann Arbor Science Publ, 1978.
- [76] DIN EN ISO 14050, *Umweltmanagement - Begriffe*. Berlin: Beuth Verlag, 2021.
- [77] ISO 21929-1, *Sustainability in building construction - Sustainability indicators: Part 1: Framework for the development of indicators and a core set of indicators for buildings*.

- Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization, 2011. [Online]. Available: <https://www.iso.org/standard/46599.html>
- [78] A. L. Mayer, "Strengths and weaknesses of common sustainability indices for multidimensional systems," *Environment international*, vol. 34, no. 2, pp. 277–291, 2008, doi: 10.1016/j.envint.2007.09.004.
- [79] ISO/TS 21929-2, *Entwurf zur Nachhaltigkeit von Gebäuden und Ingenieurbauwerken - Nachhaltigkeitsindikatoren - Teil 2: Rahmenwerk für die Entwicklung von Indikatoren für Ingenieurbauwerke*. Berlin: Beuth Verlag, 2015. [Online]. Available: <https://www.beuth.de/de/vornorm/iso-ts-21929-2/232505828>
- [80] BRE Group, *BREEAM Infrastructure | Achieving Sustainable Infrastructure*. [Online]. Available: <https://bregroup.com/products/ceequal/> (accessed: Mar. 14 2024).
- [81] Institute for Sustainable Infrastructure, *Envision Sustainability Framework*. [Online]. Available: <https://sustainableinfrastructure.org/envision/use-envision/> (accessed: Mar. 14 2024).
- [82] SuRe, *Standard for Sustainable and Resilient Infrastructure*. [Online]. Available: <https://sure-standard.org/> (accessed: Mar. 14 2024).
- [83] Infrastructure Sustainability Council, *ISC Rating Tool*. [Online]. Available: <https://www.iscouncil.org/> (accessed: Mar. 14 2024).
- [84] US Federal Highway Association (FHWA), *Operations and Maintenance | INVEST - Sustainable Highways Self-Evaluation Tool*. [Online]. Available: <https://www.sustainablehighways.org/131/operations-and-maintenance.html> (accessed: Mar. 14 2024).
- [85] Greenroads, *Greenroads® Rating System*. [Online]. Available: <https://www.transportcouncil.org/> (accessed: Mar. 14 2024).
- [86] T. Mielecke, V. Kistner, C.-A. Graubner, A. Knauf, O. Fischer, and G. Schmidt-Thrö, *Entwicklung einheitlicher Bewertungskriterien fuer Infrastrukturbauwerke in Hinblick auf Nachhaltigkeit*, 2016.
- [87] T. Mielecke, C.-A. Graubner, and C. Roth, *Konzeptionelle Ansätze zur Nachhaltigkeitsbewertung im Lebenszyklus von Elementen der Straßeninfrastruktur*, 2016.
- [88] R. Hess, M. Lohmeier, T. Mielecke, and K. Kunz, *Nachhaltigkeitsbewertung von Streckenzügen der Straßeninfrastruktur*, 2022.
- [89] G. Schmidt-Thrö et al., *Pilotstudie zum Bewertungsverfahren Nachhaltigkeit von Straßenbrücken im Lebenszyklus*, 2016.

- [90] C.-A. Graubner, P. Ramge, R. Hess, M. Ditter, and M. Lohmeier, *Pre-Check der Nachhaltigkeitsbewertung für Brückenbauwerke*, 2016.
- [91] Fogib, *Ingenieurbauten—Wege zu einer ganzheitlichen Bewertung*. Stuttgart, Germany: Universität Stuttgart, 1997.
- [92] U. Kuhlmann *et al.*, "Nachhaltigkeitsanalysen von Stahlverbundbrücken," *Stahlbau*, vol. 83, no. 7, pp. 476–486, 2014, doi: 10.1002/stab.201410179.
- [93] B. f. S. ASTRA, *Nachhaltigkeits-Indikatoren für STRAsseninfrastrukturprojekte (NISTRA)*. [Online]. Available: <https://www.astra.admin.ch/astra/de/home/fachleute/dokumente-nationalstrassen/fachdokumente/nistra.html> (accessed: Mar. 14 2024).
- [94] SNBS, "SNBS 1.0 Infrastruktur Kriterienbeschrieb: Bereiche Mobilität/Transport, Energie, Wasser, Kommunikation, Schutzinfrastruktur," 2020. [Online]. Available: https://nnbs.ch/wp-content/uploads/2023/07/SNBS_Kriterienbeschrieb_Infrastruktur.pdf?bcs-agent-scanner=03a57d92-a77e-9543-a171-0610bca36311
- [95] E. Opan, I. Kiefer, J. Robra, J. Luthinger, P. Eggimann, and D. Krebs, "Faktenblatt SNBS Infrastruktur: Koordinationskonferenz der Bau- und Liegenschaftsorgane der öffentlichen Bauherren (KBOB)," 2020. [Online]. Available: https://nnbs.ch/wp-content/uploads/2023/07/SNBS_Infrastruktur_KBOB-Faktenblatt.pdf?bcs-agent-scanner=b2e9baff-c5cb-c046-bf79-4d86e7c9b7b2
- [96] AK Nachhaltigkeit im Tiefbau, Bergmeister Konrad, and Joachim Juhart, *Sachstand – Ökologisierung/Nachhaltigkeit im Bauwesen*: Österreichische Bautechnik Vereinigung, 2022.
- [97] Joachim Juhart, Claudia Baldermann, Gheorghe-Alexandru David, Gernot Fischer, and Alexander Passer, *Erescon - Neue Betone für den Infrastruktur-Bereich, Energie- und Ressourcenoptimiert*: Eigenverlag, 2015.
- [98] VIF 2020, "Hintergrundinformationen zum LCCO2 Berechnungstool: Ein Ergebnis des VIF 2020 Forschungsprojektes „Decarbonisation First“ und der öbv Arbeitsgruppe „Ökodaten“,“ 2023. [Online]. Available: https://www.asfinag.net/media/gcepvj2r/hintergrundinfo_lcco2.pdf
- [99] LzInfra, *Lebenszyklustool zur Nachhaltigkeitsbewertung von Verkehrsinfrastrukturen*. Wien: FFG Projektdatenbank, 2023. [Online]. Available: <https://projekte.ffg.at/projekt/4685650>
- [100] ÖBV, *Forschung der FFG & ÖBV*, 2024. [Online]. Available: <https://www.bautechnik.pro/Arbeitskreise/forschung>
- [101] T. Glättli *et al.*, *Digital vernetzte Bauprodukt Daten als Grundlage für die Zirkularität: Anforderungen und Lösungsansätze*. Whitepaper. Zürich: Bauen digital Schweiz /

- buildingSMART Switzerland, 2024. [Online]. Available: https://www.gs1.ch/sites/default/files/2024-01/2024-01%2520Whitepaper_BauproduktDaten_Zirkularit%25C3%25A4t_DE.pdf
- [102] BMZ, *Klimaabkommen von Paris: Bundesministerium für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung*. [Online]. Available: <https://www.bmz.de/de/service/lexikon/klimaabkommen-von-paris-14602> (accessed: Mar. 14 2024).
- [103] Europäischer Rat, *Ein europäischer Grüner Deal*. [Online]. Available: <https://www.consilium.europa.eu/de/policies/green-deal/> (accessed: Mar. 14 2024).
- [104] EU, *Verordnung (EU) 2020/852 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 18. Juni 2020 über die Einrichtung eines Rahmens zur Erleichterung nachhaltiger Investitionen und zur Änderung der Verordnung (EU) 2019/2088*. [Online]. Available: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/de/TXT/?uri=CELEX%3A32020R0852> (accessed: Mar. 14 2024).
- [105] A. Bassen, T. Busch, O. Kordsachia, K. Lopatta, and M. Wilkens, "EU-Taxonomie – Was ist das?: Policy Brief - 3/2021," *Wissenschaftsplattform Sustainable Finance*, 2021. [Online]. Available: https://wpsf.de/wp-content/uploads/2021/03/WPSF_PolicyBrief_3-2021_Taxonomie_I_Was_ist_das.pdf
- [106] F. Gräf and J. Weidner, "Sustainable Finance-Taxonomie," *Monatsbericht: Schlaglichter der Wirtschaftspolitik*, 2020. [Online]. Available: https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Publikationen/Schlaglichter-der-Wirtschaftspolitik/schlaglichter-der-wirtschaftspolitik-09-2020.pdf?__blob=publicationFile&v=40
- [107] BDO, "BLEIBEN SIE AUF DEM LAUFENDEN ZUR EU-TAXONOMIE," *Audit & Assurance*, 2022. [Online]. Available: https://karriere.bdo.de/sites/default/files/2023-04/broschuere_eu-taxonomie.pdf
- [108] BIM Deutschland, "Standard-Anwendungsfälle: MUSTERSTECKBRIEF, NOMENKLATUR UND HARMONISIERTE LISTE DER ANWENDUNGSFÄLLE," 2022. [Online]. Available: https://www.bimdeutschland.de/fileadmin/media/Downloads/Anwendungsfaelle_-_AWF/20220216_BIM_D_AP22_AWF_V2.0.pdf
- [109] Deutsches Institut für Bautechnik (DiBt), *Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung/Allgemeine Bauartgenehmigung: Nummer Z-15.1-339: TOGE TSM BC SB reLAST für die Querkraftverstärkung*. [Online]. Available: <https://www.dibt.de/de/service/zulassungsdownload/detail/Z-151-339> (accessed: Sep. 29 2024).
- [110] FSV, *RVS 13.05.11 Lebenszykluskostenermittlung für Brücken*. Wien: Österreichische Forschungsgesellschaft Straße – Schiene - Verkehr, 2017. [Online].

Available: <https://www.fsv.at/shop/produktdetail.aspx?IDProdukt=5670502f-6e79-440b-a711-4b35bc0fb8ef>

- [111] T. Zinke *et al.*, "Digital twins for bridges – concept of a modular digital twin based on the linked data approach," in *Life-Cycle of Structures and Infrastructure Systems: PROCEEDINGS OF THE EIGHTH INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON LIFE-CYCLE CIVIL ENGINEERING (IALCCE 2023), 2-6 JULY, 2023, POLITECNICO DI MILANO, MILAN, ITALY*, F. Biondini and D. M. Frangopol, Eds., Erscheinungsort nicht ermittelbar: Taylor & Francis, 2023, pp. 1745–1752.
- [112] P. Hagedorn, E. Petrova, and M. König, "A System-of-Systems Approach for Deploying Containerized Construction Digital Twins using Linked Data," *Advances in Information Technology in Civil and Building Engineering: Proceedings of ICCCBE 2024 - Volume 1&2*, 2024.
- [113] ISO 21597-1, *Information container for linked document delivery: Exchange specification - Part 1: Container*, 1st ed. Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization, 2020. Accessed: Jun. 27 2022. [Online]. Available: <https://www.iso.org/standard/74389.html>
- [114] P. Pauwels, A. Costin, and M. H. Rasmussen, "Knowledge Graphs and Linked Data for the Built Environment," in *Springer eBook Collection*, vol. 20, *Industry 4.0 for the Built Environment: Methodologies, Technologies and Skills*, 1st ed., Cham: Springer International; Springer International Publishing, 2022, pp. 157–183.
- [115] K. Farghaly, F. H. Abanda, C. Vidalakis, and G. Wood, "BIM-linked data integration for asset management," *BEPAM*, vol. 9, no. 4, pp. 489–502, 2019, doi: 10.1108/BEPAM-11-2018-0136.
- [116] R. Cyganiak, D. Wood, and M. Lanthaler, "RDF 1.1 Concepts and Abstract Syntax: W3C Recommendation 25 February 2014," *W3C Recommendations*, 2014. [Online]. Available: <https://www.w3.org/TR/2014/REC-rdf11-concepts-20140225/>
- [117] J. Beetz, "Ordnungssysteme im Bauwesen: Terminologien, Klassifikationen, Taxonomien und Ontologien," in *VDI-Buch, Building Information Modeling: Technologische Grundlagen und industrielle Praxis*, A. Borrmann, M. König, C. Koch, and J. Beetz, Eds., Wiesbaden: Springer Vieweg, 2015, pp. 163–175.
- [118] S. Harris and A. Seaborne, "SPARQL 1.1 Query Language: W3C Recommendation 21 March 2013," *W3C Recommendations*, 2013. [Online]. Available: <https://www.w3.org/TR/sparql11-query/>
- [119] ISO 7817-1, *Building information modelling— Level of information need: Part 1: Concepts and principles*, 1st ed. Geneva, Switzerland: International Organization for

- Standardization, 2024. Accessed: Feb. 6 2024. [Online]. Available: <https://www.iso.org/standard/82914.html>
- [120] L. Liu and P. Hagedorn, *Level of Information Need (LOIN) Ontology*. [Online]. Available: <https://rub-informatik-im-bauwesen.github.io/ir-ontologies/loin/loin.html> (accessed: Sep. 29 2024).
- [121] M. Mellenthin Filardo, L. Liu, P. Hagedorn, Zentgraf, Sven, J. Melzner, and M. König, "A standard-based ontology network for information requirements in digital construction projects: Forthcoming," *Proceedings of the 12th Linked Data in Architecture and Construction Workshop (LDAC2024), June 13–14, 2024, Bochum, Germany, 2024*.
- [122] M. Mellenthin Filardo, L. Liu, P. Hagedorn, and Zentgraf, Sven, *Data Template (DT) Ontology*. [Online]. Available: <https://rub-informatik-im-bauwesen.github.io/ir-ontologies/dt/dt.html> (accessed: Sep. 29 2024).
- [123] M. Poveda-Villalón, A. Fernández-Izquierdo, M. Fernández-López, and R. García-Castro, "LOT: An industrial oriented ontology engineering framework," *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, vol. 111, p. 104755, 2022, doi: 10.1016/j.engappai.2022.104755.
- [124] P. Hagedorn, "Semantic validation of information containers for reliable BIM information exchange," Doctoral Dissertation, Ruhr-Universität Bochum, Bochum, 2024. [Online]. Available: <https://doi.org/10.13154/294-10863>
- [125] J. Oraskari *et al.*, *The IFC to Linked Building Data Converter IFCToLBD v 2.41.0*. [Online]. Available: <https://github.com/jyrkioraskari/IFCToLBD> (accessed: Apr. 8 2024).
- [126] BBSR, *ÖKOBAUDAT Anleitungen für Softwareentwickler*. [Online]. Available: <https://www.oekobaudat.de/anleitungen/softwareentwickler.html> (accessed: Sep. 29 2024).
- [127] BIM Deutschland, "Objektkatalog: Rahmendokument Version 1.0," Berlin, 2024.
- [128] N. Bertola and E. Brühwiler, "Transforming the Static System of Prestressed Concrete Bridges Using UHPFRC," *J. Bridge Eng.*, vol. 30, no. 7, 2025, doi: 10.1061/JBENF2.BEENG-7234.
- [129] European Union's Horizon 2020 research and innovation programme, *InfraROB Project: Maintaining integrity, performance and safety of the road infrastructure through autonomous robotized solutions and modularization*. [Online]. Available: <https://infrarobproject.com/> (accessed: Jan. 29 2026).