

Master of Science FHNW in Virtual Design and Construction

Chancen und Mehrwerte der Digitalisierung bei der Ausführung der Querverbindungen des zweiten Gotthardstrassentunnels

Entwicklung und Validierung eines CDE-basierten
Workflows zur modellbasierten Qualitätskontrolle im
Tunnelbau



Alice Panciera

Thesis-Begleiter: Prof. Oliver Schneider

Thesis-Experte: Renato Baumann

Praxispartnerin: IG-2G-BN/ASTRA/ILF

Eigenständigkeitserklärung

"Ich erkläre hiermit,

dass ich die vorliegende Master-Thesis mit dem Titel **Chancen und Mehrwerte der Digitalisierung bei der Ausführung der Querverbindungen des zweiten Gotthardstrassentunnels** selbst und selbständig verfasst habe,

dass ich sämtliche nicht von mir selbst stammenden Textstellen bzw. Bestandteile eines Werkes (Bilder, Grafiken, Codes, etc.) gemäss gängigen wissenschaftlichen Zitierregeln korrekt zitiert und die verwendeten Quellen gut sichtbar erwähnt habe;

dass ich in einem Verzeichnis alle verwendeten Hilfsmittel (KI-Assistenzsysteme wie Chatbots [z.B. ChatGPT], Übersetzungs- [z.B. DeepL] Paraphrasier- [z.B. Quill bot]) oder Programmierapplikationen [z.B. GitHub Copilot] deklariert und ihre Art der Verwendung offenlege und bei den entsprechenden Textstellen angegeben habe,

dass ich sämtliche immateriellen Rechte an von mir allfällig verwendeten Materialien wie Bilder oder Grafiken erworben habe oder dass diese Materialien von mir selbst erstellt wurden;

dass das Thema, die Arbeit oder Teile davon nicht bei einem Leistungsnachweis eines anderen Moduls verwendet wurden, sofern dies nicht ausdrücklich mit der Dozentin oder dem Dozenten im Voraus vereinbart wurde und in der Arbeit ausgewiesen wird;

dass ich mir bewusst bin, dass meine Arbeit auf Plagiate und auf Drittautorschaft menschlichen oder technischen Ursprungs (künstliche Intelligenz) überprüft werden kann;

dass ich mir bewusst bin, dass die Hochschule für Architektur, Bau und Geomatik einen Verstoß gegen diese Eigenständigkeitserklärung bzw. die ihr zugrundeliegenden Studierendenpflichten der Studien- und Prüfungsordnung der Hochschule für Architektur, Bau und Geomatik verfolgt und dass daraus disziplinarische (Verweis oder Ausschluss aus dem Studiengang) Folgen resultieren können.“

Vorname Nachname: Alice Panciera

Ort, Datum: Quartino, 21.05.2026

Unterschrift:

Abstract

Die vorliegende Masterarbeit untersucht die Digitalisierung der Qualitätskontrolle bei den Querverbindungen des zweiten Gotthard-Strassentunnels. Ausgangspunkt ist ein analog-hybrider Prozess, bei dem Prüfprotokolle und Nachweise überwiegend über Papier, PDF, E-Mail oder separate Ablagestrukturen geführt werden. Dies führt zu Medienbrüchen, Suchaufwand, Verzögerungen und einer eingeschränkten Weiterverwendbarkeit der Qualitätsdaten.

Auf Grundlage einer Literaturrecherche, einer Ist-Zustandsanalyse, semi-strukturierter Fachgespräche und einer Variantenstudie wurden drei digitale Lösungsszenarien entwickelt und bewertet. Die Varianten reichen von einer dokumentenbasierten Ablage in Trimble Connect über eine modellbasierte Erfassung mittels Property Sets bis zu einer API-basierten Prozessintegration. Als Zielvariante für die Fallstudie wurde die modellbasierte Qualitätssicherung über Property Sets ausgewählt.

Die prototypische Umsetzung erfolgte am Innenausbau der Querverbindung QV04. Dabei wurde eine Property-Set-Bibliothek für den Bereich Abdichtung aufgebaut und anhand zweier Prüfstufen getestet. Die Fallstudie zeigt, dass qualitätsrelevante Informationen aus dem Kontrollplan grundsätzlich bauteilbezogen und strukturiert im Modell abgebildet werden können. Gleichzeitig zeigte sich, dass Property Sets allein keinen unveränderbaren, beidseitig freigegebenen Prüfnachweis sicherstellen.

Daraus wird ein zweistufiger Umsetzungspfad abgeleitet: kurzfristig eine dokumentenbasierte Übergangslösung mit CDE-Ablage und Modellverknüpfung, langfristig eine API-basierte Freigabe- und Archivierungslogik. Die Arbeit zeigt, dass digitale Qualitätskontrolle nicht primär eine Softwarefrage ist, sondern eine prozessuale Verbindung von Kontrollplan, Modell, CDE, Freigabe- und Nachweisführung erfordert. Damit diese Verbindung im Projektalltag wirksam wird, müssen Rollen, Verantwortlichkeiten, Schulung und Akzeptanz der beteiligten Projektpartner von Anfang an mitgedacht werden.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Hintergrund und Kontext	1
1.2	Ziele	2
1.3	Fragenstellung	2
1.3.1	Hauptfragenstellung	2
1.3.2	Teilfragestellungen	2
1.4	Vorgehen	3
1.5	Überblick	3
1.6	Abgrenzung	4
2	Grundlagen	5
2.1	Projektinformation 2. Röhre Gotthard Strassentunnel	5
2.1.1	Geschichte des Gotthard	5
2.1.2	Meilensteine des 2TG	6
2.1.3	Informationen über das Projekt	7
2.1.4	Vorstellung der Ingenieurgemeinschaft IG 2G-BN	14
2.1.5	QM-Kompetenzen und Verantwortlichkeiten	17
2.2	Stand der Forschung	19
2.2.1	Vorgehen der Literaturrecherche	19
2.2.2	Datenerhebung 1	19
2.2.3	Auswertungsmethodik	21
2.2.4	Datenerhebung 2	23
3	Methode	26
3.1	Forschungsdesign und prozessorientierter Ansatz	26
3.1.1	Recherche in der wissenschaftlichen Literatur	28
3.1.2	Analyse des Ist-Zustands	28
3.1.3	Empirische Datenerhebung: Fachgespräche	28
3.1.4	Qualitative Inhaltsanalyse und Kategorisierung	29
3.2	Entwicklung des digitalen Workflows und Validierung	29
3.2.1	Variantenstudie und Konzeptentwicklung	29
3.2.2	Prototypische Umsetzung und Test am Anwendungsfall	29
3.2.3	Handlungsempfehlungen und Projektabschluss	29
4	Ausgangspunkt	30
4.1	Literaturrecherche	30
4.1.1	Digitale Qualitätskontrolle im Bauwesen	30
4.1.2	CDE und modellbasierte Informationsverknüpfung	30
4.1.3	Digitale Technologien im Tunnelbau	31
4.1.4	Fazit zur Literaturrecherche	31
4.2	Ist-Zustand Analyse: Ausführungsprozess und Qualitätskontrolle	32

4.2.1	Informationsfluss und operative Planung.....	33
4.2.2	Ausführung und Qualitätsüberwachung.....	34
4.2.3	Der Inhalte des Kontrollplans	34
4.2.4	Die Rolle des Kontrollplans	35
4.2.5	Der Nutzen des Kontrollplans in VDC.....	35
4.2.6	Buchhalterische Validierung und «Ausmass».....	37
5	Datenerhebung.....	38
5.1	Erhebungsinstrument: Fragenkatalog	38
5.1.1	Struktur und Modulaufbau	38
5.1.2	Methodik der Zweisprachigkeit	38
5.2	Durchführung der Fachgespräche.....	38
5.2.1	Auswahl der Experten und Stakeholder-Matrix.....	39
5.2.2	Prozessvorstellung und Fachgespräch-Ablauf.....	40
5.2.3	Zentrale Erkenntnisse der Fachgespräche	40
5.3	Ableitung der Evaluierungskriterien.....	43
5.3.1	Definition technischer und operativer Anforderungen	43
5.3.2	Kategorisierung für die Variantenbewertung.....	44
6	Lösungsentwicklung	46
6.1	Variantenbildung	46
6.1.1	Variante 1: Trimble Connect Basic (Digitales Dokumentenmanagement).....	48
6.1.2	Variante 2: Trimble Connect Pro (Einführung des P-Set)	50
6.1.3	Variante 3: Prozessautomatisierung via API-Integration (Full Digital Workflow).....	52
6.1.4	Übersicht.....	54
6.2	Entscheidung Variante	55
6.2.1	Begründung der Entscheidung	55
7	Fallstudie.....	56
7.1	Erste Iteration des Prototyps	56
7.1.1	Test-Projekt und Modellgrundlage.....	56
7.1.2	Property-Set-Bibliothek „Abdichtung“	58
7.1.3	Operativer Workflow und Rückkanal	60
7.2	Validierung des Prototyps	61
7.2.1	Formale Validierung anhand der Evaluierungskriterien	61
7.2.2	Interne Validierung mit Projektbeteiligten und Fachauskunft	62
7.2.3	Ableitung von Verbesserungsmaßnahmen	63
7.2.4	Einschränkungen und Ergebnis der Entwicklungsphase	64
7.3	Zweite Iteration und Einordnung.....	65
7.3.1	Prüfung der Checklist Extension	65
7.3.2	Dokumentenbasierte Übergangslösung.....	66
7.4	Schlussfolgerung: hybride Umsetzung und API-basierter Zielzustand.....	66

8	Handlungsempfehlungen	68
8.1	Konsolidierter Soll-Prozess für die digitale Qualitätskontrolle.....	68
8.2	Empfehlungen zur Prozessanpassung	69
8.2.1	Verankerung der Übergangslösung im Tagesgeschäft.....	69
8.2.2	Schrittweise Überführung in die Zielarchitektur	70
8.2.3	Rollen, Verantwortlichkeiten und Pflege der Bibliothek	70
8.3	Empfehlungen zur Förderung der Akzeptanz.....	71
8.3.1	Schulung und Befähigung der Mitarbeitenden	71
8.3.2	Iterative Einführung über die nächsten Querverbindungen	71
8.3.3	Vertragliche und kulturelle Einbettung.....	72
8.4	Empfehlungen zur Verbesserung von Transparenz, Nachvollziehbarkeit und Effizienz	72
8.4.1	Transparenz	72
8.4.2	Nachvollziehbarkeit.....	73
8.4.3	Effizienz.....	73
8.5	Zusammenfassende Antwort auf die Teilforschungsfrage.....	74
9	Resultate.....	75
9.1	Auswertung der Datenerhebung	75
9.2	Auswertung der Variantenstudie.....	76
9.3	Auswertung der Fallstudie	77
9.3.1	Konfiguration des Prototyps.....	77
9.3.2	Validierung gegenüber dem Anforderungskatalog	77
9.3.3	Ergebnisse der iterativen Verbesserung	78
9.4	Synthetische Gegenüberstellung der drei Zustände	79
10	Diskussion.....	80
10.1	Interpretation der Ergebnisse.....	80
10.2	Beantwortung der Forschungsfragen.....	81
10.3	Grenzen der Arbeit	82
10.4	Ausblick	83
10.5	Schlussbemerkung.....	83
11	Quellenverzeichnis	84
12	Abbildungsverzeichnis.....	86
13	Tabellenverzeichnis.....	87
14	Anhang.....	88

Abkürzungen

Abkürzung	Bedeutung
2TG	Zweite Röhre Gotthard Strassentunnel
ABS	Ausbruchsicherung
ACC	Autodesk Construction Cloud
API	Application Programming Interface
AQV	Ausführungs- und Qualitätsvorschriften
ASTRA	Bundesamt für Strassen
AUB	Ausbruch
BAP	BIM-Abwicklungsplan
BCF	BIM Collaboration Format
BH	Bauherr
BIM	Building Information Modelling
BIM2FIELD	Building Information Modelling to Field
BL	Bauleitung
BPMN	Business Process Model and Notation
CBL	Chefbauleiter
CDE	Common Data Environment
CRB	Schweizerische Zentralstelle für Baurationalisierung
DMS	Dokumentenmanagementsystem
EIR	Exchange Information Requirements
FIELD2BIM	Field to Building Information Modelling
IAB	Innenausbau
IFC	Industry Foundation Classes

Abkürzung	Bedeutung
IG-2G-BN	Ingenieurgemeinschaft 2. Gotthard (Abschnitt Nord)
ITA	International Tunnelling Association
KDB	Kunststoffdichtungsbahn
KP	Kontrollplan
LOG	Level of Geometry
LOI	Level of Information
LOIN	Level of Information Need
LS	Lieferschein
LV	Leistungsverzeichnis
MWD	Measurement While Drilling
NPK	Normpositionenkatalog
OBL	Oberbauleitung
öBL	Örtliche Bauleitung
PDF	Portable Document Format
PRISMA	Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses
PV	Projektverfasser
QC	Quality Control
QM	Quality Management
QV	Querverbindung
SIA	Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein
SiBe	Sicherheitsbeauftragte(r)
SISTo	Service- und Infrastrukturstollen
SPV	Sprengvortrieb
TA	Technische Administration

Abkürzung	Bedeutung
TBM	Tunnelbohrmaschine
TR	Tagesrapport
UBB	Umweltbaubegleitung
UN	Unternehmer / Unternehmung
UVEK	Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation
VDC	Virtual Design and Construction
VSS	Vereinigung Schweizerischer Strassenfachleute
WELK	Werkleitungskanal (vorgefertigter Kanal)
WLAN	Wireless Local Area Network

1 Einleitung

1.1 Hintergrund und Kontext

Derzeit wird die zweite Röhre des Gotthard-Strassentunnels realisiert. Im Rahmen des Projekts ist ein BIM-Pilotvorhaben nach dem BIM2FIELD-Ansatz geplant, bei dem die Plattformen Autodesk Construction Cloud (ACC) und Trimble Connect zum Einsatz kommen. Ziel ist es, zwei Querverbindungen zwischen der zweiten Röhre und dem Service- und Infrastrukturstollen (SISTo) herzustellen. Neben der Mengenverfolgung soll insbesondere die Qualitätskontrolle (QC) über digitale Plattformen optimiert werden.

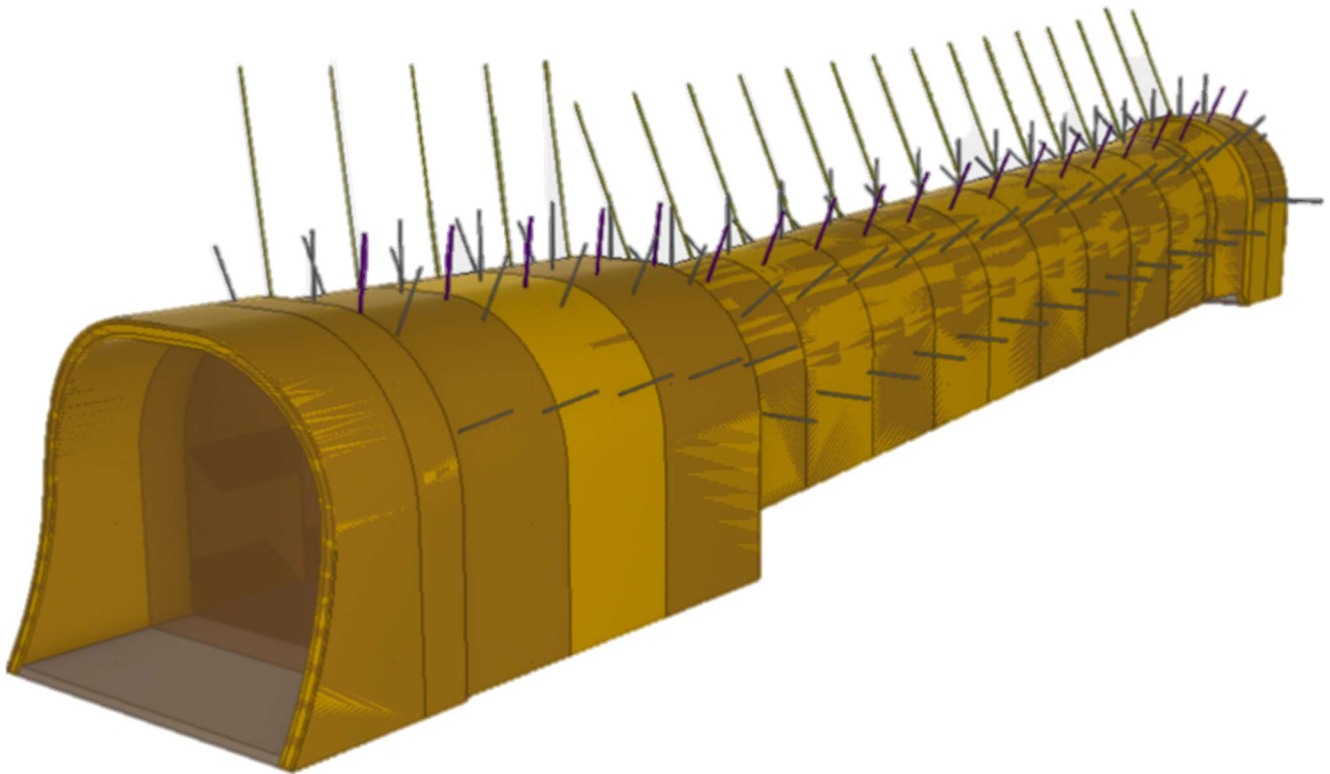


Abbildung 1, Ansicht Ausbruchsicherung DBM in Trimble, eigene Abbildung

Der aktuelle Qualitätskontrollprozess weist eine definierte Struktur auf, ist jedoch weitgehend manuell geprägt. Die Unternehmer sammeln die Daten und Prüfberichte, die dann hauptsächlich in Papierform oder als PDF-Datei per E-Mail oder SharePoint an die Bauleitung übermittelt werden. Dieser Ansatz verlangsamt die Validierung, birgt ein hohes Risiko für Übertragungsfehler und Informationsverluste und erfordert erhebliche Ressourcen für die Verwaltung und Kontrolle der Dokumente. Darüber hinaus führt das Fehlen eines einheitlichen Datenflusses dazu, dass Bauleiter und Bauführer eigene Methoden und Dokumentationen entwickeln, was zu uneinheitlichen Prozessen und einer Verringerung der Gesamttransparenz führt. Dieser Aspekt wird in Kapitel 4.2 vertieft.

Aus meiner Tätigkeit als Bauleiterin in Göschenen hat sich gezeigt, dass die heutige Datenübermittlung oft umständlich, unstrukturiert und verspätet erfolgt. Die Digitalisierung bietet hier erhebliches Potenzial, Prozesse zu verschlanken und die Qualitätssicherung zu verbessern.

1.2 Ziele

Ziel dieser Arbeit ist es, einen strukturierten und praxisorientierten Ansatz zur digitalen Qualitätskontrolle zu entwickeln, der die Integration von Kontrollplänen in ein Common Data Environment (CDE) im Rahmen eines BIM2FIELD-Workflows ermöglicht. Im Mittelpunkt steht die Frage, wie bestehende Prozesse der Qualitätskontrolle auf der Baustelle effizienter, konsistenter und mit einer höheren Qualitätssicherung umgesetzt werden können.

Um dieses übergeordnete Ziel zu erreichen, werden folgende Teilziele verfolgt, die unmittelbar mit den Forschungsfragen verknüpft sind:

- **Analyse des Ist-Zustands und seiner Schwachstellen**
Untersuchung der heutigen QC-Prozesse hinsichtlich Struktur, Medienbrüchen, Datenflüssen und der bestehenden Herausforderungen in Bezug auf Effizienz, Konsistenz und Nachvollziehbarkeit.
- **Definition technischer und organisatorischer Schnittstellen**
Präzisierung der Rollen, Verantwortlichkeiten und Datenübergaben, die notwendig sind, um eine vollständige und konsistente digitale Qualitätskontrolle im Sinne der Anforderungen aus den Kontrollplänen zu ermöglichen.
- **Entwicklung eines umsetzbaren, CDE-basierten QC-Workflows (Soll-Prozess)**
Konzeption eines strukturierten digitalen Ablaufs, der den Kontrollplan integriert, den Datenfluss zwischen Unternehmer, Bauleitung und CDE unterstützt und Unterbrüche reduziert sowie Validierungsprozesse beschleunigt.
- **Exemplarische Umsetzung eines CDE-basierten QC-Workflows bei einer Querverbindung**
Anwendung und Überprüfung des Soll-Prozesses an einem realen Teilbereich, um technische und organisatorische Anforderungen, Abhängigkeiten und Umsetzungsgrenzen sichtbar zu machen.
- **Erarbeitung von Empfehlungen zur Implementierung im Baustellenalltag**
Ableitung konkreter Massnahmen zur Prozessanpassung und zur Förderung der **Akzeptanz** bei den Mitarbeitenden, sowie Empfehlungen zur Verbesserung von Transparenz, Nachvollziehbarkeit und Effizienz im Vergleich zu bisherigen analogen bzw. hybriden Vorgehensweisen.

Durch die Bearbeitung dieser Ziele soll ein fundiertes Konzept entstehen, das sowohl die technische Machbarkeit als auch die organisatorischen Rahmenbedingungen berücksichtigt und als Grundlage für eine skalierbare Einführung digitaler Qualitätskontrollprozesse im Tunnel- und Infrastrukturbau dienen kann.

1.3 Fragenstellung

1.3.1 Hauptfragenstellung

Wie kann die Qualitätskontrolle auf der Baustelle durch die Integration von Kontrollplänen in ein Common Data Environment (CDE) im Rahmen eines BIM2FIELD-Workflows effizienter, konsistenter und mit einer besseren Qualität umgesetzt werden?

1.3.2 Teilfragestellungen

Welche Informationen und Prüfanforderungen aus dem Kontrollplan sollen in digitaler Form erfasst werden, um eine vollständige und konsistente Qualitätskontrolle zu ermöglichen?

Wie kann der Datenfluss zwischen Unternehmer, Bauleitung und CDE so gestaltet werden, dass Unterbrüche vermieden und Validierungsprozesse beschleunigt werden?

Welchen Mehrwert bietet die digitale Methodik im Vergleich zu den bisherigen analogen bzw. hybriden Vorgehensweisen hinsichtlich Transparenz, Nachvollziehbarkeit und Effizienz?

Welche organisatorischen Prozessanpassungen und welche Massnahmen zur Förderung der Akzeptanz bei den Mitarbeitenden sind notwendig, um die digitale Qualitätskontrolle erfolgreich in den Baustellenalltag zu integrieren?

1.4 Vorgehen

Das Vorgehen dieser Arbeit folgt einer systematischen Forschungs- und Entwicklungslogik. Ziel ist es, die bestehenden Qualitätskontrollprozesse der Querverbindungen zu analysieren, deren Schwachstellen zu identifizieren und daraus einen praxistauglichen digitalen Soll-Prozess abzuleiten.

Zu Beginn wird der Ist-Zustand der heutigen Qualitätskontrolle untersucht. Dabei stehen insbesondere die bestehenden Datenflüsse, Kommunikationswege, Medienbrüche sowie die organisatorischen Schnittstellen zwischen Unternehmer, Bauleitung und weiteren Projektbeteiligten im Vordergrund. Diese Analyse bildet die Grundlage für die spätere Definition des Handlungsbedarfs.

Parallel dazu erfolgt eine Literaturrecherche zu digitaler Qualitätskontrolle, CDE-basierten Workflows, BIM2FIELD-Ansätzen und digitalen Anwendungen im Tunnelbau. Die Erkenntnisse aus Forschung und Praxis dienen dazu, relevante Anforderungen und Bewertungskriterien für die Lösungsentwicklung abzuleiten.

Anschliessend werden semi-strukturierte Fachgespräche mit Schlüsselpersonen aus Bauleitung, Ausführung und Digitalisierung geführt. Als Grundlage dient die zuvor erstellte Visualisierung des Ist-Prozesses, damit die bestehenden Abläufe gezielt reflektiert und bewertet werden können. Die Aussagen werden qualitativ ausgewertet und in einem Kriterienkatalog zusammengeführt.

Auf Basis dieses Kriterienkatalogs werden mehrere technologische und prozessuale Lösungsvarianten entwickelt und bewertet. Dabei werden insbesondere Umsetzbarkeit, Datenqualität, Benutzerfreundlichkeit, Kosten und Automatisierungsgrad berücksichtigt. Die ausgewählte Variante wird anschliessend prototypisch ausgearbeitet und anhand der Querverbindungen des zweiten Gotthardstrassentunnels getestet.

Abschliessend werden die Ergebnisse der Fallstudie ausgewertet. Daraus werden technische und organisatorische Handlungsempfehlungen für die Einführung eines digitalen Qualitätskontrollprozesses im Baustellenalltag abgeleitet.

1.5 Überblick

Die Arbeit ist in mehrere aufeinander aufbauenden Kapitel gegliedert. Nach der Einleitung werden zunächst die relevanten Projektgrundlagen, die Organisation der Bauleitung sowie der Stand der Forschung zur digitalen Qualitätskontrolle und zu BIM-Anwendungen im Tunnelbau dargestellt. Darauf folgt die Beschreibung der gewählten Methodik.

Anschliessend wird der heutige Ausgangspunkt analysiert. Dazu gehören der bestehende Ausführungsprozess, die Rolle des Kontrollplans, die Informationsflüsse sowie die heutigen Schnittstellen zwischen Unternehmer, Bauleitung und Projektverfasser. Auf dieser Grundlage werden die Fachgespräche ausgewertet und Anforderungen an einen digitalen Soll-Prozess abgeleitet.

Im weiteren Verlauf werden verschiedene Lösungsvarianten entwickelt, bewertet und eine Zielvariante ausgewählt. Diese wird im Rahmen einer Fallstudie prototypisch angewendet und geprüft. Die Arbeit schliesst mit der Auswertung der Ergebnisse, Handlungsempfehlungen sowie einer kritischen Diskussion der Übertragbarkeit auf ähnliche Tunnelbauprojekte.

1.6 Abgrenzung

Das Projekt zur Realisierung der zweiten Gotthardröhre ist zu umfangreich, um im Rahmen dieser Masterarbeit vollständig untersucht zu werden. Die Arbeit beschränkt sich daher auf die Querverbindungen des Bauloses Nord mit Standort Göschenen.

Im Fokus stehen jene Querverbindungen, die während des Bearbeitungszeitraums der Masterarbeit geplant oder ausgeführt werden. Dazu zählen insbesondere:

- QV 4: Ausbruch August/Oktober 2025 – Verkleidung Mai/Juni 2026
- QV 7: Ausbruch März/Mai 2026 – Verkleidung August/September 2026

Die Untersuchung konzentriert sich auf die Qualitätskontrolle, den Kontrollplan, die zugehörigen Datenflüsse sowie die mögliche digitale Abbildung dieser Prozesse in einem CDE-basierten Workflow. Nicht Gegenstand der Arbeit ist eine vollständige Analyse aller Bauprozesse, aller Projektlose oder sämtlicher BIM-Anwendungsfälle des Gesamtprojekts.

In der Literaturrecherche werden neben konventionellen Tunnelbaumethoden auch Beiträge zum TBM-Vortrieb berücksichtigt. Diese sind nicht direkt auf alle untersuchten Querverbindungsprozesse übertragbar, liefern jedoch relevante Hinweise zu digitalen Erfassungs-, Auswertungs- und Dokumentationsmethoden im Tunnelbau.

2 Grundlagen

Dieses Kapitel legt die thematischen und projektbezogenen Grundlagen der vorliegenden Arbeit dar. Es gliedert sich in zwei Teile. Im ersten Teil (Kapitel 2.1) wird das Projekt «Zweite Röhre Gotthard Strassentunnel» vorgestellt: von der historischen Entwicklung des Gotthardkorridors über die zentralen Projektmeilensteine bis hin zur Beschreibung der ausführenden Organisation, der Ingenieurgesellschaft IG-2G-BN, und der Zuständigkeiten im Qualitätsmanagement. Damit wird der institutionelle und bautechnische Kontext geschaffen, innerhalb dessen die Untersuchung verortet ist.

Im zweiten Teil (Kapitel 2.2) wird der wissenschaftliche Stand der Forschung zu den relevanten Themenfeldern aufgearbeitet. Mittels einer systematischen Literaturrecherche in zwei Datenerhebungen werden Erkenntnisse zur digitalen Qualitätskontrolle im Bauwesen, zu CDE-basierten Informationsstrukturen und zu digitalen Technologien im Tunnelbau zusammengefasst. Die dabei identifizierten Forschungslücken bilden die Grundlage für die Fragestellung und das methodische Vorgehen der Arbeit.

2.1 Projektinformation 2. Röhre Gotthard Strassentunnel

Im Folgenden wird Bezug auf den aktuellen Baufortschritt zum Zeitpunkt des Verfassens der vorliegenden Masterarbeit genommen. Aktuelle Informationen zum Projekt sind stets auf der Website des ASTRA zu finden:

1. [ASTRA \(https://www.astra.admin.ch/astra/de/home/themen/nationalstrassen/baustellen/suedschweiz/secondotubogst.html\)](https://www.astra.admin.ch/astra/de/home/themen/nationalstrassen/baustellen/suedschweiz/secondotubogst.html) - Offizielle Website der Bundesstrassenbaustellen
2. [Gotthardtunnel \(gotthardtunnel.ch\)](https://gotthardtunnel.ch) Website zum Fortschritt dieses Bundesstrassenprojekts

2.1.1 Geschichte des Gotthard

Der Gotthard verbindet die Kantone Uri und Tessin. Bereits vor Jahrhunderten begann ab Göschenen sowie Airolo der Aufstieg zum Gotthardpass, der auf 2106 Metern über Meer liegt.

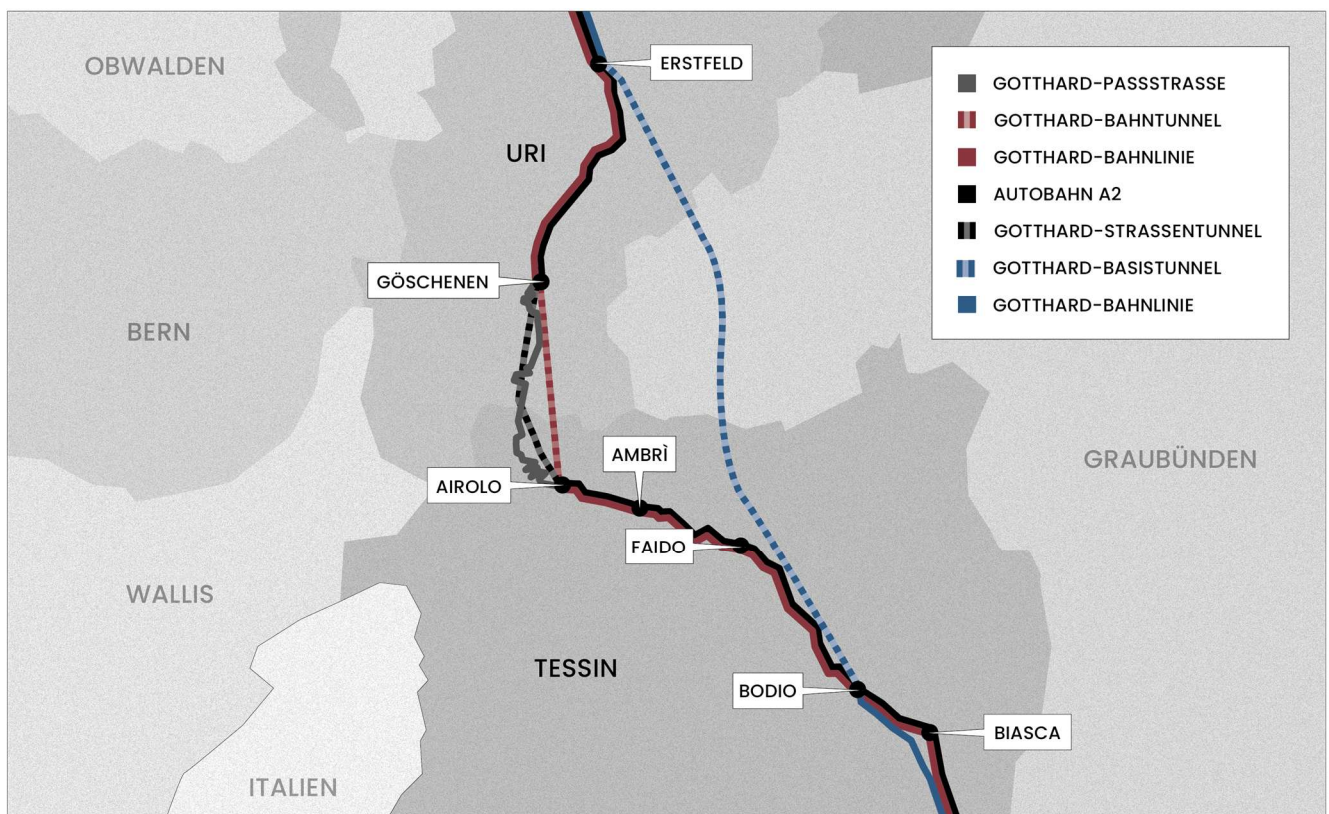


Abbildung 2, Vereinfachte Karte mit den Transitwegen des Gotthard (ASTRA, 2026a; ASTRA & IG 2G -BN, 2025)

Gegen Ende des 19. Jahrhunderts entstand mit dem Eisenbahntunnel (15 km) und der Gotthardbahn eine erste unterirdische Verbindung durch den Gotthard, welche die Reisezeit deutlich verkürzte.

In der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts entstand in der Schweiz ein weitläufiges Nationalstrassennetz. Am Gotthard wurde deshalb ein Autoverlad durch den bestehenden Bahntunnel eingerichtet. Erst mit der Eröffnung des Strassentunnels (16,9 km) konnten die Autos, Motorräder und Lastwagen ab 1980 durch den Gotthard fahren.

Der bisher letzte Meilenstein erfolgte 2016 mit der Fertigstellung des Gotthard- Basistunnels (57 km). Der längste Eisenbahntunnel der Welt ermöglicht eine Durchquerung der Alpen mit Hochgeschwindigkeitszügen (bis 200 km/h), ohne dass diese auf den Zufahrtsstrecken nennenswerte Anstiege überwinden müssen. Der Begriff «Basistunnel» bezeichnet denn auch Tunnelbauwerke, die ohne steile Zufahrtsrahmen durch ein Gebirge führen. Diese Tunnel sind im Normalfall wesentlich länger, komplexer und teurer als ein klassischer Scheiteltunnel, der bei geringerer Tunnellänge aber über steile Zufahrtsstrecken erschlossen werden muss.

Der nächste Meilenstein wird 2030 erreicht, wenn der Bau der zweiten Röhre abgeschlossen sein wird, die parallel zum ersten Gotthard- strassentunnel verläuft. (ASTRA, 2026a) (ASTRA & IG 2G -BN, 2025)

2.1.2 Meilensteine des 2TG

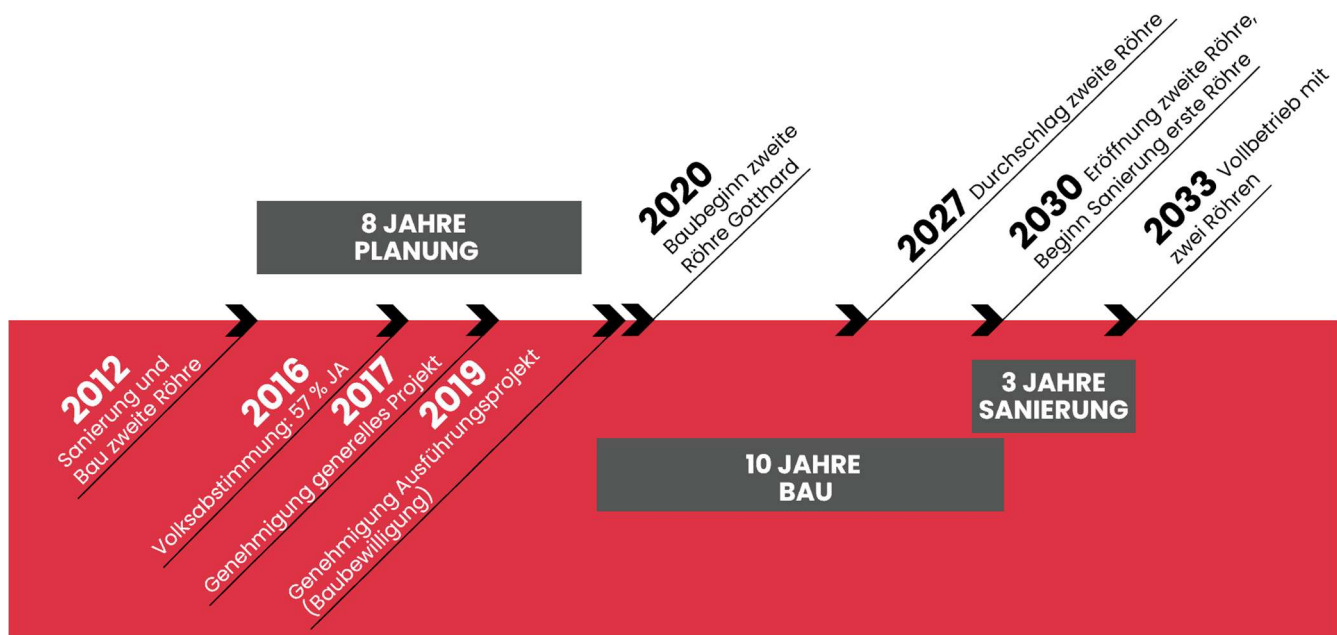


Abbildung 3, Timeline von der Idee bis zur vollständigen Inbetriebnahme (ASTRA & IG 2G -BN, 2025)

Für die Sanierung der bestehenden Tunnelröhre wurden verschiedene Varianten diskutiert. Im Jahr 2012 empfahl der Bundesrat den Bau einer zweiten Tunnelröhre durch den Gotthard. Im Jahr 2016 konnte die Bevölkerung über den Bau der zweiten Tunnelröhre abstimmen. Die Abstimmung wurde mit 57 % Ja-Stimmen zugunsten des Baus angenommen. (ASTRA & IG 2G -BN, 2025)

Nach der Genehmigung des generellen Projekts durch den Bundesrat 2017 und des Ausführungsprojekts 2019 konnten 2020 die ersten Arbeiten beginnen. Es ist geplant, dass sich die beiden Tunnelvortriebe gegen Ende 2027 zur zweiten Gotthardröhre vereinen. Daraufhin beginnt die letzte Bauphase, der Ausbau zum vollständig funktionsfähigen Strassentunnel. Mit der Eröffnung der zweiten Röhre (geplant für 2030) beginnt die Instandsetzung der ersten Röhre. Diese soll rund 3 Jahre dauern. (ASTRA & IG 2G -BN, 2025)

Ab 2033 stehen dann beide Röhren am Gotthardstrassentunnel zur Verfügung. Von da an wird der Verkehr jeweils einspurig geführt mit einem separaten Pannestreifen in jedem Tunnel (erste Röhre gegen Süden, zweite Röhre gegen Norden). Die Vorteile liegen auf der Hand: Die Sicherheit wird

erhöht und bei Unfällen, zukünftigen Sanierungen etc. bleibt die wintersichere Verbindung am Gott-hard stets gewährleistet. (ASTRA & IG 2G -BN, 2025)

2.1.3 Informationen über das Projekt

Die zweite Röhre entsteht parallel zur ersten Röhre mit einem Abstand von 70 Metern. Dazwischen liegt der Service- und Infrastrukturstollen (SISTo), welcher insbesondere dem Betrieb und Unterhalt dient. Die zweite Röhre wird, wie bereits die Erste, durch 68 Querverbindungen im Abstand von jeweils 250 Metern mit dem SISTo verbunden. Zwei davon sind Gegenstand dieser Masterarbeit. (ASTRA & IG 2G -BN, 2025)

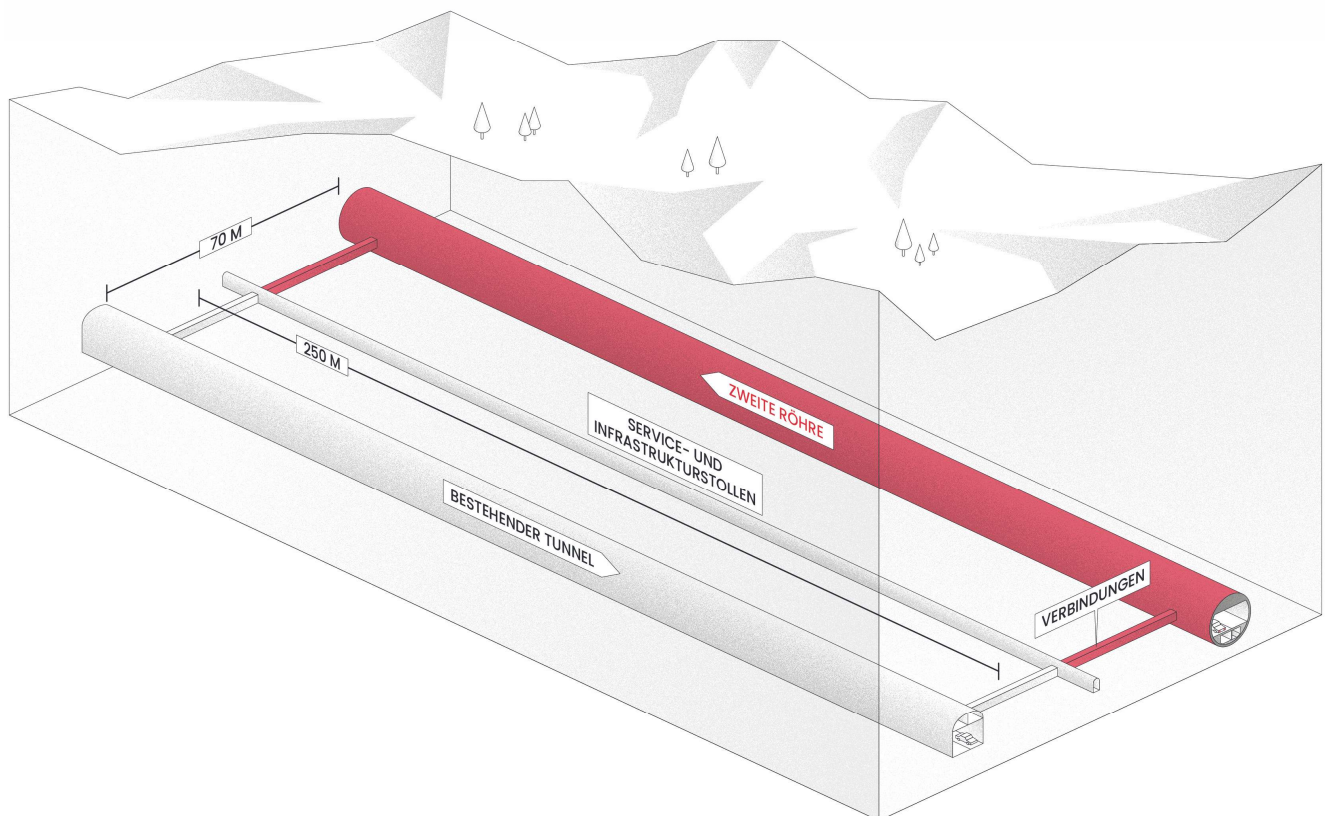


Abbildung 4, Axonometrische Darstellung von zwei Tunneln (ASTRA, 2026b; ASTRA & IG 2G -BN, 2025)

Der Tunnel wird grösstenteils mit zwei Bohrmaschinen (eine auf der Nordseite und eine auf der Südseite) erstellt. Die restlichen Abschnitte werden im konventionellen Vortrieb ausgebrochen. Um die bekannten Störzonen Nord und Süd zu erschliessen, werden zwei zu 2TG parallel verlaufende Zugangsstollen gebaut. (ASTRA & IG 2G -BN, 2025)

Damit können an zwei Stellen des Tunnels gleichzeitig gebaut werden:

- Der Bereich in der Nähe des Portals für den Start der TBM mit konventionellen Methoden und anschliessend mit der TBM
- Die Störzone (ca. 4 km von den Portalen entfernt) mit konventionellen Methoden

Der Grund für diese Vorgehensweise ist, dass die TBM den gestörten Abschnitt nicht durchbohren kann und schnell durch den bereits erstellten Hohlraum verschoben werden kann. Die Alternative wäre gewesen, die Störzone mit der Haupt-TBM zu erreichen, diese zu umgehen, um mit konventionellen Methoden die Störzone auszubringen und den TBM Vortrieb anschliessend wieder fortzusetzen. (ASTRA & IG 2G -BN, 2025)

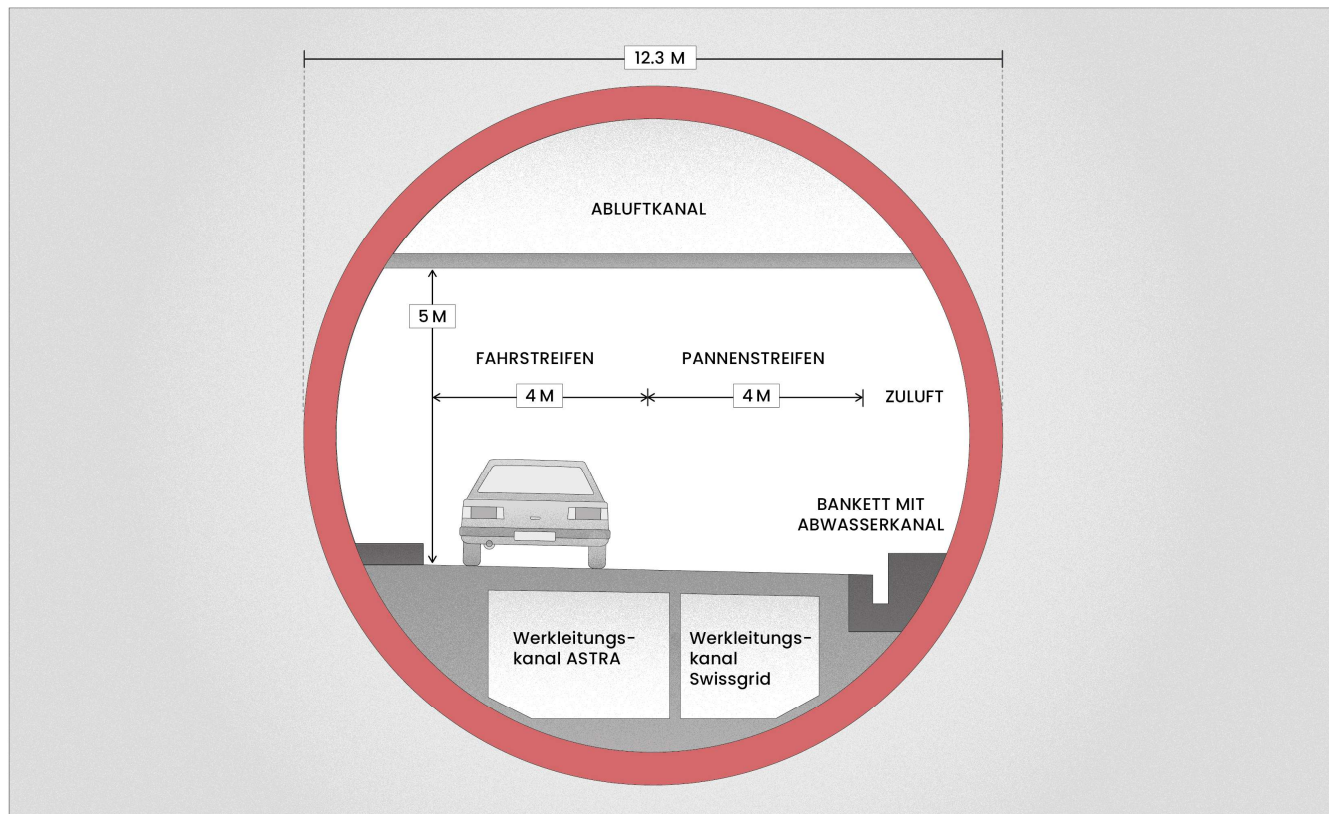


Abbildung 5, Schnitt des zweiten Röhre (ASTRA, 2026b; ASTRA & IG 2G -BN, 2025)

Die neue Röhre ähnelt der ersten Röhre: Sie wird über zwei Fahrspuren verfügen, wobei nach der Instandsetzung der ersten Röhre nur noch jeweils der linke Fahrstreifen befahren wird. Der rechte Fahrstreifen in beiden Röhren dient dann jeweils als Pannestreifen.

In der zweiten Röhre gibt es hingegen Werkleitungskanäle unterhalb der Fahrbahn. Im neuen Tunnel werden im linken Kanal (in Fahrtrichtung, gemäss Abbildung) alle betriebsrelevanten Leitungen für Strom, Kommunikation und Löschwasser installiert. Der rechte Kanal bietet Platz für die Infrastruktur von Swissgrid. So wird beispielsweise die Höchstspannungsleitung (220 kV), die heute über den Gotthardpass führt, in den Tunnel verlegt. (ASTRA & IG 2G -BN, 2025)

Damit entsteht in der neuen Gotthardröhre die längste unterirdische Höchstspannungsleitung der Schweiz. Die Kombination einer Höchstspannungsleitung mit einem Strassentunnel ist ein europäisches Novum. Für den Bau dieser Leitung sowie den vollständigen Rückbau der heutigen Freileitung über den Gotthardpass investiert die Swissgrid 107 Millionen Franken. (ASTRA & IG 2G -BN, 2025)

Geologie

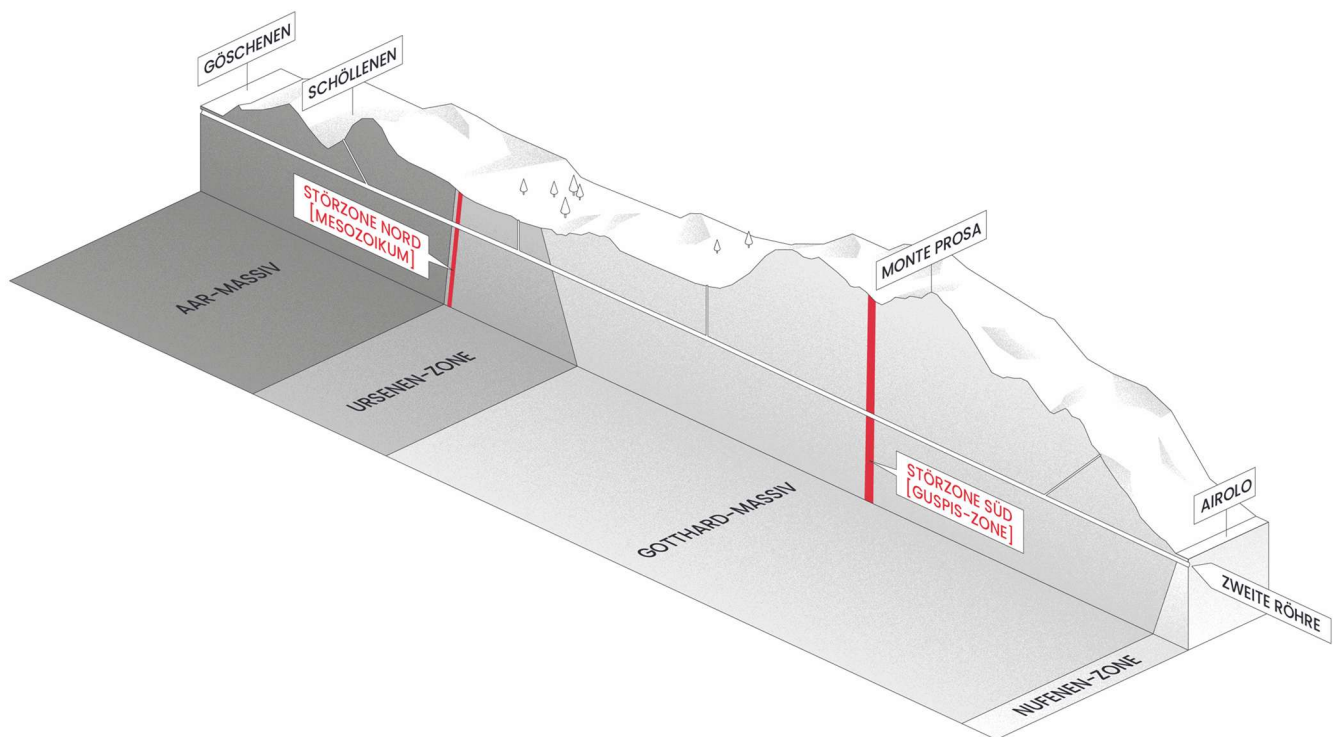


Abbildung 6, geologisches Schema (ASTRA, 2026c; ASTRA & IG 2G -BN, 2025)

Jeweils im Norden und Süden gibt es zwei längere geologische Störzonen:

- Störzone Nord: rund 270m lang, etwa 4,1 km vom Nordportal entfernt
- Störzone Süd: rund 300m lang, etwa 4,9 km vom Südportal entfernt

Diese Störzonen können nicht von den TBM aufgebohrt werden und müssen deshalb vorgängig gesprengt werden. Deshalb werden die zwei erwähnten Zugangsstollen bis zu diesen Stellen mit einer kleineren TBM gebohrt.

Generell werden bei den Arbeiten auf zahlreiche kleinere Störzonen angetroffen werden, erwartet werden jeweils eine bis drei kleine Störzonen pro 100 Meter. Aufgrund der geologischen Gegebenheiten werden diese gegen Süden tendenziell zunehmen.

Von Norden her durchquert der Tunnel das Aar-Massiv, das hauptsächlich aus Graniten und Paragneisen besteht. Anschliessend durchbohrt die Tunnelbohrmaschine die Urseren-Zone aus Gesteinen des Mesozoikums und des Permokarbons. Die dritte Formation ist das Gotthard-Massiv, das sich mehrheitlich aus Gneisen und Graniten zusammensetzt. Beim Portal Airolo trifft man auf die aus Metasedimenten bestehende Nufenen-Zone. In den Portalbereichen, finden sich unterschiedlich lange Abschnitte aus Lockergestein. (ASTRA & IG 2G -BN, 2025)

Vortriebsmethode

Bei der Tunnelbohrmaschine (TBM) handelt es sich um eine TBM-S-Einfachschild-Bohrmaschine mit einer Schildlänge von 10 Metern (weisser Mantel in der Abbildung). Der Durchmesser der TBM beträgt 12,3 Meter. Diese Bohrmaschine erzielt bis zu 4,6 Umdrehungen pro Minute mit einer mittleren Bohrleistung von 2 Metern pro Stunde. (ASTRA, 2026d; ASTRA & IG 2G -BN, 2025)

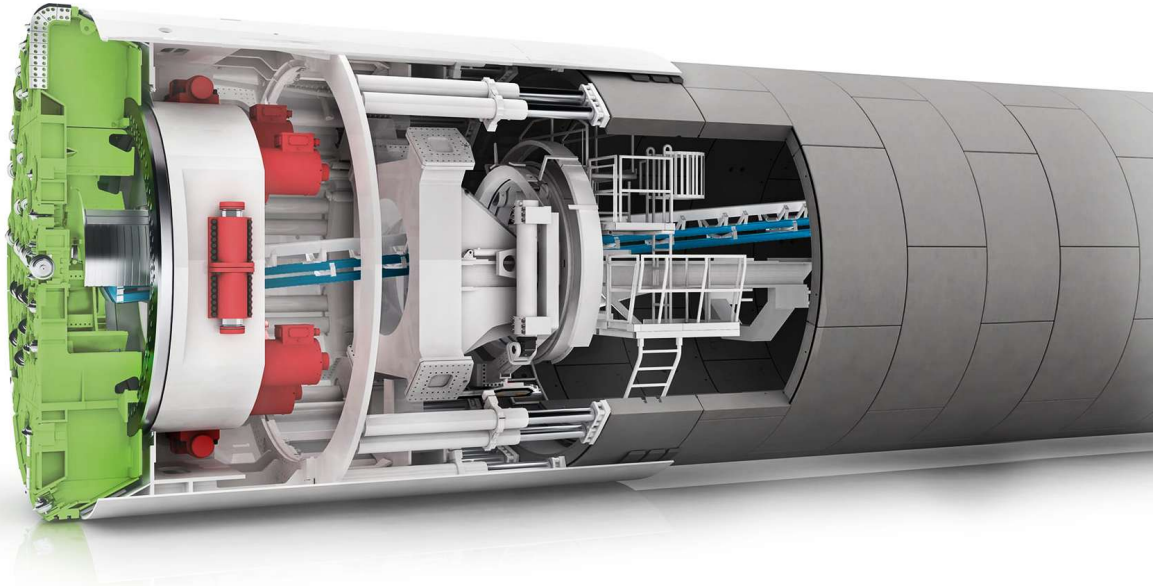


Abbildung 7, Schema des TBM-Kopf (ASTRA, 2026d)

Je eine TBM bohrt von Norden und von Süden. An beiden Portalen entstehen zunächst Startröhren, in welchen Spezialistinnen und Spezialisten die TBM aufbauen und für ihren Einsatz vorbereiten. Nach dem Durchstich erfolgen die Demontage und der Abtransport der Tunnelbohrmaschinen – die übrigens nach Tradition im Tunnelbau zu Beginn der Arbeiten einen weiblichen Namen erhalten (Taufe). (ASTRA, 2026d; ASTRA & IG 2G -BN, 2025)

Die Bohrmaschinen werden von Herrenknecht (Herrenknecht AG, 2026) hergestellt und nutzen die Überwachungsplattform für den Vortrieb von TPC (TPC Tunnelsoft, 2026). Diese Plattform ermöglicht es, den Fortschritt des Vortriebs in Echtzeit zu überwachen. Dies ist auch dank des im Tunnel installierten WLANs möglich.

Produktion von Beton, vorgefertigten Elementen und Automatismen

Der auf der Baustelle verwendete Beton wird grösstenteils direkt vor Ort in der Betonkaverne hergestellt. Auf der Baustelle gibt es einen Bereich, der aus mehreren Kavernen besteht, die ausschliesslich der Herstellung von Beton und Fertigteilelementen dienen. Dazu gehören:

- die Tübbinge: Kreissegmente, aus denen die Aussenverkleidung des Tunnels besteht (sie werden von der TBM verlegt)
- die WELK (Werkleitungskanäle): m-förmige Elemente, die unten die Leitungen und oben die Fahrbahn aufnehmen

Die Herstellung der Fertigteile erfolgt halbautomatisch. Das bedeutet, dass die Produktionsanlage eine echte Fabrik ist, die aus Robotern und Schienen besteht, wobei das Personal die Maschinen bedient.

In diesem Teil der Baustelle ist auch die Qualitätskontrolle teilweise digitalisiert und automatisiert. Mit Hilfe eines Geräts, das QR-Codes scannt, kann der Bauleiter die Bewehrung validieren und die Freigabe für die Betonierung erteilen sowie die Endqualität überprüfen, die festlegt, ob ein Element im Tunnel verbaut werden kann. (VMT GmbH, 2026)

Über das von der VMT GmbH (2026) bereitgestellte System erfolgt die Qualitätszertifizierung digital. Die Kommunikation läuft über eine WhatsApp-Gruppe, in welcher der Polier die BL informiert, dass die WELK zur Kontrolle bereitstehen. Anschliessend werden am Scanner die Daten zum Bauteil und zur Bewehrung angezeigt. Die Unternehmung ist für die Qualitätszertifizierung verantwortlich, weshalb die Kontrollen nach dem Betonieren durch die Bauleitung nur stichprobenartig erfolgen. Es liegt in der Verantwortung des UN, eventuelle Schäden oder Mängel zu melden resp. zu reparieren.

Es werden die Daten aufgeführt, die während der Produktion auf dem System erfasst und monatlich zur Validierung in einen Bericht im PDF-Format exportiert werden. (Arge secondo tubo & VTM GmbH, 2026) Die endgültige Validierung der Daten erfolgt somit manuell anhand eines Dokuments, das die Datenbank widerspiegelt (PDF), und nicht direkt in der Datenbank selbst.

Nachfolgend sind einige Bildauszüge aus dem WELK-Produktionsbericht aufgeführt, und in Anhang A der Auszug aus dem Bericht eines gesamten WELK. Dargestellt sind die Daten des geprüften WELK, seine Parameter und die Ereignisse.

Segmenteigenschaften		Segmentstatus am 06.03.2026	
Ringtyp	WELK	Alter in Tagen	5
Bewehrungskorbsondertyp	Typ 1 ✓	Status	Fertiggestellt
Baurichtung	U	Freigegeben	Nein
Bewehrungskorb	WB001671 (W-Typ 1) ✓	Gesperrt	Nein
Betonierzeitstempel	06.03.2026 21:19	Ausschuss	Nein
Schalung	WELK-3 ✓		

Parameter		
Zeile	Name	Value
1	Referenz Härtezeit time [h]	0.01
2	Referenz Reifezeit [h]	0
3	Referenz Lagerzeit [d]	14
4	Referenzgewicht [kg]	20000
5	Referenzvolumen [m3]	8.000 ✓
6	Betonchargen-Nr.	23342 ✓
7	Produktionsanlage	Segment production (Stationary 1)
8	Ausschalungszeitpunkt	2026-03-09 05:47:36
9	Nachbearbeitungszeitpunkt	2026-03-11 09:14:55

Abbildung 8, WELK-Parameter

Ereignisse			
Zeile	Zeitstempel	Text	Beschreibung
1	05.03.2026 02:16	Bewehrungskorb erzeugt	Reinforcement created with Barcode <B79012983> (Ins_Id:203)
2	05.03.2026 02:16	Bewehrungsetikett gedruckt	Reinforcement label printed (Ins_Id:203)
3	05.03.2026 02:16	Bewehrungsetikett nachgedruckt	Reinforcement - Label reprinted. (Ins_Id:203)
4	05.03.2026 02:16	Bewehrungsetikett gedruckt	Reinforcement label printed (Ins_Id:203)
5	06.03.2026 08:15	Bewehrungskorb wurde produziert	(Ins_Id:108)
6	06.03.2026 19:24	Bewehrungskorb begutachtet	Reinforcement examination passed  (Ins_Id:109)
7	06.03.2026 19:25	Segment erstellt	Segment created with Barcode <W79011779> (Ins_Id:108)
8	06.03.2026 19:25	Segment eingeschalt	(Ins_Id:108)
9	06.03.2026 21:19	Betonmischungs-ID eingetragen	Batch Identifier <23342> (Ins_Id:108)
10	06.03.2026 21:19	Betonierzeitpunkt gesetzt	Segment concreted (Ins_Id:108)
11	06.03.2026 21:19	Bewehrung betoniert	(Ins_Id:108)
12	06.03.2026 23:27	Segmentetikett gedruckt	Segment - Label printed. (Ins_Id:203)
13	09.03.2026 05:47	Segment ausgeschalt	Demoulding done (Ins_Id:108)
14	09.03.2026 05:47	Segment produziert	Produced (Ins_Id:108)
15	09.03.2026 05:47	Segmentetikett nachgedruckt	Segment - Label reprinted. (Ins_Id:601)
16	11.03.2026 09:14	Segment fertiggestellt	Segment Finished (Ins_Id:110)
17	11.03.2026 09:14	Segment im Übergabebereich	(Ins_Id:110)

Abbildung 9, WELK-Ereignisse

Wiederverwendung des Aushubmaterials

Der Bau des zweiten Tunnels generiert 7,4 Millionen Tonnen Gesteinsmaterial. Die Herausforderung, diesem Material ein zweites Leben zu geben, ist Teil des Projekts. Die Abbildung zeigt das Schema der Wiederverwendungs- und Deponieziele.

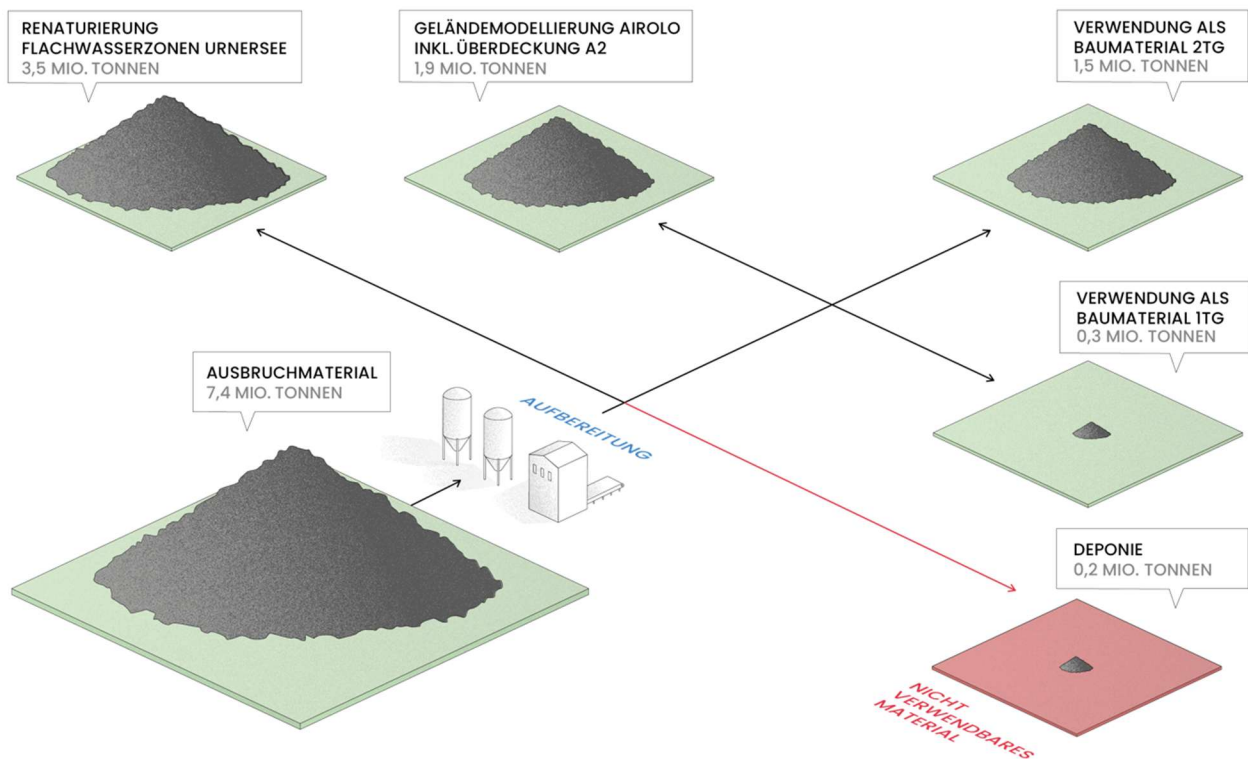


Abbildung 10, Schema der Wiederverwendungs- und Deponieziele (ASTRA, 2026c; ASTRA & IG 2G -BN, 2025)

Die Bahn transportiert rund 3,5 Mio. Tonnen Gesteinsmaterial aus dem Ausbruch der zweiten Röhre nach Flüelen. Dort findet es für die Renaturierung von Flachwasserzonen im Urnersee (Vierwaldstättersee) Verwendung. Unter Renaturierung versteht man in diesem Fall die Wiederherstellung von naturnahen Lebensräumen und Erhöhung der biologischen Vielfalt.

Das ASTRA nutzt 1,9 Millionen Tonnen des Ausbruchmaterials und gestaltet eine neue Überdeckung in Airolo. Die Gemeinde in der Leventina erhält dadurch ein neues Gesicht und wird zu neuem Leben erwachen.

Rund 1,8 Mio. Tonnen Ausbruchmaterial werden als Baumaterial verwendet, davon 1,5 Mio. Tonnen für den Bau der zweiten Röhre und 0,3 Mio. Tonnen für die Sanierung der ersten Röhre. Das Material wird dabei gebrochen, gereinigt und anschliessend als Gesteinskörnung für Beton verwendet.

Die restlichen 0,2 Millionen Tonnen Gesteinsmaterial werden auf einer Deponie entsorgt, da es als nicht wiederverwendbar eingestuft wird. (ASTRA, 2026c; ASTRA & IG 2G -BN, 2025)

2.1.4 Vorstellung der Ingenieurgemeinschaft IG 2G-BN

Im Rahmen des national bedeutenden Infrastrukturprojekts «Secondo tubo del San Gottardo» (2TG) hat das Bundesamt für Strassen (ASTRA) die örtliche Bauleitung (öBL) für den Abschnitt Nord der Ingenieurgemeinschaft IG 2G-BN übertragen. Das ASTRA nimmt in seiner Funktion als Bauherr die Verantwortung für Planung, Bau, Betrieb und Unterhalt des schweizerischen Nationalstrassennetzes wahr und ist dem Eidgenössischen Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation (UVEK) unterstellt.

Die IG 2G-BN wurde unter anderem mit der örtlichen Bauleitung für die Lose Los 241 – Haupttunnel Nord sowie unterstützend für Los 111 – Materialbewirtschaftung beauftragt. Während die Bauleitung für Los 111 grundsätzlich der öBL Süd obliegt, ist die öBL Nord vertraglich zu einer punktuellen Unterstützung verpflichtet. Die Ingenieurgemeinschaft ist direkt der Oberbauleitung Nord (OBL Nord) unterstellt und agiert im Rahmen eines Planervertrags gemäss den einschlägigen Bestimmungen der Norm SIA 118.

Die IG 2G-BN hat ihren Sitz in Göschenen und ist als multidisziplinäre Ingenieurgemeinschaft organisiert. Die Federführung liegt bei der IUB Engineering AG, welche die Gesamtkoordination des Bauleitungsteams wahrnimmt. Weitere Mitglieder der Ingenieurgemeinschaft sind:

- Basler & Hofmann AG
- Gähler & Partner AG
- IM Maggia Engineering SA
- Studio Ingegneria Sciarini SA

Zur Sicherstellung der fachlichen Qualität und zur Abdeckung spezialisierter Aufgabenbereiche wird die IG 2G-BN durch Subunternehmer unterstützt, insbesondere im Bereich der geologisch-geotechnischen Beratung sowie der Logistik der Materialbewirtschaftung. Diese Organisationsform ermöglicht es, den hohen technischen, terminlichen und qualitativen Anforderungen eines Grossprojekts wie des zweiten Gotthardtunnels gerecht zu werden. (R.Baumann, 2024) (IG Nuovo Gottardo, 2025)

Organisationsstruktur und Organigramm der örtlichen Bauleitung

Die Organisation der örtlichen Bauleitung der IG-2G-BN ist hierarchisch und funktional gegliedert. Sie verfolgt das Ziel, klare Verantwortlichkeiten, effiziente Entscheidungswege sowie eine strukturierte Koordination zwischen Bauherrschaft, Oberbauleitung, Unternehmern und weiteren Projektbeteiligten sicherzustellen.

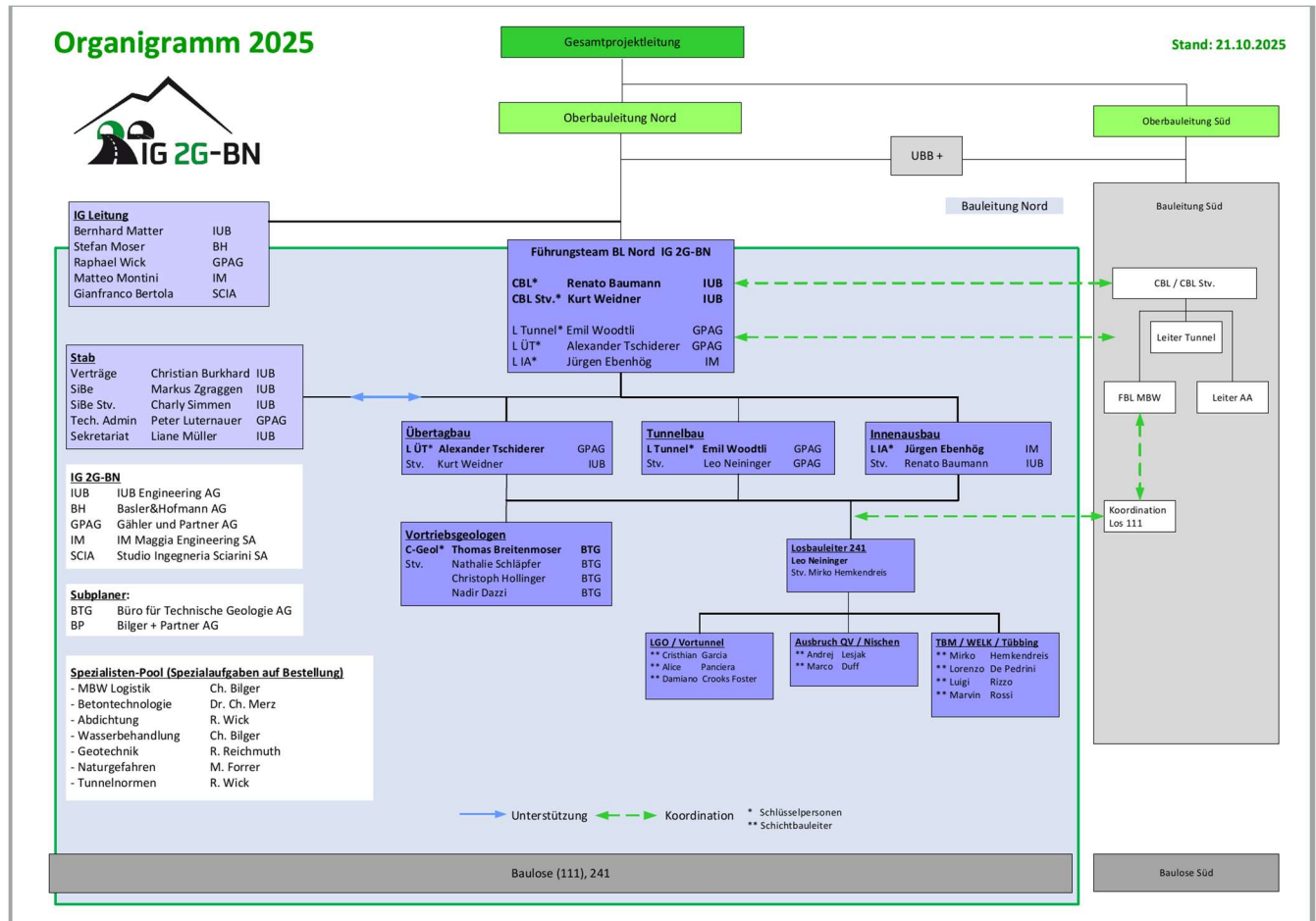


Abbildung 11, Organigramm 2025 des öBL (IG-2G-BN, 2025)

Leitung der Bauleitung

Die Gesamtführung der örtlichen Bauleitung obliegt dem Chefbauleiter (CBL). Dieser trägt die technische und administrative Gesamtverantwortung für die Bauleitung Nord und fungiert als zentrale Ansprechperson gegenüber der Oberbauleitung Nord. Zu seinen Aufgaben zählen insbesondere die Führung des Bauleitungsteams, die Vertragsüberwachung, die Termin- und Kostenkontrolle sowie die Koordination mit der Umweltbaubegleitung (UBB) und weiteren Spezialisten.

Der Chefbauleiter Stellvertreter (CBL Stv.) unterstützt den CBL in sämtlichen Führungsaufgaben und übernimmt dessen Funktion bei Abwesenheit. Darüber hinaus ist der CBL Stv. insbesondere für die Schnittstellenkoordination zur Materialbewirtschaftung sowie zur örtlichen Bauleitung Süd verantwortlich. (R.Baumann, 2024)

Fachbereiche der Bauleitung

Die Bauleitung ist in drei zentrale Fachbereiche gegliedert, welche jeweils durch einen Bereichsleiter geführt werden:

- Bereich Tunnel, zuständig für den Vortrieb, die untertägigen Bauwerke sowie die bauphysikalischen Einrichtungen im Tunnel;
- Bereich Übertage, verantwortlich für die Aussenanlagen, Installationen Übertage, Voreinschnitte, Lüftungsbauwerke und weitere oberirdische Bauwerke;
- Bereich Innenausbau, zuständig für den Ausbau der Tunnelröhren, Abdichtungen, Innenverkleidungen, Installationen sowie produktionsbezogene Anlagen (z.B. WELK- und Tübbingproduktion).

Die Bereichsleiter tragen die technische, qualitative, terminliche und administrative Verantwortung für ihre jeweiligen Baubereiche und verfügen über Weisungsrecht gegenüber dem zugeteilten Bauleitungspersonal sowie den Unternehmern. (IG-2G-BN, 2025; R.Baumann, 2024)

Stabsstellen und Querschnittsfunktionen

Zur Unterstützung der operativen Bauleitung sind mehrere Stabsstellen eingerichtet, die beratende und kontrollierende Funktionen wahrnehmen und direkt der Bauleitungsführung unterstellt sind. Dazu gehören insbesondere: (IG-2G-BN, 2025; R.Baumann, 2024)

- die Stabsstelle Verträge, welche den CBL in werkvertraglichen Fragen sowie bei Nachträgen und Abrechnungen unterstützt;
- der Sicherheitsbeauftragte (SiBe), verantwortlich für die Überwachung der Arbeitssicherheit, das Notfallmanagement und die Koordination sicherheitsrelevanter Aspekte zwischen den Unternehmern;
- die Technische Administration (TA), zuständig für Baubuchhaltung, Abschlagszahlungen, Dokumentenmanagement und organisatorische Belange;
- das Sekretariat sowie die Zentralen Dienste, welche administrative und logistische Unterstützungsaufgaben übernehmen.

Operative Ebene

Auf der operativen Ebene sind die Bauleiter, die Schichtbauleiter sowie die Fachstelle Geologie / Naturgefahren (GEO) tätig. Diese Funktionen gewährleisten die kontinuierliche Präsenz der Bauleitung auf der Baustelle und stellen die unmittelbare Umsetzung der vertraglichen, technischen und qualitativen Anforderungen sicher. (R.Baumann, 2024)

Die Bauleiter und Schichtbauleiter übernehmen insbesondere die tägliche Überwachung der Bauausführung, die Kontrolle der Unternehmerleistungen, die Dokumentation der Bauprozesse sowie die Erstellung der Grundlagen für Ausmass, Abrechnung und Qualitätskontrolle. Die Schichtbauleiter sind im Schichtbetrieb eingesetzt und stellen insbesondere im Tunnelvortrieb eine lückenlose Bauüberwachung sicher. (R.Baumann, 2024)

Die Geologen (GEO) sind integraler Bestandteil der operativen Bauorganisation. Sie sind während des Vortriebs präsent (inkl. Pikett- und Schichtbetrieb) und verantwortlich für die geologische Dokumentation, die laufende Beurteilung der geologisch-geotechnischen Verhältnisse, die Prognose-Befund-Vergleiche sowie die fachliche Unterstützung bei der Festlegung der Ausbruchssicherung. In dringenden Fällen verfügen sie über eine direkte Weisungsbefugnis gegenüber dem Unternehmer in geologischen Belangen und leisten damit einen wesentlichen Beitrag zur Sicherheit, Qualität und Wirtschaftlichkeit des Tunnelbaus. (R.Baumann, 2024)

2.1.5 QM-Kompetenzen und Verantwortlichkeiten

Das Qualitätsmanagement (QM) der Bauausführung im Los 241 stützt sich auf den Kontrollplan (KP) als zentrales Instrument der Qualitätssicherung. Der Kontrollplan legt Art, Umfang, Zeitpunkt und Zuständigkeiten der systematischen Ausführungskontrollen fest und ergänzt die qualitativen Anforderungen aus Leistungsverzeichnis, Ausführungs- und Qualitätsvorschriften (AQV) sowie den Besonderen Bestimmungen Bau. Ziel ist die Sicherstellung, dass sämtliche qualitäts- und sicherheitsrelevanten Leistungen den vertraglich vereinbarten Anforderungen entsprechen.(T. Fries & S. Böheim, 2024)

Grundsätzlich liegt die Verantwortung für die Steuerung und Überwachung der Bauprozesse beim Unternehmer (UN). Dieser ist verpflichtet, sämtliche erforderlichen Eigen- und Konformitätsprüfungen durchzuführen und die Ergebnisse vollständig zu dokumentieren. Der Kontrollplan entbindet den Unternehmer ausdrücklich nicht von seiner Pflicht zur umfassenden Eigenüberwachung gemäss den Regeln der Baukunst, den einschlägigen Normen (u.a. SIA, SN EN) sowie dem unternehmensinternen QM-System.(T. Fries & S. Böheim, 2024)

Die Bauleitung (öBL) übernimmt im Auftrag des Bauherrn eine überwachende, prüfende und koordinierende Rolle. Sie kontrolliert die Zweckmässigkeit und Einhaltung des Prüfplans des Unternehmers, ordnet bei Bedarf zusätzliche Kontrollen an und veranlasst Kontrollprüfungen (Identitätsprüfungen), welche in der Regel durch unabhängige akkreditierte Prüflabors oder Spezialisten durchgeführt werden. Die Interpretation der Prüfergebnisse erfolgt gemäss Kontrollplan je nach Prüfarm durch Unternehmer, Bauleitung oder Bauherr.(T. Fries & S. Böheim, 2024; R.Baumann, 2024)

Der Bauherr (BH) bleibt oberste Instanz im Qualitätsmanagement. Er behält sich vor, jederzeit eigenständige Prüfungen durchführen zu lassen und entscheidet im Fall von Nichtkonformitäten über weitergehende Massnahmen, wie Nachbesserungen, Wertminderungen oder Rückbau. Alle Massnahmen infolge ungenügender Qualität gehen grundsätzlich zu Lasten des Unternehmers.(T. Fries & S. Böheim, 2024)

Qualität im Sinne des Projekts (Kontrollplan)

Qualität wird im vorliegenden Projekt nicht abstrakt definiert, sondern operativ über messbare, prüfbare und dokumentierte Kriterien konkretisiert. Der Kontrollplan bildet dabei den verbindlichen Referenzrahmen für die Definition von Qualität. Qualität bedeutet, dass Baustoffe, Bauprozesse und Bauwerke nachweislich den festgelegten Qualitätsanforderungen (Soll-Werte) entsprechen und innerhalb der zulässigen Toleranzen liegen.

Der Kontrollplan (T. Fries & S. Böheim, 2024) unterscheidet systematisch zwischen:

- Eignungsprüfungen (Erstprüfungen) zum Nachweis der grundsätzlichen Eignung von Baustoffen und Herstellungsverfahren;
- Vorversuchen, insbesondere bei Beton- und Spritzbetonrezepturen, zur Absicherung der Produktionsreife unter Baustellenbedingungen;
- Konformitätsprüfungen als laufende Produktionskontrolle durch den Unternehmer;
- Kontrollprüfungen auf Veranlassung des Bauherrn zur Verifikation der Unternehmerangaben.

Qualität ist somit dann gegeben, wenn die Konformität mit den projekt- und normenspezifischen Anforderungen durch ein lückenloses, nachvollziehbares und transparentes Prüfsystem belegt ist. Die konsequente Dokumentation aller Prüfungen in einer web-basierten Datenbank sowie die periodische Berichterstattung sind integrale Bestandteile dieses Qualitätsverständnisses.

Zusammenhang zwischen Kontrollplan und EIR / BAP

Der Kontrollplan und der BIM-Abwicklungsplan sind als komplementäre Instrumente zu verstehen, welche unterschiedliche, sich jedoch gegenseitig ergänzende Ebenen der Qualitätssicherung abdecken.

Während der Kontrollplan primär die physische Qualität der Bauausführung adressiert (Material, Ausführung, Bauzustand), definieren EIR und BAP die Anforderungen an die digitale Informationsqualität. Der BAP legt fest, welche Informationen in den Modellen enthalten sein müssen (LOI), in welchem Detaillierungsgrad (LOG), zu welchem Zeitpunkt und über welche Prüf- und Freigabeprozesse diese Informationen verifiziert werden. (IG Nuovo Gottardo, 2025)

Die im Kontrollplan vorgesehenen Prüfungen stellen sicher, dass die im BIM-Modell hinterlegten Attribute (beispielsweise zu Betonsorten, Festigkeitsklassen, Ausbruchssicherung, Bauetappen oder Prüfergebnissen) auf geprüften und verlässlichen Grundlagen beruhen. Umgekehrt ermöglicht der BAP durch modellbasierte Prüfungen, Issue-Management und strukturierte Freigabeworkflows eine frühzeitige Erkennung von Abweichungen, Inkonsistenzen oder Planungsfehlern, noch bevor diese in der Bauausführung wirksam werden.

Insbesondere bei der modellbasierten Ausführung (BIM2Field) fungiert der Kontrollplan als qualitative Rückversicherung der digitalen Informationen, während der BAP die Nachvollziehbarkeit, Strukturierung und Weiterverwendung dieser Informationen sicherstellt. Damit entsteht eine durchgängige Qualitätskette von der digitalen Planung über die Ausführung bis hin zur Dokumentation für Betrieb und Unterhalt. Die Abschlussarbeit soll diesen Absatz wahr machen, wobei zu berücksichtigen ist, dass kein digitales As-built-Modell vorgesehen ist.

Arbeitsdefinition von Qualität für diese Masterarbeit

Für die vorliegende Arbeit wird Qualität wie folgt definiert:

Qualität ist der nachweisliche Grad der Übereinstimmung zwischen ausgeführter Bauleistung, digitalen Projektinformationen und den vertraglich, normativ sowie projektspezifisch festgelegten Anforderungen, sichergestellt durch das Zusammenwirken von Kontrollplan und BIM-Abwicklungsplan.

Diese Definition verbindet das klassische bautechnische Qualitätsverständnis des Kontrollplans mit dem daten- und prozessorientierten Qualitätsansatz des BAP und bildet die Grundlage für die weitere Analyse der QM-Prozesse, der Rollenverteilung sowie der Schnittstellen zwischen Bauausführung, Bauleitung und modellbasierter Projektabwicklung im Rahmen dieser Masterarbeit.

2.2 Stand der Forschung

Der folgende Abschnitt dokumentiert die systematische Aufarbeitung des wissenschaftlichen Forschungsstands zu den für diese Arbeit relevanten Themenfeldern. In zwei aufeinanderfolgenden Datenerhebungen werden Erkenntnisse zur digitalen Qualitätskontrolle im Bauwesen sowie zu modellbasierten Informationsstrukturen im Tunnelbau zusammengefasst und auf ihre Übertragbarkeit hin bewertet.

2.2.1 Vorgehen der Literaturrecherche

Die Erarbeitung des Forschungsstandes erfolgte in Anlehnung an die systematische Vorgehensweise nach Heil (2021) und orientierte sich an den PRISMA-Richtlinien (2020).

Ziel war es, wissenschaftliche Arbeiten zu identifizieren, die sich mit der digitalen Umsetzung von Qualitätskontrollen auf der Baustelle, insbesondere mit der Integration von Kontrollplänen in Common Data Environments (CDE) und deren Einbindung in BIM2FIELD-Workflows, befassen.

Der Suchprozess wurde iterativ durchgeführt: Zunächst erfolgte eine breit angelegte Erhebung zur Identifikation allgemeiner BIM-basierter Qualitätskontrollprozesse (Kapitel 2.2.2). In einem zweiten Schritt wurde der Fokus auf digitale Kontrollpläne und CDE-Workflows verengt (Kapitel 2.2.3).

In einem dritten Schritt wurde nach Abschluss des ersten Forschungszyklus aufgrund der Ergebnisse beschlossen, einen zweiten Forschungszyklus zu entwickeln (Kapitel 2.2.4), dessen Schwerpunkt auf den im Tunnelbau angewandten Techniken lag. Dazu wurden die Schlüsselwörter für die Recherche aus dem vom Professor bereitgestellten Artikel extrahiert: *Digitalisation in Norwegian Tunnelling* (NFF, 2019).

Die Recherche diente gleichzeitig dazu, methodische Lücken und technologische Trends zu erkennen, die für die eigene Untersuchung von Bedeutung sind.

2.2.2 Datenerhebung 1

Die Literaturrecherche wurde ausschliesslich auf der Plattform ScienceDirect (Elsevier) durchgeführt, da diese eine grosse Anzahl hochwertiger Publikationen im Bereich Bauwesen, Digitalisierung und Qualitätsmanagement abbildet.

Suchkomponenten

Die Recherche wurde in thematische Suchkomponenten unterteilt (Tabelle 1).

Tabelle 1, Suchkomponenten der Datenerhebung 1

Komponente	Beschreibung	Beispielhafte Suchbegriffe
A – Qualitätskontrolle / Inspektion	Fachlicher Kern der Untersuchung	“quality control”, “inspection test plan”, “control plan”, checklist
B – Bauausführung	Eingrenzung auf die Bauphase	construction, “construction site”, field
C – Digitale Umgebung / Workflow	CDE, Prozessintegration, Datenfluss	“common data environment”, CDE, workflow
D – BIM / Digitalisierung	Übergeordnete Methodik	BIM, “building information modelling”, “BIM2FIELD”, “BIM-to-field”
E – Bewertungsdimensionen	Erwartete Mehrwerte digitaler Prozesse	efficiency, transparency, traceability

Suchkombinationen und Ergebnisse

Die Kombination der Suchkomponenten führte zu vier Suchstrings (Tabelle 2).

Jede Kombination wurde unter den Filtern *Engineering, Research / Review / Book chapters, 2014–2025, English, Full text only* ausgeführt.

Tabelle 2, Kombination der Suchkomponenten der Datenerhebung 1

Nr.	Fokus	Suchstring (ScienceDirect-kompatibel)	Treffer	Bewertung
S1 – Basis	Allgemeine BIM-basierte QC	("quality control" OR inspection OR "inspection test plan") AND (construction OR "construction site" OR field) AND ("building information modeling" OR BIM OR "BIM-to-field")	2 816	Sehr breit; bildet Gesamtübersicht der QC-Forschung im BIM-Kontext.
S2 – CDE / Workflow	Digitale Kontrollpläne im CDE	("quality control" OR "control plan") AND construction AND ("common data environment" OR CDE) AND BIM	96	Kernbereich der Forschung; thematisch hochrelevant.
S3 – Prozess / Workflow	Workflow-Modelle und Validierung	("quality control" OR inspection) AND construction AND workflow AND BIM	1 772	Breiter Prozessbezug; viele Arbeiten ohne expliziten QC-Fokus.
S4 – BIM2FIELD / Effizienz	Feldanwendungen & mobile Workflows	("quality control" OR inspection) AND construction AND BIM2FIELD	0	Keine Treffer; deutliche Forschungslücke.

Filtereinstellungen

Tabelle 3, Filtereinstellungen der Datenerhebung 1

Filtertyp	Einstellung
Subject area	Engineering
Years	2014–2025
Language	English
Article type	Research articles, Review articles, Book chapters
Access	Full text only

Interpretation der Ergebnismengen

- Die Basissuche (S1) bestätigt das hohe Forschungsinteresse an der Integration von Qualitätskontrolle und BIM im Bauwesen (über 2 800 Treffer).
- Die Suche S2 (96 Treffer) markiert den relevanten Kernbereich der Forschung, der sich konkret mit digitalisierten Kontrollplänen und CDE-basierten Qualitätsprozessen beschäftigt.
- S3 zeigt, dass der Themenbereich Workflow-Digitalisierung weit erforscht ist, jedoch oft ohne spezifischen Bezug zu Qualitätsprüfungen.
- Für S4 ergaben sich keine Treffer – dies verdeutlicht eine Forschungslücke bei der Verknüpfung von BIM2FIELD und Qualitätskontrolle, die im weiteren Verlauf dieser Arbeit adressiert wird.

2.2.3 Auswertungsmethodik

Die 96 identifizierten Publikationen aus S2 (CDE / Workflow) wurden in einem zweistufigen Screening-Prozess ausgewertet:

1. Titel- und Abstract-Screening
Ausschluss irrelevanter Arbeiten (z. B. rein planerische oder FM-bezogene Ansätze).
Ergebnis: 26 Publikationen mit direktem Bezug zu Baustellenprozessen, Inspektionen oder Prüfplänen.
2. Volltextanalyse
Detaillierte Durchsicht hinsichtlich Datenstrukturen, Prozess-/Statusmodellen und Workflow-Aspekten.
Ergebnis: 8 relevante Publikationen, die in die inhaltliche Synthese eingingen.

Kategorisierung und thematische Cluster

Die 22 Volltexte wurden vier thematischen Clustern zugeordnet (Tabelle 4).

Tabelle 4, thematischen Clustern der Datenerhebung 1

Cluster	Themenfokus	Typische Quellen / Beispiele	Beitrag zur Arbeit
C1 – Digitale Kontrollpläne & Datenstrukturen	Aufbau, Attribute und Strukturierung qualitätsrelevanter Informationen in digitalen Modellen und Checklisten	Leygonie et al. (2022), Sudakova et al. (2024)	Liefert Grundlagen für die Definition strukturierter Prüfmerkmale und Informationsanforderungen.
C2 – Workflow- & Verifikationsmodelle	Prozessdefinitionen für Planung, Prüfung, Freigabe, Validierung und Rückmeldung	Benghi (2019), Sudakova et al. (2024)	Beschreibt digitale Prüf- und Freigabeworkflows inkl. Rollen und Verifikationslogik
C3 – Integration & Interoperabilität	Schnittstellen zwischen Modell, CDE und nachgelagerten Informationssystemen	Matarneh et al. (2022), Benghi (2019), Leygonie et al. (2022)	Zeigt Anforderungen an Datenfluss, Austauschformate und Rückverfolgbarkeit
C4 – Organisation & Nutzen digitaler Prozesse	Reifegrad, Implementierung, Akzeptanz, Effizienz und Nachvollziehbarkeit	Yoon et al. (2025), Giménez et al. (2025), Pérez-García et al. (2024)	Begründet organisatorische Voraussetzungen und den erwarteten Mehrwert digitaler Qualitätsprozesse

Erkenntnisse aus der Literaturanalyse

A) Daten- und Strukturmodelle

- Weit verbreitet sind strukturierte Prüfdatensätze mit wiederkehrenden Pflichtfeldern (ID, Prüfkriterium, Toleranz, Nachweis, Verantwortliche).
- Einheitliche Standards fehlen weitgehend; proprietäre Formate (Excel/CSV/interne CDE-Tabellen) dominieren.

B) Workflowlogik und Automatisierung

- QC-Workflows folgen typischen Statusübergängen (planned → in progress → submitted → validated → closed).
- Trigger, Benachrichtigungen und Pflichtfelder werden teils automatisiert umgesetzt; das erhöht Konsistenz und Vollständigkeit.

C) Schnittstellen und Interoperabilität

- Die Kopplung von BIM-Modellen (z. B. IFC/BCF) mit CDE-basierten QC-Prozessen ist zentraler Forschungsgegenstand.
- Bidirektionale Verknüpfungen (z. B. QC-Objekt ↔ Modell-Element) steigern die Transparenz, erfordern aber hohe Datenqualität und sauber strukturierte IDs.

D) Quantifizierte Effizienzgewinne

Mehrere Studien berichten messbare Vorteile digitaler QC-Systeme. analogen Verfahren:

- Zeitreduktion bei Prüfzyklen um ca. 10–30 %,
- Rücklaufreduktion durch Pflichtfelder/Statuslogik,
- Nachvollziehbarkeit↑ durch Audit-Trails und automatisierte Versionierung.

E) Organisatorische und menschliche Faktoren

- Erfolg hängt stark von Schulung, klaren Rollen und der Integration in bestehende Prozesse ab.
- Akzeptanzdefizite werden häufig als Haupthindernis genannt.

Synthese und Forschungslücken

Die Analyse der 96 Publikationen zeigt eine technologische Reife digitaler QC-Workflows im CDE. Gleichzeitig bestehen Lücken bei der robusten Integration auf der Baustelle (BIM2FIELD). Insbesondere fehlt:

- eine standardisierte Definition für die Abbildung von Kontrollplänen als strukturierte Datensätze im CDE sowie
- klare Rückführungsmechanismen der QC-Daten zurück ins Modell (Traceability auf Elementebene).

Basierend der identifizierten Herausforderungen wurden die Fragenstellungen geschärft:

- welche Informationen eines Kontrollplans digital erfasst werden müssen,
- wie der Datenfluss zwischen Unternehmer, Bauleitung und CDE zu gestalten ist, um Unterbrüche zu vermeiden und Validierungen zu beschleunigen,
- welchen Mehrwert (Transparenz, Nachvollziehbarkeit, Effizienz) eine vollständig digitale Umsetzung gegenüber analogen/hybriden Vorgehen liefert.

2.2.4 Datenerhebung 2

Die wissenschaftliche Literaturrecherche wurde primär auf der Plattform ScienceDirect (Elsevier) durchgeführt, da diese eine grosse Anzahl hochwertiger Publikationen im Bereich Bauwesen, Digitalisierung und Qualitätsmanagement abbildet. Ergänzend wurden für den tunnelbauspezifischen Kontext in begründeten Einzelfällen aktuelle fachliche Praxisquellen berücksichtigt.

Suchkombinationen und Ergebnisse

Nach Abschluss des ersten Recherchezyklus wurde ein ergänzender zweiter Recherchezyklus durchgeführt, um die Erkenntnisse aus der allgemeinen Literatur zu digitalen Qualitätskontrollprozessen um den tunnelbauspezifischen Anwendungskontext zu erweitern. Dieser zweite Zyklus hatte explorativen Charakter und diente insbesondere dazu, im Tunnelbau eingesetzte digitale Verfahren, Datenquellen und modellbezogene Anwendungen als mögliche Anknüpfungspunkte für qualitätsbezogene Kontrollprozesse zu identifizieren.

Hintergrund dafür war, dass sich aus der ersten Datenerhebung zwar relevante Erkenntnisse zu digitalen Prüf- und Kontrollprozessen, CDE-basierten Workflows und BIM-gestützten Verifikationsansätzen ergaben, jedoch nur wenige Publikationen einen direkten Bezug zu den im Tunnelbau eingesetzten digitalen Verfahren und baustellennahen Abläufen aufwiesen.

Der zweite Recherchezyklus zielte deshalb darauf ab, Technologien, Datenflüsse und bestehende BIM-Anwendungen im Tunnelbau zu identifizieren, die als Grundlage oder Anknüpfungspunkt für eine spätere Übertragung auf digitale qualitätsbezogene Kontroll- und Freigabeprozesse relevant sein könnten. Die verwendeten Suchbegriffe wurden aus dem vom Professor bereitgestellten Beitrag *Digitalisation in Norwegian Tunnelling* (NFF, 2019) sowie aus den Ergebnissen der ersten Datenerhebung abgeleitet. Im Vordergrund standen dabei insbesondere Begriffe zu Measurement While Drilling (MWD), Logging While Drilling, Laserscanning, Tunnelbau, BIM, CDE sowie anwendungsbezogene Systembezüge.

Die Kombination der Suchkomponenten führte zu acht Suchstrings (Tabelle 5).

Tabelle 5, Suchkomponenten der Datenerhebung 2 und entsprechende Ergebnisse basierend auf den Filtern

Nr.	Suchstring	No filter	2014-2026	Engineering	Pdf available
1	bim AND mwd	32	17	6	4
2	cde AND mwd	97	63	15	15
3	bim AND "logging while drilling"	8	5	1	1
4	bim AND "laser scan" AND tunneling	447	429	329	313
5	bim AND "laser scan" AND tunneling AND cde	21	21	18	17
6	bim AND "laser scan" AND tunneling AND trimble	41	40	37	32

Auswertung der Suchergebnisse

Die Suchergebnisse zeigen, dass sich der tunnelbauspezifische Forschungsstand nur begrenzt über klassische Begriffe der digitalen Qualitätskontrolle erschliessen lässt. Stattdessen dominieren in der Literatur vor allem Beiträge zu digitalen Erfassungs-, Vermessungs- und Monitoringverfahren.

Die Suchabfragen zu MWD und Logging While Drilling (Nr. 1–3) lieferten nur wenige Treffer mit engem Bezug zur vorliegenden Fragestellung. Relevanz zeigten diese Beiträge vor allem dort, wo sie digitale Datengewinnung im Vortrieb, modellgestützte Auswertung oder systematische Datenerfassung im Baustellenkontext behandelten. Ein erheblicher Teil der Treffer bezog sich jedoch stärker auf geologische, geotechnische oder maschinentechnische Fragestellungen als auf qualitätsbezogene Kontroll- und Freigabeprozesse.

Deutlich grössere Treffermengen ergaben sich für die Suchabfragen zu Laserscanning im Tunnelbau (Nr. 4–6). Dies deutet darauf hin, dass digitale Verfahren zur Erfassung des Ist-Zustands, geometrische Analysen und modellgestützte Auswertungen im tunnelbauspezifischen Diskurs deutlich präsenter sind als explizit qualitätsbezogene Kontrollprozesse. Gleichzeitig zeigte die Verengung der Suche mit den Begriffen CDE und Trimble, dass sich das Themenfeld auf praxisnähere, systembezogene und anwendungsorientierte Publikationen eingrenzen lässt. Aus den Treffern der Suchabfragen Nr. 5 und Nr. 6 wurden die thematisch passendsten Publikationen in einem ersten Titel- und Abstract-Screening identifiziert und für die weitere Auswertung ausgewählt.

Erweiterung der Recherche um aktuelle Praxisquellen

Im Verlauf dieses zweiten Recherchezyklus zeigte sich, dass fachlich hochrelevante Entwicklungen im Bereich BIM im Tunnelbau zum Zeitpunkt der Recherche noch nicht vollständig über die gängigen wissenschaftlichen Datenbanken zugänglich waren. Aus diesem Grund wurde die Recherche in begründeten Einzelfällen um aktuelle fachliche Praxis- und Verbandsquellen ergänzt.

Von besonderer Bedeutung war dabei ein im Jahr 2025 veröffentlichter Report der International Tunneling Association (ITA), Working Group 22, der zum Recherchezeitpunkt aufgrund seiner Aktualität noch nicht in den verwendeten wissenschaftlichen Datenbanken abgebildet war. Der Report trägt den Titel BIM in Tunnelling – Guideline for Mechanised and Conventional Tunnels. Er wurde von der ITA Working Group 22 publiziert und von mehreren Fachpersonen aus dem internationalen Tunnelbau erarbeitet. Ergänzend wurde der Report im Hinblick auf seinen Entstehungskontext, seine Zielsetzung und seinen Anwendungsrahmen eingeordnet.

Einordnung des ITA-Reports für die vorliegende Arbeit

Der ITA-Report erwies sich für die vorliegende Arbeit als besonders relevant, da er einen aktuellen Referenzrahmen für die BIM-Implementierung im Tunnelbau bereitstellt. Inhaltlich fokussiert der Report auf segmentausgebaute maschinell vorgetriebene Tunnel sowie auf konventionell erstellte Tunnel und behandelt vor allem die BIM-Anwendung im Bereich der Heavy-Civil-Elemente. Er versteht sich ausdrücklich als Leitlinie zur Unterstützung der Praxis und nicht als Ersatz projektspezifischer Anforderungen oder lokaler Best Practices.

Für die vorliegende Arbeit war diese Quelle in zweifacher Hinsicht bedeutsam. Einerseits bestätigte sie die hohe Aktualität und Relevanz des Themas. Andererseits zeigte die Auswertung, dass der Report bereits viele Grundlagen, Begriffe und Strukturierungsansätze definiert, die dem ursprünglichen Fokus der Arbeit sehr nahekommen. Dazu gehören insbesondere grundlegende BIM-Anwendungsfelder, Rollenverständnisse und Implementierungsfragen im Tunnelbau.

Gerade deshalb führte die Analyse dieses Reports zu einer inhaltlichen Fokussierung der Arbeit: Der Schwerpunkt wurde stärker auf jene Aspekte verlagert, die im Report noch nicht abschliessend definiert sind. Dazu zählen insbesondere:

- die digitale Abbildung von Kontrollplänen als strukturierte Datensätze,
- deren prozessuale Einbindung in baustellennahe Kontroll- und Freigabeabläufe,
- sowie weiterführende Nutzungsmöglichkeiten im Sinne von BIM2FIELD und FIELD2BIM.

Erkenntnisse aus Datenerhebung 2

Die zweite Datenerhebung deutet darauf hin, dass im Tunnelbau digitale Erfassungs- und Auswertungsmethoden bereits in zahlreichen Anwendungsfeldern untersucht und teilweise praxisnah beschrieben werden. Insbesondere Laserscanning, MWD und weitere datengetriebene Verfahren werden in der Literatur als relevante Ansätze beschrieben, um Zustände zu erfassen, Bauprozesse zu begleiten und geometrische oder technische Informationen digital verfügbar zu machen.

Gleichzeitig wird deutlich, dass die Verknüpfung dieser Felddaten mit formalisierten qualitätsbezogenen Kontroll- und Freigabeprozessen in der gesichteten Literatur nur begrenzt beschrieben ist. Der Schwerpunkt der identifizierten Quellen liegt vorwiegend auf Datenerfassung, Visualisierung und Monitoring, während strukturierte Ansätze zur Abbildung von Prüfmerkmalen, Statusübergängen, Verantwortlichkeiten und Rückführungsmechanismen in modell- und CDE-basierten Systemen deutlich seltener thematisiert werden.

3 Methode

Das Ziel dieses Kapitels ist die Darstellung der wissenschaftlichen Vorgehensweise, mit der die Digitalisierungspotenziale bei den Querverbindungen des zweiten Gotthard-Strassentunnels untersucht wurden. Die Arbeit basiert auf einem prozessorientierten und qualitativen Forschungsansatz. Die Querverbindungen wurden als Untersuchungsgegenstand gewählt, weil sie für die Entwicklung eines Pilotprojekts zur Verfügung standen und sich aufgrund ihrer klar abgrenzbaren Abläufe besonders gut eignen, um Digitalisierungspotenziale exemplarisch aufzuzeigen. Gleichzeitig soll die Untersuchung Erkenntnisse liefern, die auch auf grössere und komplexere Tunnelbauprojekte übertragbar sind.

Im Zentrum der Arbeit steht die Frage, wie bestehende analoge Abläufe in der Qualitätskontrolle, in der Ausführung und im Ausmass systematisch analysiert und in ein digitales Soll-Konzept überführt werden können. Die Methodik verfolgt dabei das Ziel, sowohl den aktuellen Prozess transparent zu machen als auch praxisnahe Grundlagen für die Entwicklung, Bewertung und Erprobung möglicher Digitalisierungslösungen zu schaffen.

3.1 Forschungsdesign und prozessorientierter Ansatz

Das Forschungsdesign (Abbildung 12) ist darauf ausgerichtet, theoretische Anforderungen der Digitalisierung mit den konkreten Rahmenbedingungen der baubetrieblichen Praxis abzugleichen. Der Fokus liegt auf dem Prozess der Qualitätskontrolle, beginnend bei der Ausführungsplanung über die Bauausführung bis hin zum finalen Ausmass. Um die Chancen und Mehrwerte der Digitalisierung nachvollziehbar aufzuzeigen, wurde ein Ist-Soll-Vergleich gewählt. Dieser Ansatz ermöglicht es, bestehende analoge Abläufe zunächst systematisch zu erfassen, deren Schwachstellen zu identifizieren und darauf aufbauend ein digitales Zielbild zu entwickeln.

Die methodische Vorgehensweise erfolgte in mehreren aufeinander abgestimmten Schritten. Zunächst wurden zwei Aktivitäten parallel durchgeführt: Einerseits wurde eine wissenschaftliche Recherche vorgenommen, um den Stand der Forschung, bestehende Lösungsansätze und mögliche Lücken in der Literatur zu identifizieren. Andererseits wurde der bestehende analoge Prozess der Querverbindungen in Form eines Ablaufdiagramms aufgenommen und strukturiert dargestellt. Dies diente dazu, Medienbrüche, Zeitverluste und weitere Ineffizienzen im aktuellen Vorgehen sichtbar zu machen.

Auf dieser Grundlage wurden anschliessend Fachgespräche mit relevanten Projektbeteiligten durchgeführt. Ziel war es, die kritischen Punkte des Prozesses aus unterschiedlichen Perspektiven zu erfassen und die Analyse gezielt auf den konkreten Anwendungsfall auszurichten. Gleichzeitig sollte durch die Einbindung mehrerer Akteure eine möglichst nachvollziehbare und belastbare Grundlage für die spätere Ableitung der Anforderungen geschaffen werden. Die Durchführung dieser Gespräche wird in Kapitel 5 vertieft beschrieben.

Basierend auf den Ergebnissen aus Literaturrecherche, Ist-Zustandsanalyse und Fachgesprächen wurden anschliessend drei Digitalisierungsvarianten entwickelt. Deren Bewertung erfolgte anhand eines Kriterienkatalogs, der aus der Datenerhebung abgeleitet wurde. Die Auswahl der weiterverfolgten Variante bildete die Grundlage für die prototypische Erprobung im Rahmen der Fallstudie. Die nachfolgende Abbildung veranschaulicht den Ablauf der Arbeit und die Reihenfolge der einzelnen methodischen Schritte.

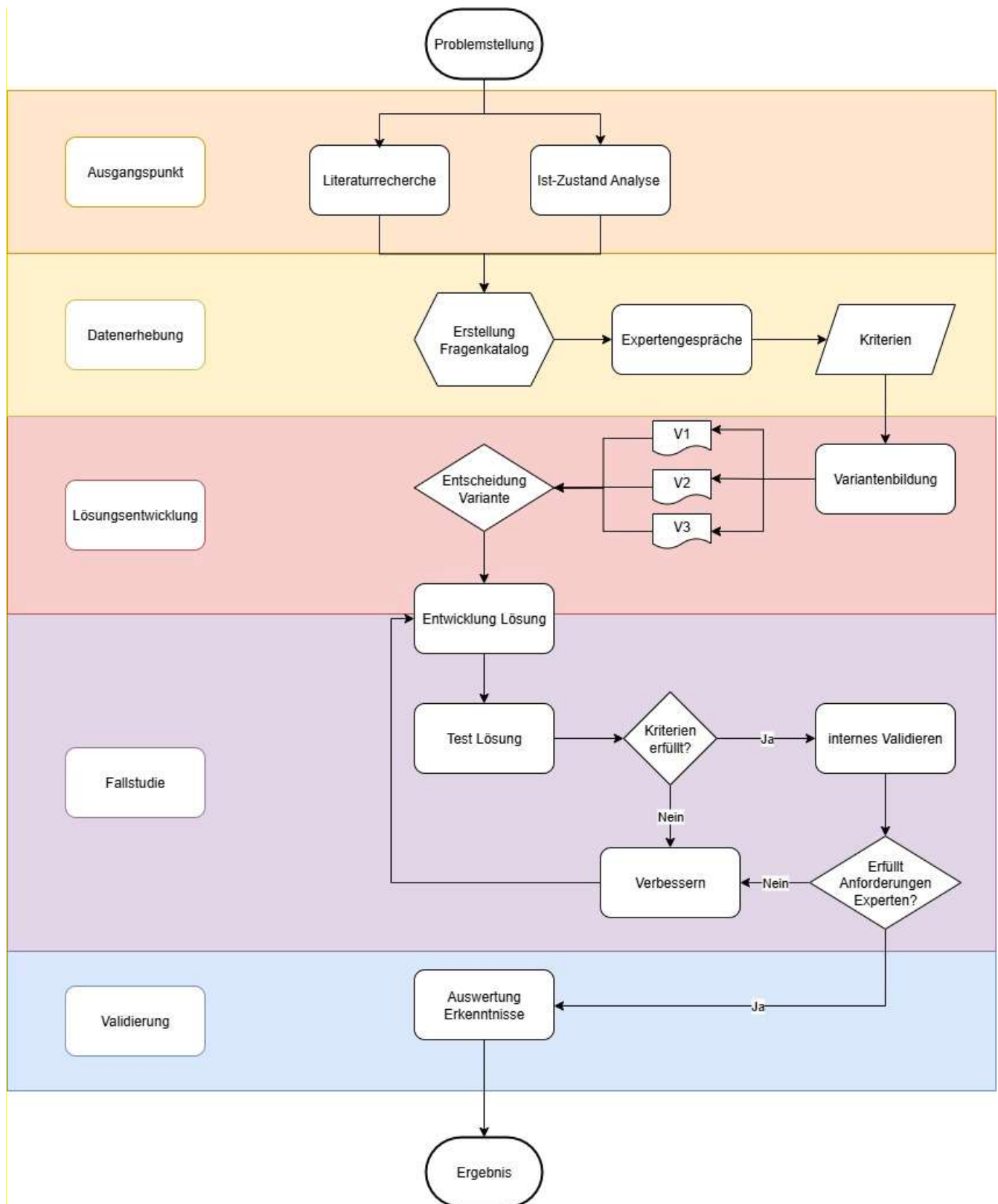


Abbildung 12, Forschungsdesign

3.1.1 Recherche in der wissenschaftlichen Literatur

Die theoretische Basis der Arbeit bildet eine systematische Literaturrecherche. Analysiert wurden aktuelle Publikationen zu den Themen BIM im Infrastrukturbau, digitale Datenerfassung auf Baustellen, Prozessoptimierung im Tunnelbau sowie digitale Qualitätskontrolle. Ein besonderer Fokus lag auf bestehenden Ansätzen zum digitalen Datenaustausch, auf modellbasierten Arbeitsweisen und auf Best Practices, die für eine Anwendung im Tunnelbau relevant sein können.

Die Literaturrecherche erfüllt innerhalb der Methodik mehrere Funktionen. Einerseits dient sie dazu, den aktuellen Stand der Technik und Forschung zu erfassen. Andererseits ermöglicht sie es, bestehende Ansätze als Referenzrahmen für die eigene Untersuchung zu nutzen, von vorhandenen Lösungen zu lernen und gleichzeitig Entwicklungslücken zu identifizieren. Dadurch wird vermieden, bekannte Ansätze unnötig zu reproduzieren, und es wird sichtbar, in welchen Bereichen eine neue oder angepasste Lösung sinnvoll ist.

3.1.2 Analyse des Ist-Zustands

Die Analyse des Ist-Zustands erfolgte durch eine strukturierte Sichtung der Projektdokumentation, relevanter Planunterlagen sowie der geltenden normativen und organisatorischen Rahmenbedingungen des Tunnelbaus. Ziel war es, den bestehenden analogen Prozess der Querverbindungen in einer nachvollziehbaren Form abzubilden und die zentralen Arbeitsschritte, Informationsflüsse und Schnittstellen zwischen den Beteiligten sichtbar zu machen.

Für die Analyse wurde der Prozess in drei übergeordnete Phasen gegliedert:

1. Vorbereitung: Erstellung und Freigabe der Ausführungspläne.
2. Ausführung: Protokollierung der Arbeitsschritte vor Ort.
3. Abnahme und Ausmass: Validierung der erbrachten Leistungen für die Abrechnung.

Die resultierende Prozessdarstellung bildete die visuelle und inhaltliche Grundlage für die anschließenden Fachgespräche. Die vorgängige Analyse des Ist-Zustands war notwendig, um vor Beginn der empirischen Untersuchung einen klaren Überblick über den konkreten Anwendungsfall zu erhalten und die späteren Fragestellungen gezielt auf reale Abläufe und Schwachstellen abzustimmen.

3.1.3 Empirische Datenerhebung: Fachgespräche

Zur Sicherstellung einer hohen Praxisrelevanz wurde die Datenerhebung in Form semi-strukturierter Fachgespräche mit Schlüsselpersonen aus Bauleitung und Ausführung durchgeführt. Die Gespräche dienten dazu, den aufgenommenen Ist-Prozess aus Sicht der beteiligten Akteure zu überprüfen, zu ergänzen und hinsichtlich seiner Schwachstellen zu bewerten. Die Einbindung mehrerer Beteiligter war erforderlich, um den Anwendungsfall nicht nur aus einer einzelnen Perspektive zu betrachten, sondern ein möglichst differenziertes Bild der tatsächlichen Prozessrealität zu erhalten.

Die Fragestellungen wurden auf Grundlage der vorgängigen Recherche- und Analysephase entwickelt. Dadurch konnte sichergestellt werden, dass sowohl theoretisch relevante Aspekte als auch die spezifischen Gegebenheiten des untersuchten Projekts berücksichtigt wurden.

Das methodische Vorgehen bei den Fachgesprächen umfasste drei Elemente:

- Instrumentarium: Es wurde ein standardisierter Fragenkatalog entwickelt, der sicherstellt, dass trotz der Offenheit der Antworten eine Vergleichbarkeit der Daten gewährleistet bleibt.
- Ablauf: Jedem Gespräch ging eine Präsentation des visualisierten Ist-Prozesses voraus. Dies diente als Einleitung, um den Experten eine gezielte Reflexion über bestehende Ineffizienzen zu ermöglichen.
- Fragestellung: Die Fragen konzentrierten sich auf die Handhabung von Daten, die Fehleranfälligkeit manueller Übertragungen und die Schnittstellen zwischen den Projektbeteiligten.

Die Fachgespräche werden in Kapitel 5 detailliert beschrieben.

3.1.4 Qualitative Inhaltsanalyse und Kategorisierung

Die Auswertung der Fachgespräche erfolgte mittels qualitativer Inhaltsanalyse. Die Aussagen der Experten wurden in einer Übersichtstabelle zusammengeführt und thematisch strukturiert ausgewertet. Die Kategorisierung orientierte sich an Themenfeldern wie Datenintegrität, Zeitaufwand und Kommunikationsfluss. Dieses Vorgehen diente dazu, die Aussagen der unterschiedlichen Akteure systematisch zu verdichten und daraus konsolidierte Anforderungen für das angestrebte digitale Konzept abzuleiten. Die thematische Strukturierung war zudem notwendig, da die befragten Personen je nach Funktion über unterschiedliche Kenntnisse verfügten und deshalb nicht alle Fragen in gleichem Umfang beantworten konnten. Auf diese Weise konnte die Auswertung gezielt auf die Forschungsziele ausgerichtet werden.

3.2 Entwicklung des digitalen Workflows und Validierung

Nach Abschluss der Analysephase und der Konsolidierung der Anforderungen aus den Fachgesprächen folgt die Entwicklungsphase. Ziel ist es, den analogen Ist-Zustand in ein effizientes digitales Soll-Konzept für die Querverbindungen zu überführen. Damit soll aufgezeigt werden, dass digitale Prozesse sowohl für die Bauherrschaft als auch für Bauleitung und ausführende Unternehmen konkrete Vorteile hinsichtlich Transparenz, Nachvollziehbarkeit und Effizienz bieten können. Die Grundlagen dafür ergeben sich aus der Literaturrecherche in Kapitel 4, aus der Datenerhebung in Kapitel 5 sowie aus den daraus abgeleiteten Bewertungskriterien.

3.2.1 Variantenstudie und Konzeptentwicklung

Basierend auf dem im vorangegangenen Schritt erstellten Kriterienkatalog werden verschiedene technologische und prozessuale Lösungsvarianten entwickelt. Diese Varianten unterscheiden sich insbesondere hinsichtlich der Nutzung des Potenzials von Trimble Connect, des Automatisierungsgrades, der Kosten sowie der technischen Einbindung zusätzlicher Schnittstellen oder APIs (Trimble Connect, 2026a, 2026b). Die vergleichende Bewertung erfolgt anhand von Kriterien wie technischer Machbarkeit, Dateninteroperabilität, Benutzerfreundlichkeit und Umsetzbarkeit im Projektkontext. Der Vergleich wird durch den Einbezug weiterer Experten, unter anderem aus Planung sowie BIM- und VDC-Management, ergänzt und dient der Auswahl der am besten geeigneten Varianten. Die detaillierte Beschreibung der Variantenbildung und der Entscheidungsfindung erfolgt in Kapitel 6, während die zugrunde liegenden Kriterien in Kapitel 5.3 erläutert werden.

3.2.2 Prototypische Umsetzung und Test am Anwendungsfall

Die ausgewählte Lösung wird anschliessend als digitaler Workflow exemplarisch ausgearbeitet und an einem konkreten Anwendungsfall getestet. Als Fallstudie dient ein spezifisches Szenario der Querverbindungen des zweiten Gotthard-Strassentunnels. Ziel dieses Schritts ist es, nachzuvollziehen, wie Daten von der Baustelle digital erfasst, weiterverarbeitet und in das Ausmass überführt werden können. Der Test ermöglicht es, verbleibende Schnittstellenprobleme zu identifizieren und den Workflow gezielt zu präzisieren. Der Abgleich mit den ursprünglichen Problemstellungen aus der Ist-Zustandsanalyse in Kapitel 4.2 sowie mit den Anforderungen aus Kapitel 5 dient dabei der Validierung der entwickelten Lösung. Die konkrete Umsetzung und Prüfung der Fallstudie werden in Kapitel 7 dargestellt.

3.2.3 Handlungsempfehlungen und Projektabschluss

Den Abschluss der methodischen Arbeit bildet die Ableitung von Handlungsempfehlungen für die Bauherrschaft und die ausführenden Unternehmen. Diese betreffen sowohl technische Voraussetzungen als auch organisatorische und prozessuale Anpassungen, die für eine erfolgreiche Implementierung des digitalen Workflows erforderlich sind. Ziel ist es, nicht nur ein theoretisches Konzept zu entwickeln, sondern einen praxistauglichen Ansatz mit konkreten Hinweisen für die Anwendung bereitzustellen. Die daraus resultierenden Empfehlungen werden in Kapitel 8 zusammengefasst. Die Arbeit schliesst mit der systematischen Darstellung der Resultate in Kapitel 9 und einer kritischen Reflexion der Ergebnisse sowie ihrer Übertragbarkeit auf ähnliche Tunnelbauprojekte in Kapitel 10 ab.

4 Ausgangspunkt

Dieses Kapitel dokumentiert die Ausgangslage, auf deren Grundlage die Lösungsentwicklung in den nachfolgenden Kapiteln aufbaut. Es gliedert sich in zwei Teile. Zunächst werden die Ergebnisse der Literaturrecherche zu digitaler Qualitätskontrolle, CDE-basierten Informationsstrukturen und digitalen Methoden im Tunnelbau zusammengefasst und hinsichtlich ihrer Übertragbarkeit auf den vorliegenden Anwendungsfall bewertet (Kapitel 4.1).

Im zweiten Teil wird der Ist-Zustand des heutigen Ausführungs- und Qualitätskontrollprozesses bei den Querverbindungen analysiert (Kapitel 4.2). Im Mittelpunkt stehen der Informationsfluss zwischen Unternehmer und Bauleitung, die aktuelle Rolle des Kontrollplans sowie dessen Potenzial im Rahmen eines VDC-basierten Ansatzes. Die Ist-Zustand-Analyse ist damit Voraussetzung sowohl für die Identifikation konkreter Digitalisierungspotenziale als auch für die Entwicklung eines praxisnahen Soll-Konzepts.

4.1 Literaturrecherche

Die Literaturrecherche zeigt, dass digitale Methoden im Bauwesen zunehmend eingesetzt werden, um Informationsbrüche zwischen Planung, Ausführung und Dokumentation zu reduzieren (Leygonie et al., 2022; Sudakova et al., 2024; Yoon et al., 2025). Im Zusammenhang mit Qualitätskontrolle liegt der Fokus insbesondere auf der strukturierten Erfassung von Prüfinformationen, der digitalen Nachverfolgbarkeit von Prüfprozessen sowie der Verknüpfung von Prüfobjekten mit Modelldaten und projektrelevanten Dokumenten (Benghi, 2019; Leygonie et al., 2022; Martins et al., 2024). Damit verschiebt sich die Qualitätskontrolle von statischen, dokumentenbasierten Abläufen hin zu datenbasierten und prozessorientierten Arbeitsweisen (Benghi, 2019; Yoon et al., 2025).

4.1.1 Digitale Qualitätskontrolle im Bauwesen

Die ausgewertete Literatur zeigt, dass digitale Qualitätskontrolle vor allem durch strukturierte Prüfdatensätze, definierte Prozessschritte und eine verbesserte Rückverfolgbarkeit gekennzeichnet ist (Benghi, 2019; Leygonie et al., 2022; Yoon et al., 2025). Wiederkehrend beschrieben werden digitale Prüfmerkmale, Verantwortlichkeiten, Statuslogiken und dokumentierte Freigabeprozesse (Benghi, 2019; Leygonie et al., 2022; Sudakova et al., 2024). Im Vergleich zu analogen oder rein dokumentenbasierten Verfahren werden insbesondere Vorteile hinsichtlich Transparenz, Nachvollziehbarkeit und Effizienz genannt (Benghi, 2019; Leygonie et al., 2022; Martins et al., 2024).

Gleichzeitig zeigt die Literatur, dass digitale Qualitätskontrolle nicht allein eine technische, sondern auch eine prozessuale Aufgabe ist (Benghi, 2019; Leygonie et al., 2022; Yoon et al., 2025). Der Nutzen digitaler Systeme hängt wesentlich davon ab, ob Prüfabläufe klar definiert, Zuständigkeiten eindeutig geregelt und Informationen konsistent erfasst werden (Leygonie et al., 2022; Martins et al., 2024; Sudakova et al., 2024).

4.1.2 CDE und modellbasierte Informationsverknüpfung

Ein zentrales Element digitaler Qualitätskontrolle ist die Einbettung der Prüfdaten in eine gemeinsame digitale Arbeitsumgebung (Benghi, 2019; Leygonie et al., 2022). In der Literatur wird das Common Data Environment (CDE) als zentrale Plattform beschrieben, über die Informationen versioniert, ausgetauscht und nachvollziehbar geführt werden können (Benghi, 2019; Matarneh et al., 2022). Für die Qualitätskontrolle ist dies insbesondere deshalb relevant, weil Prüfergebnisse, Nachweise, Freigaben und Korrekturen an einem einheitlichen Ort dokumentiert und projektbezogen verknüpft werden können (Benghi, 2019; Leygonie et al., 2022).

Mehrere Quellen betonen zudem die Bedeutung der Verknüpfung zwischen Prüfdaten und BIM-Modellen (Benghi, 2019; Leygonie et al., 2022; Matarneh et al., 2022). Der Mehrwert liegt dabei weniger in der Modellierung selbst als in der Möglichkeit, Prüfobjekte, Bauteile, Dokumente und Zustände eindeutig miteinander zu verbinden. Dadurch können Qualitätsinformationen bauteilbezogen zugeordnet, Änderungen nachvollzogen und Rückmeldungen systematisch in den Projektkontext eingebettet werden. (Benghi, 2019; Leygonie et al., 2022)

4.1.3 Digitale Technologien im Tunnelbau

Im tunnelbauspezifischen Kontext zeigt die Literatur einen vergleichsweise hohen Reifegrad digitaler Erfassungs- und Auswertungsmethoden. Insbesondere Laserscanning, digitale Vermessung, photogrammetrische Verfahren sowie datenbasierte Systeme wie Measurement While Drilling (MWD) werden eingesetzt, um Zustände aufzunehmen, geometrische Abweichungen zu analysieren oder baubegleitende Informationen digital verfügbar zu machen (NFF, 2019). Ergänzend dazu liefern aktuelle tunnelfachspezifische Leitlinien und Praxisdokumente einen Orientierungsrahmen für die grundsätzliche BIM-Anwendung im Tunnelbau (V. E. Gall et al., 2025).

Gleichzeitig wird deutlich, dass sich ein grosser Teil dieser Literatur auf Datenerfassung, Visualisierung und Monitoring konzentriert. Deutlich seltener wird beschrieben, wie diese Informationen in strukturierte qualitätsbezogene Kontrollprozesse überführt werden können. Insbesondere fehlen belastbare Ansätze dafür, wie Felddaten mit Prüfmerkmalen, Verantwortlichkeiten, Statuslogiken und CDE-basierten Freigabeprozessen verbunden werden. (Benghi, 2019; Leygonie et al., 2022)

4.1.4 Fazit zur Literaturrecherche

Die Literaturrecherche zeigt, dass digitale Ansätze im Bauwesen und insbesondere im Tunnelbau in den vergangenen Jahren deutlich an Bedeutung gewonnen haben. Für den allgemeinen Kontext digitaler Qualitätskontrolle konnten zahlreiche Publikationen identifiziert werden, die strukturierte Prüfdatensätze, workflowbasierte Freigabeprozesse, CDE-Integration sowie modellbezogene Verknüpfungen zwischen Prüfobjekten und BIM-Elementen beschreiben (Benghi, 2019; Leygonie et al., 2022; Sudakova et al., 2024; Yoon et al., 2025). Insbesondere im Allgemeinen Hoch- und Infrastrukturbau lässt sich somit ein fortgeschrittener Stand der Forschung zu digitalen Qualitätsprozessen feststellen.

Gleichzeitig wurde deutlich, dass die vorhandene Literatur nur begrenzt auf die spezifische Fragestellung dieser Arbeit eingeht. Während digitale Kontrollprozesse, Datenstrukturen und Interoperabilitätsansätze grundsätzlich behandelt werden, fehlt es an konkreten Ansätzen zur systematischen Übertragung dieser Konzepte auf qualitätsbezogene Baustellenprozesse im Tunnelbau. Im tunnelbauspezifischen Kontext dominieren in der Literatur vor allem Themen wie digitale Vermessung, Laserscanning, Monitoring, MWD sowie allgemeine BIM-Implementierungsfragen. Diese Beiträge zeigen zwar, dass digitale Technologien und Datenquellen bereits breit verfügbar sind, behandeln jedoch die strukturierte Integration in Kontrollpläne, Freigabeprozesse und CDE-basierte Qualitätskontrollen nur punktuell.

Ein wesentlicher Befund der Literaturrecherche ist daher, dass die Forschungslücke weniger in der Verfügbarkeit digitaler Technologien liegt als vielmehr in deren prozessualer und datenstrukturellen Einbindung in operative Qualitätskontrollen auf der Baustelle. Insbesondere fehlen belastbare Modelle dafür, wie Kontrollpläne digital aufgebaut, mit Verantwortlichkeiten und Statuslogiken verknüpft, im CDE geführt und über BIM2FIELD- beziehungsweise FIELD2BIM-Prozesse mit Modell- und Felddaten gekoppelt werden können. (Benghi, 2019; Leygonie et al., 2022; Martins et al., 2024)

Der zusätzlich berücksichtigte aktuelle ITA-Report zur BIM-Anwendung im Tunnelbau (V. E. Gall et al., 2025) bestätigt diesen Befund. Er schafft einen wichtigen Orientierungsrahmen für die grundsätzliche

BIM-Implementierung im Tunnelbau, lässt jedoch gleichzeitig offen, wie qualitätsbezogene Kontrollinformationen auf Baustellenebene konkret strukturiert, erfasst, validiert und in digitale Prozessketten rückgeführt werden sollen. Damit präzisiert die Literaturrecherche nicht nur den Stand der Forschung, sondern begründet auch die Relevanz der vorliegenden Arbeit.

Insgesamt lässt sich festhalten, dass sowohl im Allgemeinen als auch im tunnelbauspezifischen Kontext bereits zahlreiche digitale Grundlagen vorhanden sind. Der wissenschaftliche und praktische Mehrwert der vorliegenden Arbeit liegt daher nicht in der Entwicklung neuer digitaler Einzeltechnologien, sondern in der Untersuchung, wie bestehende digitale Ansätze zu einem konsistenten, nachvollziehbaren und praxistauglichen Qualitätskontrollprozess zusammengeführt werden können.

4.2 Ist-Zustand Analyse: Ausführungsprozess und Qualitätskontrolle

Die Analyse des Ist-Zustands konzentriert sich auf den Ablauf der Ausführung von Spezialtiefbauarbeiten, wobei der Schwerpunkt auf der Interaktion zwischen Projektverfasser (PV), Bauleitung (BL) und Bauunternehmen (UN) liegt. Der Prozess, der mithilfe einer BPMN-Notation abgebildet wurde, zeigt eine sequenzielle Struktur, die durch strenge Qualitäts- und Sicherheitsprüfungen geregelt wird.

Das in Anhang C enthaltene Prozessdiagramm zeigt drei verschiedene Makro-Phasen: die operative Planung, die Ausführung mit Überwachung und die abschliessende Validierung für die Rechnungslegung. Dieses Diagramm wurde im Rahmen der Masterarbeit entwickelt und vom Thesis-Experten Renato Baumann validiert. Im Folgenden werden die identifizierten Teilprozesse und Kontrollmechanismen detailliert beschrieben.

Wie man das Diagramm liest:

- Makro-Phasen
 - Rot - die operative Planung
 - Grün - Ausführung mit Überwachung
 - Schwarz - abschliessende Validierung
- Teilprozesse
 - Blau - Qualitätsplanung
 - Gelb - Sicherheitsplanung
 - Violette - Qualität Überwachung

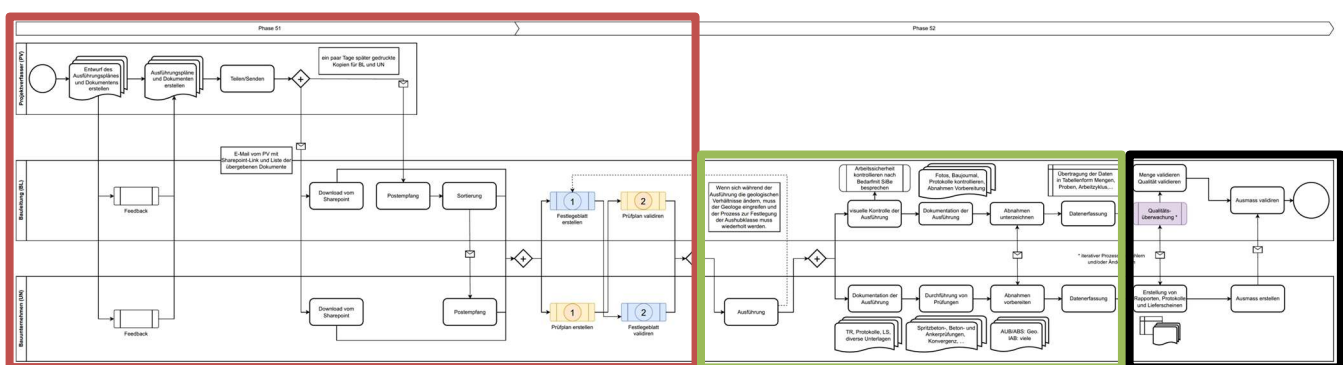


Abbildung 13, Ist-Zustand, Screenshot von Anhang C – Hauptprozess

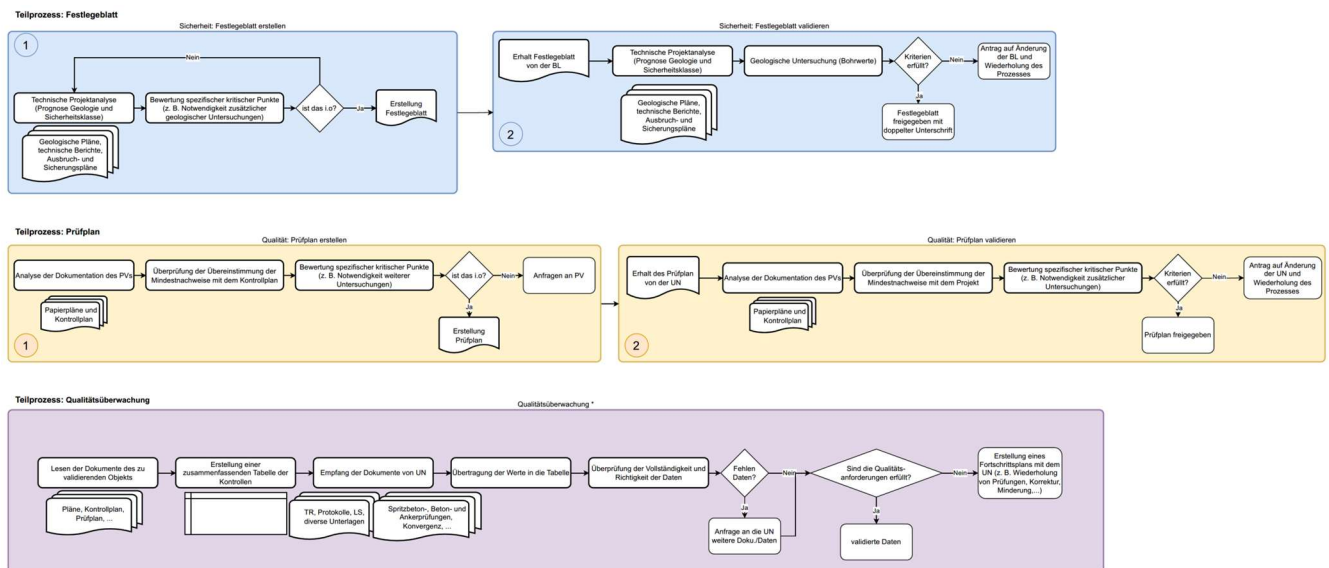


Abbildung 14, Ist-Zustand, Screenshot von Anhang C – Teilprozesse

In den folgenden Unterkapiteln wird der Prozess Schritt für Schritt ausführlich beschrieben.

4.2.1 Informationsfluss und operative Planung

Der Prozess beginnt mit der Anpassung der Ausschreibungsunterlagen zur Ausarbeitung der Ausführungspläne. In dieser Phase werden sowohl die Bauleitung als auch das Bauunternehmen einbezogen. Aus praktischen Gründen kann das Bauunternehmen Anpassungen beantragen, die sich aus unterschiedlichen Lieferungen oder den für die Ausführung eingesetzten Maschinen ergeben. Der Umfang der Änderungen bleibt dabei begrenzt. Anschliessend geht es weiter mit der Ausstellung der Ausführungsunterlagen durch den Planer. Die Verteilung erfolgt über eine gemeinsame Plattform des Auftraggebers (SharePoint), wodurch sichergestellt wird, dass alle Parteien auf dieselbe Version der Dokumente zugreifen können. Es ist jedoch festzustellen, dass weiterhin parallele analoge Abläufe (Versand von Papierkopien) bestehen, was auf einen hybriden Digitalisierungsgrad hindeutet.

Die Vorbereitungsphase ist durch zwei parallele Genehmigungsprozesse gekennzeichnet, die beide für den Beginn der Arbeiten blockierend sind:

1. **Qualitative Validierung (Prüfplan):** Das Unternehmen (UN) erstellt einen Prüfplan auf der Grundlage der Projektanforderungen. Die Bauleitung (BL) analysiert diesen Plan und überprüft ihn auf Übereinstimmung mit den Vertragsunterlagen und das Vorliegen der erforderlichen Mindestnachweise. Nur wenn die Kriterien erfüllt sind, wird der Plan freigegeben; andernfalls wird ein iterativer Korrekturzyklus ausgelöst.
2. **Sicherheitsvalidierung (Festlegeblatt):** Parallel dazu erstellt die BL das „Festlegeblatt“, ein dynamisches Dokument, das die Sicherheitsklasse und die Unterstützungsmassnahmen auf der Grundlage der zu erwartenden geologischen Bedingungen festlegt. Dieses Dokument muss vom Unternehmen validiert werden, bevor fortgefahren werden kann. Bei geologischen Veränderungen durch die Ausführung wird das Festlegeblatt aktualisiert.

Betrachtet man den Prozess im Allgemeinen, fällt auf, dass sich einige Phasen mehrmals wiederholen. In diesem Teil des Prozesses hängt diese Redundanz (zu Recht) mit der Vertiefung des Projekts zusammen. Zu Recht, denn der Bauführer, der die Tests vor der Planung durchführen muss, muss sich damit auskennen.

Der Beginn der Ausführungsphase (*Ausführung*) ist an ein „AND“-Gateway gebunden, das den positiven Abschluss beider oben beschriebener Teilprozesse vorschreibt.

4.2.2 Ausführung und Qualitätsüberwachung

Während der Ausführungsphase teilt sich der Prozess in zwei gleichzeitige Kontrollaktivitäten auf:

- **Sichtkontrolle (BL):** Die Bauleitung führt Sichtkontrollen und Sicherheitskontrollen auf der Baustelle durch. Für eingehende Sicherheitskontrollen ist der Sicherheitsbeauftragte (SiBe) zuständig, der jedoch Mitglied des BL-Teams ist.
- **Dokumentation und Prüfungen (UN):** Das Unternehmen ist für die Erstellung der Dokumentation (Fotos, Tagesrapporte, Protokolle) und die Durchführung der technischen Prüfungen verantwortlich.

Ein kritischer Punkt ist die Verwaltung der Prüfdaten (z. B. Prüfungen von Spritzbeton, Verankerungen, Konvergenzen). Diese Daten werden vom Unternehmen gesammelt und zur Validierung an die Bauleitung weitergeleitet.

Kritisch ist auch die Methode der Datenübermittlung. Jeder Bauführer und Bauleiter hat seine eigene Methode. Insgesamt wurden hauptsächlich die Übermittlung per E-Mail und das Hochladen auf den SharePoint des Unternehmens identifiziert.

Dieses Kontrollsystem verfügt über zahlreiche Kontrollpunkte, aber auch über viele Möglichkeiten, bei denen es aufgrund der Redundanz der Übertragungsprozesse leicht zu Tippfehlern oder ähnlichen Fehlern kommen kann. Denn für jedes erstellte Protokoll läuft folgende Abfolge ab:

1. Messung durch den Polier / parallele Überwachung durch die BL
2. digitale Erfassung durch den Bauführer
3. Übermittlung durch den Bauführer an das BL-Team und gegebenenfalls an die Vorgesetzte
4. Überprüfung durch die BL, ob die Werte mit den Aufzeichnungen übereinstimmen
5. Rücksendung des unterzeichneten Dokuments oder mit Bemerkungen

4.2.3 Der Inhalte des Kontrollplans

Der Kontrollplan stellt das regulatorische Rückgrat der Qualitätssicherung für den Bau der zweiten Röhre des Gotthard-Strassentunnels dar. Das Dokument umfasst in seiner Gesamtheit 75 Seiten und wird ursprünglich vom Projektverfasser (PV) (T. Fries & S. Böheim, 2024) erstellt. Er legt folgende verbindliche Eckpunkte fest:

- Prüfungsmodalitäten: Art und Häufigkeit der durchzuführenden Prüfungen.
- Abnahmekriterien: Die Akzeptanzschwellenwerte für Materialien und Bearbeitungen.
- Regelwerk: Die massgebenden Referenznormen (z. B. SIA, VSS).
- Governance: Die Verantwortlichkeiten der verschiedenen Akteure (Bauherr, BL, UN).

Für die vorliegende Arbeit wurde eine systematische Analyse dieses Dokuments durchgeführt, um die spezifischen Prüfprozesse für die Querverbindungen (QV) zu extrahieren. Dabei wurde eine wesentliche methodische Trennung vorgenommen (siehe Anhang C):

- Aushub und Sicherung: Fokus auf Geologie, Ortsbrust und Standsicherheit.
- Innenausbau: Fokus auf Schalung, Bewehrung, Abdichtung und Einbauteile.

Im Kontrollplan ist vorgesehen, dass alle Dokumente eingescannt und hinterlegt werden. Es wird angedeutet, dass die Gültigkeit des Dokuments weiterhin in der Papierversion liegt. Ausserdem sollte jeden Monat von der UN der *Monatlicher Prüfbericht* erstellt werden.

4.2.4 Die Rolle des Kontrollplans

Im aktuellen Prozess dient der Kontrollplan als primäre Referenz für die Bauleitung (BL) bei der Validierung des Prüfplans der Unternehmung (UN). Er stellt sicher, dass die Baustellenarbeiten strikt gemäss den Spezifikationen der Leistungsverzeichnis (LV) ausgeführt werden.

In der täglichen Praxis fungiert er als Kontrollinstanz für die Erstellung der Lieferscheine (LS), Tagesrapporte (TR) und Protokolle. Die Untersuchung zeigt jedoch, dass die manuelle Selektion der relevanten Prüfpunkte aus dem 75-seitigen Dokument oft zu Verzögerungen führt, da die Informationen nicht kontextbezogen, sondern rein dokumentenbasiert vorliegen.

4.2.5 Der Nutzen des Kontrollplans in VDC

Die zentrale Frage dieses Abschnitts lautet: welche Informationen des Kontrollplans müssen digital erfasst werden, damit eine lückenlose und konsistente Qualitätssicherung der Querverbindungen (QV) im Common Data Environment möglich wird? Der Fokus liegt dabei nicht auf der Digitalisierung des gesamten 75-seitigen Originaldokuments, sondern auf der gezielten Extraktion derjenigen Prüfvariablen, die einen direkten Bauteilbezug zur QV aufweisen und im Bauablauf in einer auswertbaren Form anfallen.

Methodisch wurde dafür ein phasenweiser Ansatz gewählt. Aus dem Anhang A des Originalkontrollplans wurden zunächst alle NPK-Abschnitte ausgewählt, die inhaltlich eine Querverbindung berühren können

- NPK 112.200 — Untertagbau
- NPK 112.400 — Beton
- NPK 112.500 — Abdichtungen
- NPK 112.810 — Flüssige Stoffe (Bergwasser, Nutzwasser)
- NPK 112.820 — Gasförmige Stoffe (Atemluft im Untertagbau)
- NPK 132 — Bohren und Trennen von Beton (Durchbrüche QV ↔ Haupttröhre)
- NPK 117 — Abbrüche und Demontagen
- NPK 276 — Vorauserkundungen und Überwachungen

Anschliessend wurden die Prüfzeilen einzeln auf ihre QV-Relevanz geprüft und in vier konsequente Phasen gegliedert, die dem realen Bauablauf einer Querverbindung folgen:

- Phase A — Ausbruch im Sprengvortrieb (SPV): Fels- und Geologieprüfungen, Vermessungsfixpunktnetz und Absteckung, Profilvermessungen, Wahl des Ausbruchsicherungstyps und Sprengkonzept.
- Phase B — Sicherung des Ausbruchs: Felsanker und Nägel, Bewehrungsmatten, Verarbeitung der Spritzbetonsicherung sowie Material-Vorversuche und Eignungsnachweise der Sicherungssysteme.
- Phase C — Innenausbau (IAB): Ortbeton von Vorversuchen über Frisch- und Festbeton bis zur Durabilität, Bewehrung, einbetonierte Werkleitungen sowie KDB-Abdichtungssystem.
- Phase D — Übergreifend: geodätisches Monitoring, Bergwasser- und Nutzwasserkontrollen, Baulüftung und Atemluft-Überwachung, Triage des Ausbruchmaterials inklusive der Durchbrüche zur Haupttröhre, sowie Arbeitssicherheit und Gesundheitsschutz.

Über alle Phasen hinweg gelten universelle Ausschlüsse, die konsequent angewendet wurden:

- TBM-spezifische Prüfungen
- Tübbing- und WELK-Fertigteilkontrollen
- Bauhilfsmassnahmen (Spiess- und Rohrschirm, Lange Brustanker, Injektionen)
- Mikropfähle und Drainagen-Vorauserkundungsbohrungen
- Portalbereich-Permanentanker (NPK 164) und Stapelbecken-Bodennägel
- Nicht-KDB-Abdichtungssysteme (PBD, FLK, OS-Tunnelbeschichtung)
- Werkleitungsraben sowie Verkehrsanlagen mit bituminösen Schichten
- Generischer Stahl- und Holzbau, Mauerwerk und Fassaden ohne QV-Bezug

Das Ergebnis dieses Filterprozesses ist der QV-spezifische Auszug, der in Anhang D eingesehen werden kann, mit 224 Prüfzeilen, organisiert in 25 thematischen Abschnitten über die vier Phasen. Der Auszug behält die Spaltenstruktur des Originalkontrollplans bei und erweitert sie um zwei neue Spalten zwecks Digitalisierung und Rückverfolgbarkeit. Die vollständige Spaltenarchitektur ist:

- Prüfgegenstand / Zu prüfende Eigenschaft / Zu überwachendes Bauteil
- Art der Prüfung
- Prüfungszeitpunkt
- Häufigkeit / Anzahl
- Veranlassung
- Durchführung
- Interpretation
- Qualitätsanforderung
- Massnahmen bei ungenügendem Resultat
- Vergütung NPK
- Art der Kontrolle während der Ausführung — neu in Anhang D; gibt für jede grüne Prüfung das konkrete Erfassungsmedium im CDE an (Geo-Baujourmale, Bauvermesser, Lieferschein/Zertifikat, Abnahmeprotokoll, Bewehrungsprotokoll, Profilaufnahmen).
- Original-Zeile — neu in Anhang D; Zeilennummer im Originalblatt F3 zwecks Rückverfolgbarkeit zum Anhang A des Originalkontrollplan.

Jede Prüfzeile wurde anschliessend nach ihrer Eignung für den BIM2Field-Workflow in Trimble Connect dreiteilig farblich klassifiziert:

- **Grün — digitalisierbar (112 Prüfpunkte, 53 %).** Prüfungen, die direkt am QV-Bauteil verortet und im CDE als Form, Messwert oder geocodiertes Foto erfasst werden können: Geo-Baujourmale am Vortrieb, geodätische Vermessungen, Profilkontrollen, Materialannahmen mit Lieferschein, Schalungs- und Bewehrungsgeometrie, KDB-Verlegung sowie Werkleitungseinbau.
- **Gelb — präliminär (41 Prüfpunkte, 20 %).** Vorversuche, Eignungsnachweise und Erstprüfungen, die zeitlich vor der QV-Ausführung stattfinden. Sie verbleiben im DMS als Dokumentverweis und erscheinen im CDE lediglich als Gültigkeitsstatus auf der übergeordneten QV-Position.
- **Rot — BIM2Field-relevant, nicht digitalisierbar (57 Prüfpunkte, 27 %).** Prüfungen, die zur Ausführung gehören und qualitätskritisch sind, sich aber nicht als strukturiertes digitales Datum erfassen lassen: qualitative Sichtkontrollen am Ortbeton, Sicherheitsbegehungen, Ausbruchmaterial-Triage sowie Spezialgerät-Messungen mit verzögerter Auswertung.

Überarbeitung des Kontrollplans

Um zu diesem Ergebnis zu gelangen, wurde eine sorgfältige Analyse des Projektdokuments mit dem Titel „Kontrollplan“ und seines Anhangs A durchgeführt. In einem ersten Schritt wurde das Dokument aufmerksam gelesen und die verschiedenen Themen vertieft, um einen möglichst umfassenden Überblick über die Definition von Qualität und ihre Bewertungskriterien zu erhalten.

Während der Untersuchung des Kontrollplans wurde versucht, die für die Qualitätsanforderungen relevanten Teile einzeln herauszufiltern; da dieser Prozess jedoch zu lange dauerte und nicht zielführend war, wurde beschlossen, nach dem Prinzip der Reduktion, statt der Addition vorzugehen. Ausgehend von der Tabelle in Anhang A wurden alle Materialprüfungen oder Bauwerksprüfungen eliminiert, die nichts mit den Qualitätsanforderungen des QV zu tun hatten.

Um die Themen der Kontrollen oder Prüfungen zu vertiefen, wurden die erfahrensten Kollegen der Bauleitung wie der Losleiter, der Verantwortliche für den Innenausbau, die Geologen und die verschiedenen Bauleiter der von der Analyse betroffenen Bauabschnitte im Rahmen von Einzelgesprächen oder Sitzungen befragt.

Nachdem die für die Qualitätsprüfungen relevanten Prüfungen zusammengestellt worden waren, wurden diese nach Themen neu geordnet und entsprechend der Abfolge der Bauarbeiten logisch sortiert, beispielsweise zuerst die Aushub-/Geologie-/Sicherungsarbeiten und dann der Innenausbau. Vor der

Überarbeitung des Dokuments wurde eine Spalte hinzugefügt, die die Prüfungen mit dem Zeilenwert der Prüfung im Originaldokument verweist, um eine doppelte Kontrolle zu ermöglichen, da dieses Dokument auch den Kollegen zur Verfügung gestellt wird.

Anschliessend wurden alle Vorversuche ausgeschlossen, da diese bereits für andere Bauabschnitte durchgeführt wurden, und gelb markiert. Mithilfe von Einzelgesprächen wurden die Versuche herausgearbeitet, die nur visuell durchgeführt werden, sowie diejenigen, die von einem Protokoll begleitet werden. Wenn die Versuche von einem Protokoll begleitet werden, fallen sie in die grüne Kategorie, und in der vorletzten Spalte wird die Art des Protokolls angegeben. Diese Prüfungen fallen in die grüne Kategorie, da es einfach ist, die zu digitalisierenden Eigenschaften in Trimble zu definieren, da es sich um dieselben Einträge handelt, die im Protokoll enthalten sind. Die anderen wurden einzeln geprüft, und die meisten wurden als rot definiert, da es sich um Sichtkontrollen handelt, bei denen nur im Falle einer Nichtkonformität eingegriffen wird. Daher wird es nicht als sinnvoll erachtet, alle Prüfungen kontinuierlich zu digitalisieren; es ist sinnvoller, wie bisher nur eventuelle Probleme anzugeben.

Der vollständige tabellarische Auszug ist in Anhang D enthalten. Der Auszug bildet die empirische Grundlage für die Untersuchung der Varianten in Kapitel 6 und für die Fallstudie in Kapitel 7, insbesondere für Variante 2 (Trimble Connect Pro mit P-Set), bei der die grünen Kontrollpunkte als Attribute des QV-Objekts und die gelben oder roten als Verweise auf Dokumente abgebildet werden.

4.2.6 Buchhalterische Validierung und «Ausmass»

Die abschliessende Phase des Prozesses verbindet den wirtschaftlichen Aspekt eng mit dem technisch-qualitativen Aspekt. Das Ausmass-Verfahren (Vermessung und Abrechnung) ist keine einfache quantitative Berechnung, sondern ein komplexer Überprüfungsprozess. Es folgt der Vertragsstruktur der Leistungsverzeichnisse von CRB nach NPK (Normpositionenkatalog).

Das Diagramm zeigt einen strengen Validierungsunterprozess, der auf drei Überprüfungsebenen aufgebaut ist:

1. **Überprüfung der Datenvollständigkeit:** Die BL überprüft das Vorhandensein aller beigefügten Unterlagen (z.B. Protokolle, Lieferscheine, Wägungen und Kalibrierungen).
2. **Qualitätsprüfung:** Es wird ausdrücklich überprüft, ob die Qualitätsanforderungen erfüllt sind („Sind die Qualitätsanforderungen erfüllt?“). Bei einem negativen Ergebnis erfolgt keine Zahlung, sondern es wird ein Verfahren zur Behandlung von Nichtkonformitäten (Wiederholung der Prüfungen, Herabstufung oder Preisnachlässe) eingeleitet.
3. **Sicherheit-Preis-Korrespondenz:** Ein besonderer Aspekt des Prozesses ist die Preisgestaltung in Abhängigkeit vom tatsächlich angewandten Sicherheitsgrad (*Sicherheitsgrad*). Dieser Mechanismus verhindert, dass Beträge für nicht umgesetzte Sicherheitsmassnahmen anerkannt werden, und bindet die Buchhaltung an die geologische und technische Realität.

Erst wenn alle Kontrollpunkte passiert sind, werden die Daten konsolidiert und für die Rechnungsstellung validiert.

5 Datenerhebung

In diesem Kapitel werden die im Rahmen der empirischen Untersuchung erhobenen Daten dokumentiert. Dies umfasst die Vorstellung des entwickelten Fragenkatalogs (Anhang E), die Durchführung der Expertengespräche sowie die Definition der daraus resultierenden Kriterien für die spätere Variantenbeurteilung.

5.1 Erhebungsinstrument: Fragenkatalog

Der für die Fachgespräche entwickelte Fragenkatalog (siehe Anhang E) fungiert als standardisiertes Instrument zur Identifikation von Digitalisierungspotenzialen. Konzeptionell stützt er sich auf die Normenreihe SN EN ISO 19650 zum Informationsmanagement im Bauwesen — insbesondere auf Teil 1 (Konzepte und Grundsätze) für den übergreifenden Rahmen (CDE, Single Source of Truth, LOIN), auf Teil 2 (Lieferphase der Anlagen) als die für die untersuchte Bauphase einschlägige Norm sowie auf Teil 4 (Informationsaustausch) für die Anforderungen an einen strukturierten Datenaustausch und an die Vermeidung von Informationsverlusten.

Dieser dient dazu, die theoretischen Annahmen aus der Literaturrecherche mit der baubetrieblichen Realität am Gotthard-Strassentunnel abzugleichen.

Denn bei einem Projekt, das Literaturrecherche und Baustellenpraxis verbindet, ist es ratsam, vor Beginn der Testphase sicherzustellen, dass die theoretischen Erkenntnisse auch auf den konkreten Fall der Baustelle, auf der getestet wird, anwendbar sind. So wurde beispielsweise das in einigen Fachpublikationen hervorgehobene Problem der Konnektivität auf dieser Baustelle nur von einer einzigen Person gemeldet.

5.1.1 Struktur und Modulaufbau

Der Fragenkatalog ist in vier spezifische Module unterteilt, um unterschiedliche Perspektiven des Bauprojekts zu beleuchten. Modul A (Allgemeine Prozessanalyse) konzentriert sich auf die Identifikation von Engpässen und Medienbrüchen innerhalb des gesamten Workflows. Modul B (Operativer Fokus) richtet sich gezielt an das Personal vor Ort (Polier, Schichtbauleiter, Bauführer) und behandelt praktische Themen wie die Verwaltung der Dokumentation im Tunnel sowie den Einfluss des menschlichen Faktors auf die Datenqualität. Modul C (Fokus auf Auftraggeber und Leitung) richtet sich an die Entscheidungsträger des Projekts und behandelt die Ziele und Erfolgskriterien des Pilotprojekts. Modul D (Fokus Planer und Programmtechniker) richtet sich an Personen mit Softwarekenntnissen und zielt darauf ab, die beste Wahl für die Umsetzung der Qualitätsdigitalisierung zu ermitteln.

5.1.2 Methodik der Zweisprachigkeit

Aufgrund des internationalen Umfelds des Projekts wurde das Instrument konsequent zweisprachig (Deutsch und Italienisch) erstellt. Dabei wurde sichergestellt, dass die Fragen in beiden Sprachen inhaltlich und logisch identisch sind. Dieser Ansatz garantiert, dass technische Begriffe (z. B. Ausmass oder Mehraufwand) von allen Akteuren einheitlich interpretiert werden und die Validität der Antworten unabhängig von der Muttersprache des Experten gewahrt bleibt.

5.2 Durchführung der Fachgespräche

Die Datenerhebung basiert auf einem direkten Austausch mit den Schlüsselpersonen des Projekts. Die Gespräche wurden so konzipiert, dass sie eine Brücke zwischen der theoretischen Prozessmodellierung und der praktischen Ausführung schlagen. Denn ohne diese Verbindung zwischen Theorie und Praxis ist weder ein angemessener Vergleich der entwickelten Varianten (Kapitel 6) noch ein erfolgreicher Abschluss der Fallstudie (Kapitel 7) möglich.

5.2.1 Auswahl der Experten und Stakeholder-Matrix

Für die Gespräche wurden Vertreter der Bauleitung (Örtliche Bauleitung) sowie technische Verantwortliche der beteiligten Bauunternehmungen ausgewählt. Diese Auswahl stellt sicher, dass sowohl die kontrollierende als auch die ausführende Seite der Querverbindungen repräsentiert ist. Die Experten verfügen über tiefgreifende Kenntnisse in den Bereichen Qualitätskontrolle, Abrechnung und operative Baustellenlogistik.

In einem zweiten Schritt wurden auch Planer und Digitalisierungsspezialisten befragt, um die beste Variante für die Fallstudie auszuwählen.

Die Namen, Firmen, Funktionen und Fachgebiete der Befragten sind in tabellarischer Form aufgeführt.

Tabelle 6, Befragte Akteure zur Entwicklung der Varianten und zur Auswahl der zu testende Varianten

Vorname und Nachname	Firma	Funktion	Fachgebiet
Andrej Lesjak	IUB Engineering AG	Schichtbauleiter	QV – AUB/ABS
Mirko Hemkendreis	IM Maggia Engineering SA	Schichtbauleiter Stv. Los Leiter	IAB
Marvin Rossi	IM Maggia Engineering SA	Schichtbauleiter	IAB
Cristhian Garcia	Studio Ingegneria Sciarini SA	Schichtbauleiter	Qualität
Luigi Manuel Rizzo	IUB Engineering AG	Schichtbauleiter	IAB + WELK
Leo Neininger	Gähler & Partner AG	Los Leiter	-
Renato Baumann	IUB Engineering AG	Chefbauleiter	-
Jonthan Fernandes	Frutiger AG	Bauführer	QV – AUB/ABS/IAB
Andy Kiser	Frutiger AG	Bauführer	QV – AUB/ABS
Robin Lora	Frutiger AG	Polir	QV – AUB/ABS
Lyam Koch	Implenia Schweiz AG	Bauführer	Qualität
Enea Cecchini	Implenia Schweiz AG	BIM Koordinator	-
Xavier von Mandach	Implenia Schweiz AG	Stv. Baustellenleiter	
Marko Timic	BuildingPoint Schweiz AG	Trimble connect specialist	-
Lorenzo Verde	IM Maggia Engineering SA	BIM Manager	-
Rita Sanfilippo	Lombardi Engineering Ltd	BIM Manager	-
Nikola Milojevic	ILF Beratende Ingenieure AG	Projektingenieur	PV
Valerie Metelka	ILF Beratende Ingenieure AG	BIM Koordination	PV
Jacopo Chedda	ASTRA	Kunde	-

QV = Querverbindung, AUB = Ausbruch, ABS = Ausbruchssicherung, IAB = Innenausbau, WELK = vorgefertigter Kanal

Die Gespräche fanden mit verschiedenen Mitarbeitern statt, je nach ihrer Funktion und ihrem Fachgebiet. Es wurden verschiedene Bauleiter je nach ihrem Fachgebiet befragt, um einen umfassenden Überblick über den aktuellen Prozess zu erhalten und zu ermitteln, in welchen Bereichen Verbesserungsbedarf besteht. Zunächst wurden Mitarbeiter des Unternehmens befragt, die an der Ausführung des spezifischen Bauabschnitts beteiligt waren (QV), anschliessend auch der Qualitätsbeauftragte und deren BIM-Spezialist. In der Phase der Variantenbewertung wurden verschiedene Spezialisten aus dem Bereich der Digitalisierung von Infrastrukturen befragt.

5.2.2 Prozessvorstellung und Fachgespräch-Ablauf

Jedem Gespräch ging die Präsentation des aktuellen BPMN-Diagramms (Ist-Zustandprozesse) voraus. Diese Visualisierung diente als methodische Einleitung, um den Befragten den aktuellen Informationsfluss vor Augen zu führen. Auf dieser Basis wurden die Fragen des Katalogs erörtert, wobei insbesondere die Phasen zwischen der Ausführungsplanung und der finalen Abnahme kritisch reflektiert wurden.

5.2.3 Zentrale Erkenntnisse der Fachgespräche

Die Auswertung der Gespräche erfolgte qualitativ entlang der vier Module des Fragenkatalogs (Anhang E). Pro Modul wurden die Aussagen thematisch geclustert; Mehrfachnennungen wurden als Indikator für die Belastbarkeit einer Aussage gewertet. Die nachfolgende Zusammenstellung beschränkt sich auf jene Befunde, die unmittelbar in die Ableitung der Evaluierungskriterien (Kap. 5.3) und in die Variantenbildung (Kap. 6) einfließen. Die vollständigen Antworten der Befragten werden aus persönlichen Gründen einiger Befragter nicht wiedergegeben.

Modul A – Prozessanalyse und Engpässe

Aus den Antworten der befragten Schichtbauleiter, Bauführer und Los-Leiter zeichnet sich ein einheitliches Bild der prozessualen Engpässe ab. Die grössten Zeitverluste werden konsistent in der Schnittstelle zwischen Ausführungsplanung (Phase 51) und Ausführung (Phase 52) verortet; der Informationsfluss in Phase 52 wird als blockiert beschrieben, was auf eine schlecht strukturierte Phase 51 zurückgeführt wird (Garcia, 2025). Ergänzend wird die Rückmeldephase auf die „Bozza Rossa“ als vorgelagerter Engpass identifiziert: die Unternehmung investiert über zu wenig Zeit, um die Entwurfsgrundlagen vor Beginn der Ausführung vollständig zu prüfen, sodass Ausführungsprobleme erst während der Ausführung selbst sichtbar werden (Kiser, 2026). Ein konkretes Beispiel hierfür sind die Kabelkanaldurchführungen, bei denen sich der Übergang zwischen Planung und Ausführung als kritisch erweist (Fernandes, 2026). Als Hauptauslöser von Korrekturschleifen werden zudem der Empfang papierbasierter Pläne sowie die fehlende Versionsklarheit identifiziert; in diesem Zusammenhang wird der Bedarf nach einer Datenbank formuliert, in der die jeweils aktuelle Planversion eindeutig identifizierbar ist (Lesjak, 2025; Rizzo, 2026).

Die Medienbrüche und Redundanzen werden übereinstimmend bei der Übertragung von Lieferscheinen, Tagesrapporten und Protokollen aus papier- bzw. PDF-basierter Form in die Kontrolltabellen verortet (Kiser, 2026; Lesjak, 2025; Rossi, 2026). Diese Schritte werden als ausschliesslich manuelle Transkription von den durch die Unternehmung bereitgestellten Plänen und Tabellen in die Kontrolltabellen der Bauleitung qualifiziert (Rizzo, 2026). Im weiteren Verlauf wird eine doppelte Bearbeitung des Kontrollplans im Prüfplan beschrieben (Garcia, 2025); die parallele Datenerfassung sowohl für die Qualitätskontrolle als auch für das Ausmass wird bestätigt und der entstehende Aufwand als sehr gross qualifiziert (Fernandes, 2026; Neining, 2026).

Die Häufigkeit von Korrekturschleifen wird unterschiedlich beurteilt: von „wenige“ bzw. „selten“ (Fernandes, 2026; Kiser, 2026; Rizzo, 2026) über „mittel“ bis „zu Projektbeginn häufiger“ (Lesjak, 2025; Rossi, 2026) bis hin zu „oft“ (Garcia, 2025). Diese Streuung folgt erkennbar der Position der Befragten im Wertstrom: je näher an der täglichen Eingangskontrolle und am Schichtbau, desto häufiger werden iterative Schleifen wahrgenommen.

Bezüglich des Umgangs mit geologischen Änderungen ist der bestehende Prozess als robust zu bewerten: nach jeder Sprengung erfolgt eine Geologen-Inspektion, alle 7–10 Meter werden Sondierungen für die Anpassung der Sicherheitsklasse durchgeführt (Fernandes, 2026); die Aktualisierung des Festlegeblattes geschieht etappenweise (Lesjak, 2025; Rossi, 2026); das etablierte Vorgehen wird als funktionierend bewertet (Kiser, 2026). Aus diesem Modul ergibt sich kein vorrangiger Digitalisierungsbedarf.

Modul B – Operativer Fokus

Die Nutzbarkeit digitaler Geräte im Untertagebau wird von der Mehrheit der Befragten positiv bzw. neutral beurteilt: das WLAN ist auf der Baustelle der 2. Tunnelröhre Gotthard mit Ausnahme weniger „grauer Punkte“ verfügbar (Rossi, 2026), Internet ist im Tunnel vorhanden und stabil (Garcia, 2025; Neining, 2026; Rizzo, 2026); ein Stromausfall wurde lediglich einmal beobachtet und rasch behoben (Fernandes, 2026). Eine Einschränkung wird jedoch von zwei Befragten konsistent gemeldet: die Konnektivität unmittelbar an der frisch ausgebrochenen Ortsbrust ist instabil (Kiser, 2026; Lora, 2026). Zudem werden Schwierigkeiten bei der Anmeldung in der Trimble-Anwendung am mobilen Endgerät als operatives Hindernis benannt (Kiser, 2026). Diese Einschränkungen werden im weiteren Vorgehen nicht als Ausschlusskriterium für die Variantenbildung verwendet, sondern als Anwendungsfall für einen belastbaren Offline-Modus und für eine vereinfachte, fehlertolerante Authentifizierung berücksichtigt (vgl. Modul D5). Ergänzend werden die Luftqualität und die eingeschränkte Sicht direkt nach der Sprengung als Faktoren genannt, welche die Bedienbarkeit eines Tablets in den ersten Minuten nach jeder Etappe beeinträchtigen (Lesjak, 2025).

Bezüglich der Feldvalidierung sehen alle Befragten einen klaren Mehrwert in einer modellbasierten, checklistengestützten Prüfplanvalidierung. Gefordert werden die Integration von Checklisten in jede operative Phase (Lesjak, 2025), die vollständige Digitalisierung der täglichen Mikrokontrollprozesse, etwa der Bewehrungskontrolle (Rizzo, 2026), sowie die Möglichkeit, alle Elemente eines Betoniertaktes geschlossen einzusehen (Fernandes, 2026); eine deutliche Effizienzsteigerung ohne nennenswertes Risiko wird ebenfalls erwartet (Garcia, 2025; Kiser, 2026). Als Risiken werden einzig (a) das Vergessen einzelner Eingaben durch den Anwender, da der Prüfplan nicht ausschliesslich aus Checklisten, sondern teilweise aus zu beschreibenden Feldern besteht (Fernandes, 2026; Neining, 2026), und (b) die Authentifizierungssicherheit (Rizzo, 2026; Rossi, 2026) genannt; das Risiko eines Werkzeugausfalls wird als sehr gering eingestuft.

Die Reaktionszeit zwischen Datenerfassung und offizieller Verfügbarkeit für das technische Büro variiert stark: täglich in Störzonen (Rossi, 2026), wöchentlich für regelmässige Bauteilbereiche (Fernandes, 2026; Rizzo, 2026), bis hin zu mehreren Wochen oder Monaten in komplexeren Bauteilen oder bei personeller Unterbesetzung (Garcia, 2025; Lesjak, 2025; Neining, 2026). In Bauabschnitten mit bereits etablierten Digitalisierungsbausteinen ist die Reaktionszeit deutlich geringer; die Dokumentation beansprucht dort ungefähr zehn Prozent der Tagesarbeitszeit eines Bauführers, da der Prozess bereits über das Werkzeug Baubit teiloptimiert wurde (Kiser, 2026). Diese Bandbreite ist der zentrale quantitative Beleg für den Handlungsbedarf einer durchgängigen digitalen Prozesskette und wird in der Variantenbewertung als Referenzwert für die Latenzreduktion herangezogen.

Der Einfluss des menschlichen Faktors wird übereinstimmend als signifikant eingestuft (Garcia, 2025; Neining, 2026); er manifestiert sich als unmittelbarer Treiber von Zeitverlusten, da Tagesrapporte des Poliers nachträglich neu geschrieben werden müssen (Fernandes, 2026). Als zusätzliche Dimension des Faktors Mensch wird die Generationsabhängigkeit der digitalen Adoptionsfähigkeit genannt: jüngere Mitarbeitende erlernen den Umgang mit Trimble Connect deutlich schneller, was die Akzeptanz der Lösung mittel- und langfristig begünstigt (Kiser, 2026). Die Beziehungsdynamik zwischen Polier, Bauführer und Bauleitung wird – mit einer einzelnen abweichenden Einschätzung (Rizzo, 2026) – als prozesskritisch bewertet; gegenseitiges Vertrauen und eine partnerschaftliche Kommunikation gelten als Voraussetzung für reibungslose Freigabeprozesse und transparenten Informationsaustausch (Fernandes, 2026; Garcia, 2025; Kiser, 2026; Neining, 2026; Rossi, 2026).

Modul C – Strategischer und vertraglicher Fokus

In den Gesprächen mit den Verantwortlichen der Bauleitung, der Unternehmung sowie mit dem Bauherrn zeichnet sich die Bereitschaft ab, eine digitale Validierung – in Form eines Statuswechsels mit zugeordnetem, fälschungssicherem Login – als formalen Ersatz für die Unterschrift auf Papierprotokollen zu akzeptieren, sofern Versionssicherheit und eindeutige Authentifizierung der freigebenden Person gewährleistet sind (Baumann, 2026; Chedda, 2026; Neining, 2026). Als prioritärer KPI für den Erfolg des Pilotprojekts wird die Erhöhung der Rückverfolgbarkeit und Datentransparenz genannt; Effizienzsteigerungen werden als nachgelagerter, aber willkommener Effekt eingeordnet. Der Wunsch nach einem hohen Automatisierungsgrad wird konsequent durch die Forderung flankiert, die menschliche Kontrolle in den Schlüsselphasen der Freigabe zu erhalten – insbesondere zwischen Polier und Bauführer sowie zwischen Bauführer und Bauleitung.

Modul D – Technischer Schwerpunkt und Implementierung

Die Erkenntnisse aus Modul D speisen sich aus dem Fachgespräch mit den Trimble-/BuildingPoint-Schweiz-Experten am 5. März 2026 (Timic, 2026), aus den schriftlichen und mündlichen Anmerkungen der BIM-Verantwortlichen der Projektpartner (Cecchini, 2026; Sanfilippo, 2026; Verde, 2026) sowie aus den ergänzenden Stellungnahmen der Projektverfassenden (Metelka, 2026; Milojevic, 2026).

Hinsichtlich der konkreten Integration des Anwendungsfalls Qualitätskontrolle in Trimble Connect (D1) wurden folgende native Bausteine identifiziert: gespeicherte, etappenbezogene Ansichten (z. B. „Etappe 13 Kunstbauten“) als Ersatz für klassische Planblätter; Kollisionsprüfungen mit unmittelbarer BCF- bzw. ToDo-Erstellung inklusive Zuweisung und automatischer E-Mail-Benachrichtigung; konfigurierbare Datentabellen zur Filterung nach IFC-Klasse, Ausführungsstatus oder Kalenderwoche; Property-Sets als Container für ausführungsbezogene Eigenschaften (z. B. geplante und realisierte Kalenderwoche, Status); sowie Foto- und Annotationsfunktionen mit automatischer Protokoll-Generierung (Timic, 2026). Ergänzend wird die Bedeutung eines IFC-Modells unterstrichen, das nach eBKP-T strukturiert und mit AKS-Codes (Anlagen-Kennzeichnungssystem ASTRA) sowie über eine Parametermatrix vorbelegt ist; ebenso wird die Notwendigkeit eines geregelten Revisionsprozesses zwischen Bauherrenseite und Unternehmung zwischen „Roh-Bozza“ und finaler Freigabe für den Stollen herausgestellt (Sanfilippo, 2026).

Zur Vorverlagerung der Prüfplanung in die Planungsphase (D2) wird auf das Projekt ARVIA des Kantons Aargau (Planer KSL und Gähler & Partner) als Referenzfall einer modellbasierten Ausschreibung mit eBKP-T-konformer Attribuierung verwiesen; die ausführenden Unternehmen erhalten dort anstelle eines Devis das BIM-Modell als Grundlage der Kalkulation (Timic, 2026). Die Übertragung dieses Ansatzes auf die Querverbindungen wird als technisch machbar beurteilt, sofern die Anforderungen an Klassifikation, LOIN und Attributstruktur bereits in der Ausschreibung verankert werden; ein dem Anwendungsfall dedizierter LOIN sei Bestandteil des Vergabeverfahrens, jedes Objekt zwingend einer eBKP-T-Position zuzuordnen (Milojevic, 2026; Sanfilippo, 2026).

Die Automatisierung des Ausmasses (D3) ist über die Datentabellen-Funktion in Trimble Connect bereits ohne Eigenentwicklung möglich: die im Modell hinterlegten Mengen lassen sich nach Attributen filtern, als CSV bzw. Excel exportieren und unmittelbar als Grundlage einer (teil-)automatisierten Abrechnung verwenden (Timic, 2026). Eine durchgehende Automatisierung über die offene Trimble-API ist technisch möglich, erfordert jedoch zusätzlichen Entwicklungsaufwand, dessen Lizenz- und Implementierungskosten im Rahmen des Pilotprojekts nicht verhältnismässig erscheinen. Eine engere Zusammenarbeit mit dem CRB zur Verfeinerung der eBKP-T-Klassifikation wird als Voraussetzung für eine belastbare automatische Mengenermittlung benannt (Sanfilippo, 2026).

Die No-Code-Anpassung der Benutzeroberfläche (D4) ist innerhalb des Standardumfangs von Trimble Connect breit unterstützt: Property-Set-Bibliotheken, Datentabellen-Spalten, gespeicherte Ansichten, BCF-Vorlagen und Berechtigungsstrukturen lassen sich ohne dedizierte Softwareentwicklung konfigurieren (Timic, 2026). Nicht ohne API realisierbar sind hingegen native Boolean-Statusattribute auf IFC-Ebene (z. B. „geprüft = ja/nein“), tiefgreifende Validierungslogiken jenseits einer IDS-Prüfung (buildingSMART International, 2026) sowie die nahtlose Anbindung an externe Abrechnungs- oder ERP-Systeme.

Zur Datensynchronisation und zum Offline-Modus (D5) wurde die parallele Verfügbarkeit von Web-, Desktop- und Mobile-Anwendung dargelegt: Modelle können vor dem Einsatz im Tunnel heruntergeladen, offline annotiert und nach Wiederverbindung mit der CDE synchronisiert werden; die eingehende IFC bleibt dabei unveränderlich, ergänzende Eigenschaften werden in einem von der IFC getrennten Datencontainer der Connect-Umgebung abgelegt (Timic, 2026). Eine native Konfliktauflösung bei parallelen Offline-Bearbeitungen wurde nicht im Detail dargelegt und ist daher im Rahmen der prototypischen Umsetzung (Kapitel 7) zu validieren. Eine in den Fachgesprächen wiederholt betonte Einschränkung ist, dass Property-Sets in der Connect-Umgebung verbleiben und nicht in das ursprüngliche IFC zurückgeschrieben werden; die Persistenz qualitätsbezogener Eigenschaften ausserhalb von Trimble Connect ist somit nur über CSV-/Excel-Export oder über die API gewährleistet.

Synthese

Aus den Modulen A bis D ergeben sich vier wiederkehrende Erkenntnisse, die für die nachfolgende Ableitung der Evaluierungskriterien (Kapitel 5.3) und für die Variantenbildung (Kapitel 6) handlungsleitend sind:

1. Der dominante Engpass des Ist-Prozesses liegt in der Schnittstelle Phase 51 → Phase 52 sowie in der manuellen Transkription der Lieferschein-, Tagesrapport- und Prüfplandaten.
2. Die Reaktionszeit zwischen Datenerfassung an der Ortsbrust und offizieller Verfügbarkeit im Büro (Bandbreite: ein Tag bis mehrere Monate) ist der quantitative Hauptindikator für den Optimierungsbedarf.
3. Die operativen Voraussetzungen (Konnektivität, Endgeräteverfügbarkeit, Offline-Fähigkeit, Akzeptanz der Anwender) sind auf der Pilot-Baustelle gegeben; die isolierte gegenteilige Einschätzung wird als Begründung für die Notwendigkeit eines belastbaren Offline-Modus berücksichtigt.
4. Die technische Machbarkeit innerhalb der Trimble-Connect-Plattform ist für die Mehrzahl der abgeleiteten Anforderungen ohne Eigenentwicklung gegeben; weiterführende Automatisierungsschritte (Mengenextraktion, Statusrückschreibung) erfordern eine API-Anbindung und sind als optionaler Folgeschritt einzustufen.

5.3 Ableitung der Evaluierungskriterien

Die in Kapitel 5.2.3 dokumentierten Erkenntnisse aus den Fachgesprächen werden im vorliegenden Kapitel in eine objektivierte Anforderungs- und Bewertungsstruktur überführt. Die abgeleiteten Anforderungen (Kapitel 5.3.1) und Kategorien (Kapitel 5.3.2) orientieren sich an den Prinzipien des BIM-Informationsmanagements nach SN EN ISO 19650-1 (2018) und stellen die Rückführbarkeit der Variantenbewertung in Kapitel 6 auf die empirische Datenbasis sicher.

Auf diese Weise werden die in den Fachgesprächen erhobenen Erfahrungen der Befragten in nachprüfbar, kategorienbasierte Anforderungen an die Soll-Lösung überführt.

5.3.1 Definition technischer und operativer Anforderungen

Aus den in Kapitel 5.2.3 dokumentierten Erkenntnissen werden in diesem Abschnitt die konkreten Anforderungen an die Soll-Lösung abgeleitet. Die Anforderungen werden den Modulen des Fragenkatalogs zugeordnet, um die Rückführbarkeit auf die Quelle der Datenerhebung zu wahren.

Anforderungen aus Modul A (Prozessanalyse)

Die Lösung muss eine eindeutige Versionskontrolle der Ausführungsunterlagen gewährleisten, sodass alle Beteiligten – Bauleitung, Bauführung und Polier – auf einer gemeinsamen Datenbasis im Sinne der „Single Source of Truth“ nach SN EN ISO 19650-1 (2018) in Verbindung mit SN EN ISO 19650-2 (2018) arbeiten (Lesjak, 2025; Rizzo, 2026). Als kritische Schnittstelle ist der Übergang zwischen Ausführungsplanung (Phase 51) und Ausführung (Phase 52) zu adressieren: die Lösung muss diesen Übergang ohne Medienbruch und ohne doppelte Eingabe von Lieferschein-, Tagesrapport- und Protokolldaten unterstützen (Fernandes, 2026; Garcia, 2025; Neiningner, 2026).

Anforderungen aus Modul B (operative Realität)

Die Lösung muss die in Kapitel 5.2.3 dokumentierte Bandbreite der Reaktionszeit (von einem Tag bis zu mehreren Monaten) signifikant reduzieren, am Tablet bedienbar sein und über eine belastbare Offline-Fähigkeit für den Untertagebereich verfügen (Kiser, 2026; Lora, 2026). Die Authentifizierung der freigebenden Person muss eindeutig und fälschungssicher sein, um die in Modul B2 genannten Risiken einzugrenzen (Rizzo, 2026; Rossi, 2026). Geführte Checklisten und reduzierte Freitexteingaben dienen der systematischen Eingrenzung des menschlichen Faktors (Garcia, 2025; Neiningen, 2026); die operative Bedienbarkeit unmittelbar nach der Sprengung ist als Randbedingung zu berücksichtigen (Kiser, 2026; Lesjak, 2025).

Anforderungen aus Modul C (Strategie und Vertrag)

Die Lösung muss die digitale Validierung über einen Statuswechsel als formalen Ersatz für die Unterschrift auf Papierprotokollen abbilden und gleichzeitig die menschliche Kontrolle in den Schlüsselphasen der Freigabe erhalten. Sie muss in die bestehenden Vertrags- und Lieferantenstrukturen integrierbar sein, ohne kurzfristig eine Anpassung der übergeordneten Vertragswerke zu erzwingen, und die Rückverfolgbarkeit als prioritären Erfolgs-KPI dokumentieren (Chedda, 2026; Neiningen, 2026).

Anforderungen aus Modul D (technische Implementierung)

Die Lösung soll innerhalb der Trimble-Connect-Plattform realisierbar sein und sich primär auf nativ verfügbare Funktionen stützen (Property-Sets, Datentabellen, gespeicherte Ansichten, Kollisionsprüfung, BCF/ToDo, Foto-Annotation) (Timic, 2026). Eine Vorverlagerung der Prüfplanung in die Planungsphase – mit dem Ziel, den separaten Schritt Kontrollplan → Prüfplan zu eliminieren – ist als Zielzustand definiert, sofern die Anforderungen an Klassifikation ("Baukostenplan Tiefbau eBKP-T," 2026), AKS-Codes (ASTRA, 2025a, 2025b) und LOIN bereits in der Ausschreibung verankert werden (Metelka, 2026; Milojevic, 2026; Sanfilippo, 2026). Eine API-basierte (Trimble Connect, 2026a) Erweiterung wird als optionaler Folgeschritt eingestuft. Die Persistenz qualitätsbezogener Eigenschaften ausserhalb der Connect-Umgebung ist über CSV-/Excel-Export sicherzustellen, solange keine native Rückschreibung in das IFC besteht.

5.3.2 Kategorisierung für die Variantenbewertung

Um eine objektive und wissenschaftlich fundierte Auswahl der Zielvariante im Kapitel 6 zu ermöglichen, müssen die Erkenntnisse aus den Fachgesprächen (Module A bis D) in messbare Kategorien überführt werden. Diese Kategorisierung stellt sicher, dass die Lösung nicht nur technologisch fortschrittlich, sondern auch unter den realen Bedingungen der Gotthard-Baustelle (2. TG) operativ einsetzbar ist.

Definition der Bewertungskategorien

Die Auswahl der Kategorien basiert direkt auf den im Fragenkatalog identifizierten Problemfeldern:

- **Prozess-Effizienz und Latenz (Modul A & B):** Diese Kategorie bewertet, inwieweit eine Variante die Zeitspanne zwischen der Datenerfassung vor Ort und der Verfügbarkeit im technischen Büro (z. B. für das Ausmass) verkürzt. Ein zentraler Messwert ist hier die Reduktion von Korrekturschleifen.
- **Datenintegrität und Medienbrüche (Modul A & D):** Hier wird beurteilt, ob die Variante manuelle Übertragungsfehler (Faktor Mensch) eliminiert. Das Ziel ist eine "Maschinenlesbarkeit" der Daten, um die von Andrej und Marvin kritisierten Redundanzen zu vermeiden.
- **Technische Machbarkeit und No-Code-Integration (Modul D):** Diese Kategorie prüft, ob die Lösung innerhalb von Trimble Connect ohne aufwendige Softwareentwicklung (API) umsetzbar ist. Dies ist entscheidend für die schnelle Implementierung in einem Pilotprojekt.
- **Vertragliche und organisatorische Akzeptanz (Modul C):** Es wird bewertet, ob die Variante mit den bestehenden Serviceverträgen und der Bereitschaft des Bauherrn zur digitalen Validierung (Statuswechsel statt Unterschrift) vereinbar ist.

Messmethode der Bewertung

Die Bewertung erfolgt über eine qualitative Nutzwertanalyse in drei Stufen:

- **Niedrig (1):** Die Variante erfüllt die Anforderungen der Experten nur unzureichend oder behält bestehende Ineffizienzen bei.
- **Mittel (2):** Die Variante bietet punktuelle Verbesserungen, erfordert aber weiterhin manuelle Zwischenschritte.
- **Hoch (3):** Die Variante löst die identifizierten Herausforderungen (z. B. Medienbrüche) vollständig und ist sofort einsatzbereit.

Berücksichtigung externer Projektfaktoren

Die Variantenbewertung findet unter strikter Berücksichtigung externer Rahmenbedingungen statt, welche den technologischen Handlungsspielraum des Projekts definieren:

- **Begrenzter Umfang des Pilotprojekts:** Da sich die Untersuchung auf zwei spezifische Querverbindungen (QV) konzentriert, muss die Lösung einen unmittelbaren operativen Mehrwert generieren, ohne eine vollständige Reorganisation der globalen Tunnelvortriebsprozesse vorauszusetzen.
- **Traditionelle Lieferanten- und Dienstleistungsverträge:** Die bestehenden Verträge mit Materiallieferanten (z. B. für Spritzbeton oder Ankermaterial) und externen Dienstleistern sind für das gesamte Grossprojekt in konventioneller, meist papierbasierter Form fixiert. Die digitale Lösung muss daher als Schnittstelle fungieren, die diese traditionell erfassten Daten digital aufnimmt, ohne eine kurzfristige Anpassung der übergeordneten Vertragswerke zu erzwingen.
- **Operative Realität der Baustelle:** Die Bewertung priorisiert Lösungen, die sich nahtlos in den laufenden Betrieb integrieren lassen. Da das Pilotprojekt parallel zum konventionellen Hauptvortrieb verläuft, darf die digitale Qualitätssicherung die etablierten Lieferketten und die Leistungsbestätigungen der Projektpartner nicht behindern.

6 Lösungsentwicklung

In diesem Kapitel werden drei digitale Lösungsszenarien für die Qualitätssicherung der Querverbindungen (QV) entwickelt und miteinander verglichen. Ziel ist es, den in Kapitel 4 analysierten analogen beziehungsweise hybriden Ist-Zustand in einen praxistauglichen digitalen Soll-Zustand zu überführen.

Die Lösungsentwicklung stützt sich auf drei Grundlagen: erstens auf die Analyse des bestehenden Prozesses und seiner Schwachstellen, zweitens auf die Erkenntnisse aus den Fachgesprächen und drittens auf die Anforderungen aus dem Forschungsstand sowie den Normen SN EN ISO 19650-2 (2018) und SN EN ISO 19650-4 (2022). Im Zentrum steht die Frage, wie die qualitätsrelevanten Informationen aus dem Kontrollplan so in ein Common Data Environment (CDE) integriert werden können, dass Medienbrüche reduziert, Daten konsistenter erfasst und Prüfprozesse besser nachvollziehbar werden.

Aufbauend auf diesen Grundlagen werden in Kapitel 6.1 drei Varianten mit unterschiedlichem Digitalisierungsgrad entwickelt. Diese reichen von einer dokumentenbasierten Lösung mit zentraler Ablage bis hin zu einer weitgehend automatisierten Prozessintegration. Die Varianten werden anschliessend hinsichtlich ihrer Eignung für den vorliegenden Pilotkontext bewertet.

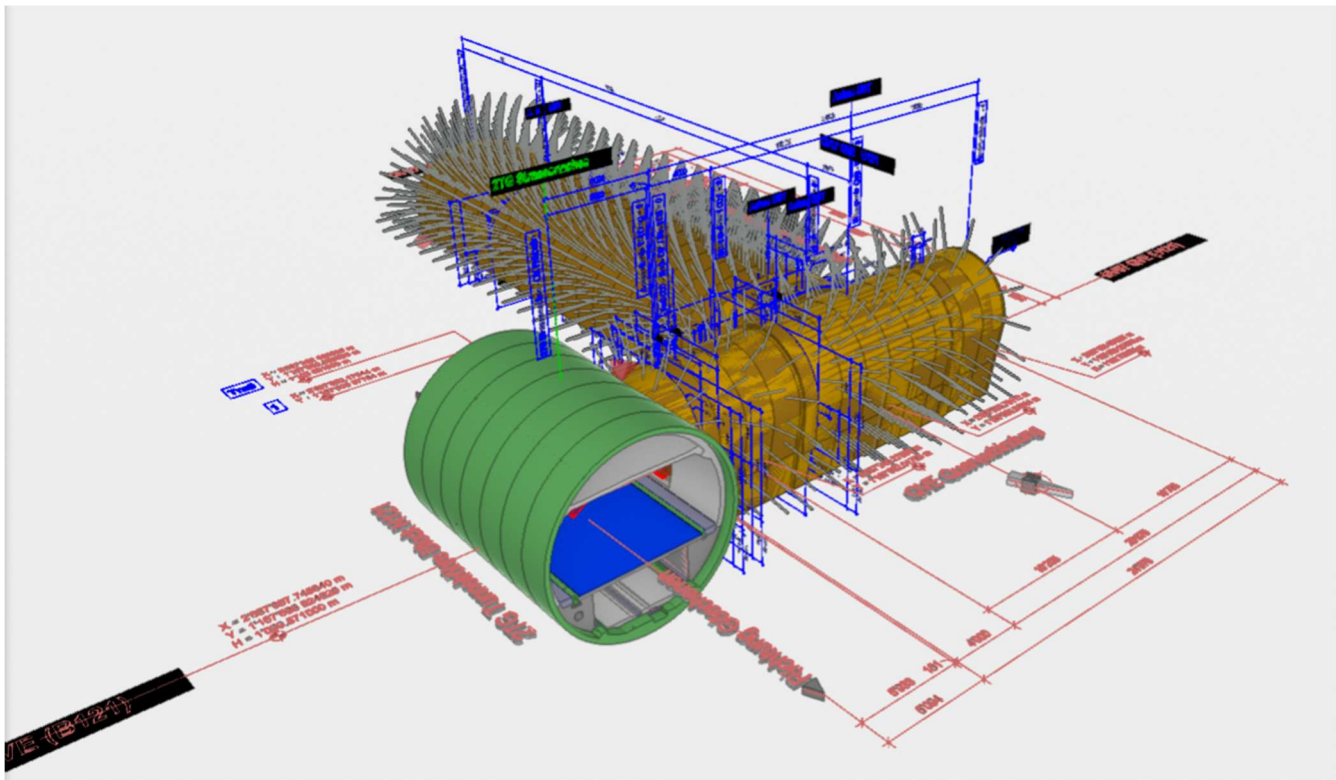


Abbildung 15, Ausführungsmodell der Querverbindung als Grundlage der Variantenbildung. Eigene Darstellung in Trimble Connect.

Das Ausführungsmodell der Querverbindung bildet die gemeinsame Grundlage aller drei Varianten. Je nach Variante dient es entweder als räumliche Orientierung, als Träger strukturierter Qualitätsinformationen oder als Ausgangspunkt für automatisierte Folgeprozesse.

6.1 Variantenbildung

Die Variantenbildung folgt einem stufenweisen Ansatz. Entwickelt wurden drei Lösungsszenarien, die auf Trimble Connect als CDE aufbauen, sich jedoch hinsichtlich Datenstruktur, Prozessintegration und Automatisierungsgrad deutlich unterscheiden. Ziel dieser Differenzierung ist es, nicht nur die technisch mögliche, sondern vor allem die für das Projektumfeld zweckmässigste Lösung zu identifizieren.

Variante 1 fokussiert auf die zentrale Ablage und modellbezogene Verknüpfung von Dokumenten. Variante 2 überführt qualitätsrelevante Informationen direkt in modellbasierte Property Sets (P-Sets) und ermöglicht damit eine strukturierte Datenerfassung am Objekt. Variante 3 erweitert diesen Ansatz um automatisierte Schnittstellen zu nachgelagerten Prozessen und Systemen.

Abbildung 15Abbildung 16 zeigt die drei Varianten in vereinfachter Form als Prozesslogik. Sichtbar wird dabei der zunehmende Digitalisierungsgrad: von der dokumentenbasierten Verknüpfung in Variante 1 über die modellbasierte Datenerfassung in Variante 2 bis hin zur automatisierten Prozessweitergabe in Variante 3.

Abbildung 17 ergänzt diese Darstellung um eine konzeptionelle Einordnung der Varianten. Während Variante 1 primär auf die Verknüpfung und Auffindbarkeit von Dokumenten abzielt, verschiebt sich der Schwerpunkt in Variante 2 auf die strukturierte Datenerfassung im Modell. Variante 3 baut darauf auf und erweitert das Modell um die Anbindung automatisierter Folgeprozesse. Gleichzeitig steigt von Variante 1 zu Variante 3 der Implementierungsaufwand.

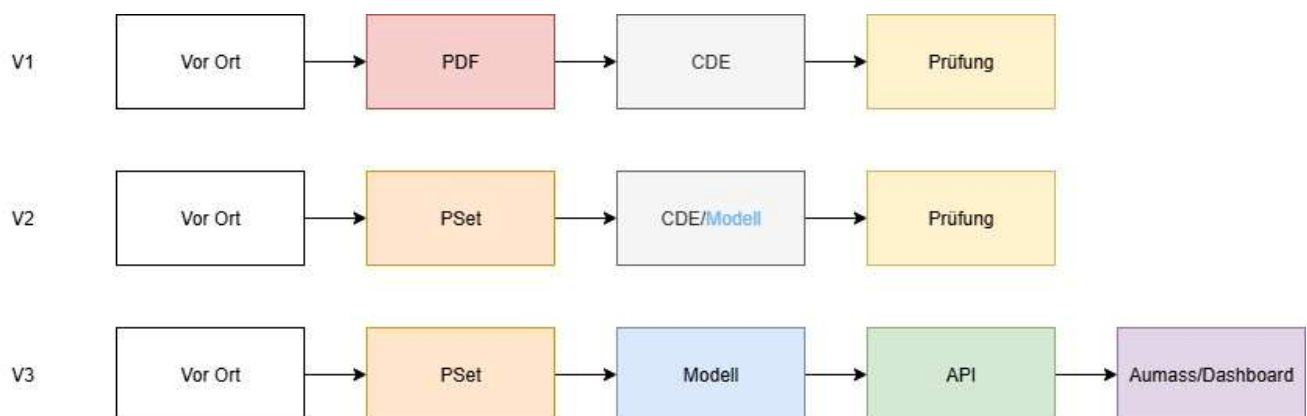


Abbildung 16, Vereinfachter Prozess der drei Varianten

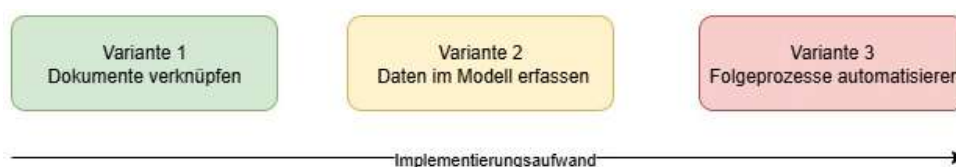


Abbildung 17, Einordnung der Varianten nach funktionalem Schwerpunkt und Implementierungsaufwand

Die nachfolgenden Unterkapitel beschreiben die drei Varianten jeweils hinsichtlich Konzepts, Prozessintegration sowie ihrer Stärken und Schwächen. Zur Konkretisierung der Varianten wurden ergänzend Systemarchitekturen ausgearbeitet. Diese zeigen, wie qualitätsrelevante Informationen in den einzelnen Varianten erfasst, gespeichert, validiert und weiterverwendet werden. Damit dienen die Architekturen nicht nur als technische Darstellung, sondern als Grundlage für die Bewertung der Varianten in Kapitel 6.2.

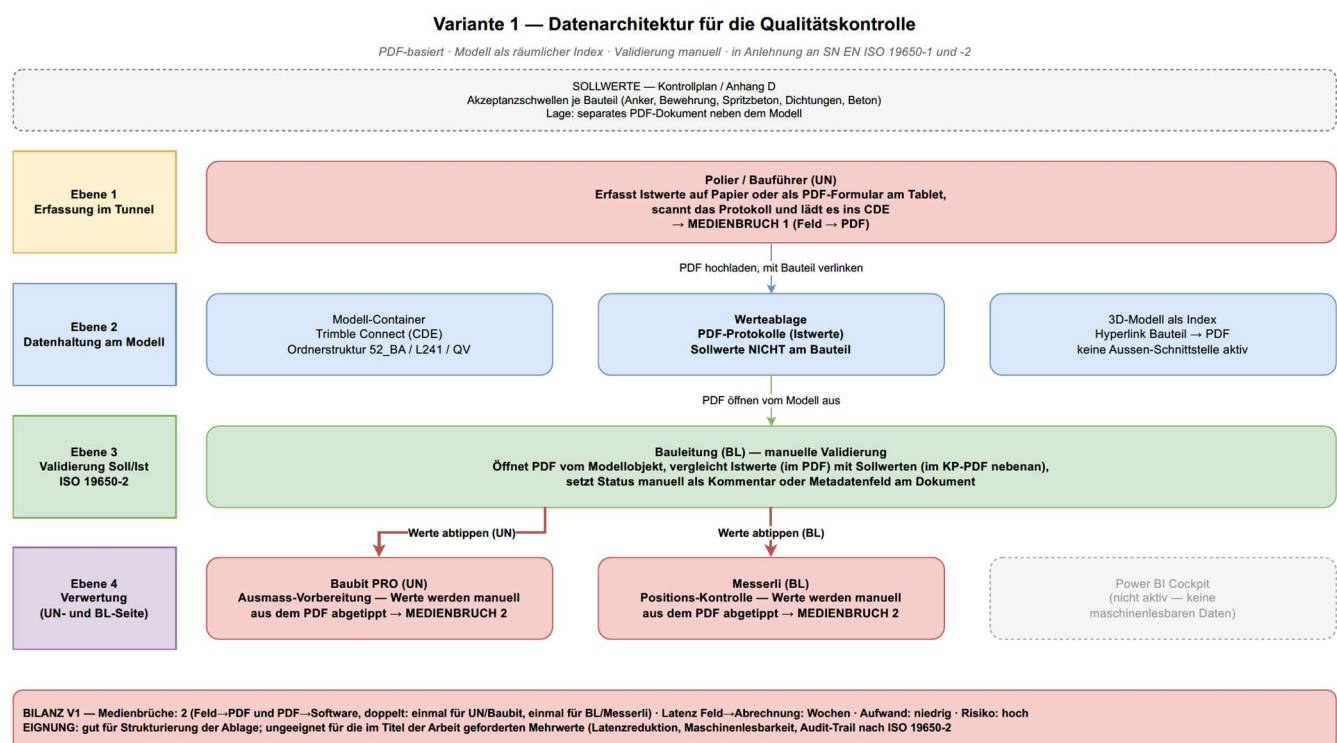
Alle drei Architekturen (siehe Anhang F) folgen derselben Grundstruktur. Sie unterscheiden zwischen der Erfassung im Tunnel, der Datenhaltung am Modell, der Validierung durch die Bauleitung sowie der weiteren Verwertung der Daten auf Unternehmer- und Bauleitungsseite. Dadurch können die Varianten direkt miteinander verglichen werden.

6.1.1 Variante 1: Trimble Connect Basic (Digitales Dokumentenmanagement)

Konzept

Die erste Variante basiert auf der Implementierung von Trimble Connect als primäres Common Data Environment (CDE) gemäss den Richtlinien der SN EN ISO 19650-1 (2018). In diesem Szenario wird die Plattform dazu genutzt, die herkömmliche, oft fragmentierte Informationsablage (wie die von Experten kritisierte SharePoint-Struktur) durch eine zentrale, cloudbasierte „Single Source of Truth“ zu ersetzen. Der Fokus liegt hierbei auf der strukturierten Verwaltung von Dokumenten, Plänen und Protokollen in digitaler Form.

Qualitätsdokumente wie Aushubprotokolle, Materialzertifikate oder Bewehrungsprotokolle bleiben im PDF-Format erhalten, werden jedoch direkt mit den entsprechenden 3D-Objekten oder den Laufmetern des Ausführungsmodells verlinkt. Der Fokus liegt auf der räumlichen Auffindbarkeit der Daten: Der Benutzer navigiert im Modell und findet die relevante Dokumentation, indem er auf das Objekt klickt oder den Bereich „Explorer“ nutzt, d. h. die Ordnerstruktur, in der die Dateien gespeichert sind.



Lesart: Vier Ebenen — von oben (Sollwerte) nach unten (Verwertung). Pfeile zeigen den Datenweg. Rote Bausteine = Medienbrüche (manuelle Übertragung).
 Grau-gestrichelte Bausteine = Funktionen, die in dieser Variante nicht aktiv sind. Software-Rollen: Baubit PRO auf UN-Seite, Messerli auf BL-Seite.

Abbildung 18, Systemarchitektur der Variante 1, Siehe im grossen Anhang F

Bei Variante 1 bleiben die Qualitätsinformationen im Wesentlichen dokumentenbasiert. Die Istwerte werden vor Ort erfasst, als PDF im CDE abgelegt und anschliessend durch die Bauleitung manuell geprüft. Das Modell dient dabei primär als räumlicher Index. Die eigentlichen Prüfdaten bleiben jedoch in den Dokumenten eingeschlossen und müssen für Folgeprozesse, beispielsweise das Ausmass, erneut übertragen werden.

Prozessintegration: Technische und organisatorische Schnittstellen

Die erfolgreiche Umsetzung dieser Variante erfordert die Präzisierung der Schnittstellen, um eine konsistente digitale Qualitätssicherung zu gewährleisten:

- **Technische Schnittstellen:** Der Datentransfer erfolgt durch das Hochladen von PDF-Dateien in Trimble Connect und deren anschliessende Verknüpfung mit den Objekten des Modells.
- **Organisatorische Schnittstellen (Rollen und Verantwortlichkeiten):** Die Rollenverteilung ist strikt definiert: Die Unternehmung (UN) ist verantwortlich für die zeitnahe Erstellung der PDF-Protokolle im Feld und deren korrekte Verknüpfung im Ausführungsmodell. Die Bauleitung (BL) übernimmt die Rolle des Prüfers, der die verknüpften Dokumente direkt am Modellobjekt aufruft, validiert und den Status (z. B. Abgenommen) im System setzt.
- **Datentransfer:** Der Informationsfluss folgt einem klaren Pfad: Erfassung vor Ort (digital/analogue) → Umwandlung in PDF → Verknüpfung mit dem Modellobjekt → Validierung durch die BL.

Stärken

- **Single Source of Truth:** Der Zugriff über das Ausführungsmodell stellt sicher, dass alle Beteiligten mit der aktuellen Version arbeiten, was die von Luigi identifizierten Unklarheiten bei den Plänen beseitigt.
- **Geringe Implementierungshürden:** Da die operativen Teams (Polier, Bauführer) weiterhin mit den vertrauten PDF-Protokollen arbeiten, ist die Akzeptanz hoch und der Schulungsaufwand gering.
- **Ortsbezogene Dokumentation:** Die mühsame Suche in komplizierten Ordnerstrukturen entfällt, da die Dokumente direkt dort zu finden sind, wo sie im Bauwerk hingehören.

Schwächen

- **Mangelnde Datendichte:** Da die Informationen innerhalb der PDFs „gefangen“ und nicht maschinenlesbar sind, können Schwellenwerte aus dem Kontrollplan nicht automatisch geprüft werden.
- **Manueller Aufwand im Büro:** Für Prozesse wie das Ausmass müssen die Daten weiterhin manuell aus den PDFs extrahiert werden, was den von Jonathan beschriebenen Zeitversatz (Latenz) kaum reduziert.
- **Disziplinabhängigkeit:** Die Qualität der Datenbank hängt stark von der Sorgfalt der UN beim Verknüpfen der Dokumente ab (Faktor Mensch).

Eignung für die Zielsetzung

Variante 1 ist hervorragend geeignet, um die organisatorischen Schnittstellen zu klären und eine strukturierte, modellbasierte Archivierung einzuführen. Sie erfüllt die Anforderungen an eine vollständige Dokumentation gemäss Kontrollplan, bietet jedoch nur begrenzte Mehrwerte bei der Prozessautomatisierung und der Reduktion von manuellen Redundanzen.

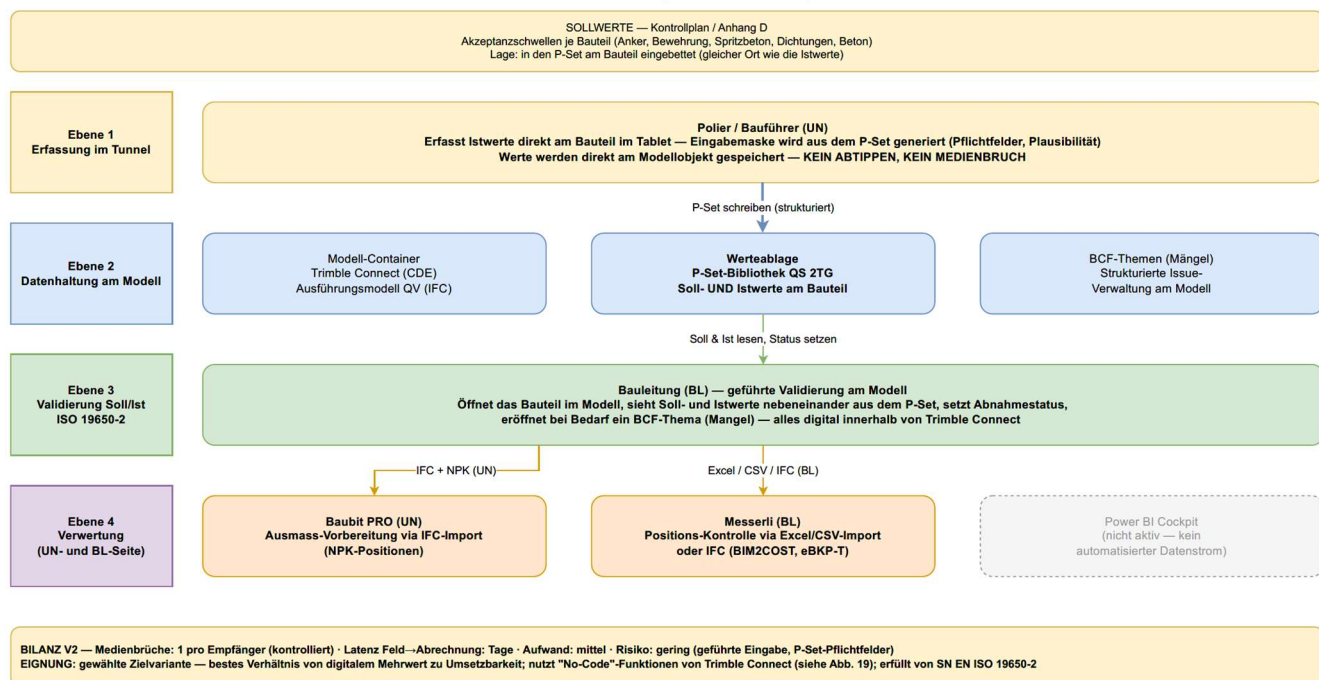
6.1.2 Variante 2: Trimble Connect Pro (Einführung des P-Set)

Konzept

Das Konzept der Variante 2 basiert auf der Transformation des Prüfprozesses von einer dokumenten-zentrierten zu einer rein modellzentrierten Arbeitsweise. Das Ausführungsmodell der Querverbindungen dient hierbei nicht nur der Orientierung, sondern als aktive grafische Datenbank. Im Gegensatz zu Variante 1 werden Informationen nicht mehr in externen PDF-Dokumenten „gefangen“, sondern als semantische Attribute (Property Sets) direkt in die Modellobjekte geschrieben. Jedes Bauteil im Modell ist mit den spezifischen Akzeptanzschwellenwerten aus dem selektierten Kontrollplan (Anhang D) verknüpft. Dies ermöglicht eine geführte Prüfung vor Ort, bei der die Soll-Werte direkt am digitalen Objekt aufgerufen und die Ist-Werte (z. B. Abnahmedatum, Prüfergebnis) sofort im Modell gespeichert werden.

Variante 2 — Datenarchitektur für die Qualitätskontrolle (gewählte Zielvariante)

P-Set am Bauteil · Soll und Ist nebeneinander · Validierung am Modell · in Anlehnung an SN EN ISO 19650-1 und -2



*Lesart: Identische 4-Ebenen-Struktur wie V1 und V3 — direkt vergleichbar. Oranger Baustein = ein einziger Medienbruch je Empfänger (kontrollierter Export).
Grau-gestrichelter Baustein = Funktion in dieser Variante nicht aktiv. Software-Rollen: Baubit PRO auf UN-Seite, Messerli auf BL-Seite.*

Abbildung 19, Systemarchitektur der Variante 2, Siehe im grossen Anhang F

In Variante 2 werden die qualitätsrelevanten Sollwerte aus dem Kontrollplan entnommen und über Property Sets am Modellobjekt eingefügt und mit den vor Ort erfassten Istwerten ergänzt. Damit liegen Soll- und Ist-Informationen am gleichen digitalen Ort vor. Die Bauleitung kann die Angaben direkt am Modell prüfen, den Status setzen und bei Abweichungen ein BCF-Thema oder eine entsprechende Statusinformation verwenden. Gegenüber Variante 1 wird der Medienbruch deutlich reduziert, ohne dass bereits eine komplexe API-Integration erforderlich ist.

Prozessintegration: Technische und organisatorische Schnittstellen

Die Prozessintegration erfordert eine präzise Abstimmung der Arbeitsabläufe zwischen den Beteiligten, um die Datenintegrität zu gewährleisten:

- **Technische Schnittstellen:** Der Datenaustausch erfolgt über Status-Attribute oder das BIM Collaboration Format (BCF) innerhalb von Trimble Connect. Dies eliminiert Medienbrüche vollständig, da die im Tunnel erfassten Daten (z. B. Ankeranzahl in Phase 1 oder Bewehrungsabnahme in Phase 2) ohne manuelle Transkription sofort im zentralen Modell für das technische Büro (UN und BL) verfügbar sind.
- **Organisatorische Schnittstellen (Rollen und Verantwortlichkeiten):** Die Rollenverteilung folgt einem digitalen Workflow. Die Unternehmung (UN) bereitet die Abnahme vor, indem sie den Status des Objekts im Modell auf „Bereit zur Prüfung“ setzt. Die Bauleitung (BL) erhält eine automatische Benachrichtigung, führt die Validierung vor Ort durch und setzt den finalen Status auf „Abgenommen“ oder „Mangelhaft“.
- **Datentransfer:** Digitale Erfassung am Objekt → Direkte Attributschreibung im Modell → Echtzeit-Synchronisation mit dem CDE → Validierung durch die BL.

Stärken

- **Vermeidung des menschlichen Faktors:** Durch standardisierte Eingabemasken am Modell-objekt werden Übertragungsfehler, wie sie von Andrej und Marvin kritisiert wurden, drastisch reduziert.
- **Echtzeit-Monitoring:** Der Projektfortschritt ist jederzeit visuell im Modell ablesbar (z. B. durch Farbkodierung der abgenommenen Abschnitte), was die Transparenz und das gegenseitige Vertrauen stärkt (Aspekt B5).
- **Kontextbezogene Prüfung:** Prüfer müssen nicht im 75-seitigen Kontrollplan suchen; die relevanten Kriterien werden automatisch zum angeklickten Bauteil angezeigt, was die Effizienz steigert.

Schwächen

- **Hardware- und Netzhängigkeit:** Die Qualität des Workflows hängt stark von der Robustheit der mobilen Endgeräte und der Synchronisationsfähigkeit unter den schwierigen Bedingungen im Tunnel ab.
- **Keine vollständige kaufmännische Automation:** Obwohl die Daten digital im Modell vorliegen, müssen die Mengen für das Ausmass weiterhin manuell exportiert und in Drittsysteme übertragen werden, da keine direkte Systemkopplung besteht.

Eignung für die Zielsetzung

Variante 2 ist in hohem Masse geeignet, die im Titel der Arbeit geforderten „Chancen und Mehrwerte“ zu realisieren. Sie löst das Kernproblem der Medienbrüche und der unübersichtlichen Dokumentenablage. Da sie die Anforderungen des Kontrollplans direkt in den Ausführungsprozess integriert, bietet sie ein optimales Verhältnis zwischen technologischem Fortschritt und praktischer Umsetzbarkeit für das Personal vor Ort.

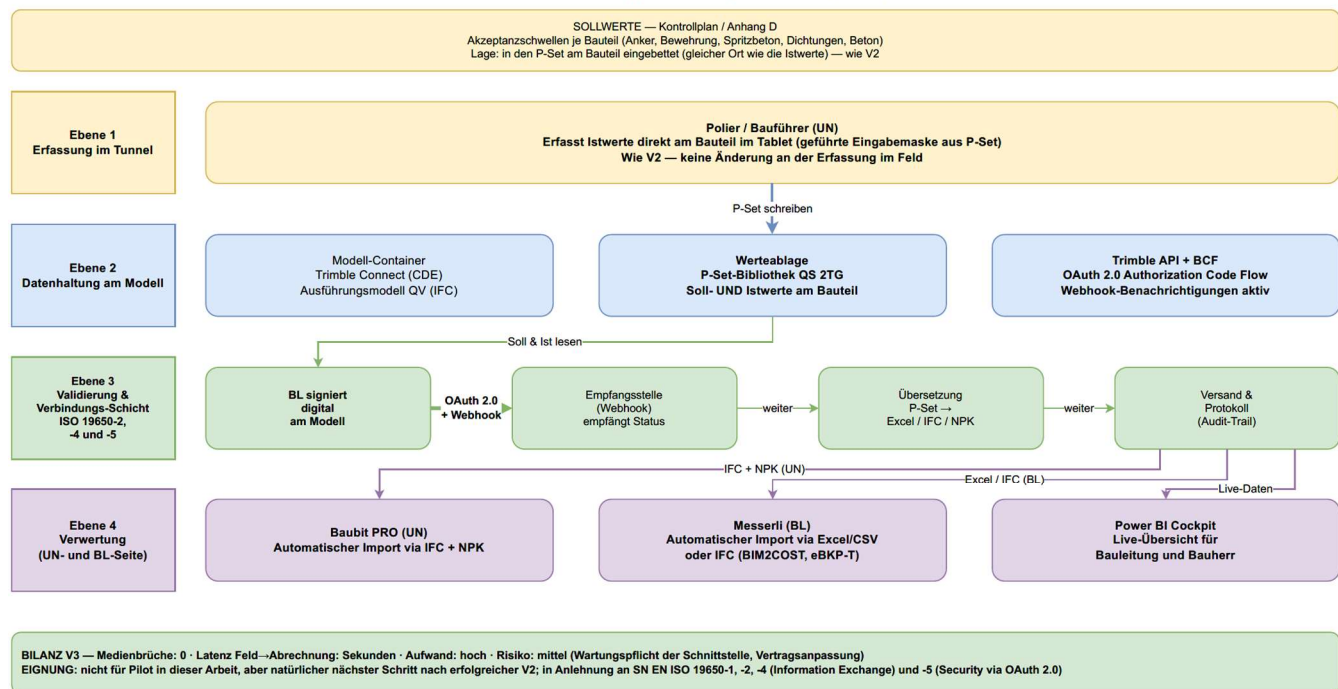
6.1.3 Variante 3: Prozessautomatisierung via API-Integration (Full Digital Workflow)

Konzept

Das Konzept der Variante 3 sieht eine vollständige digitale Durchgängigkeit vor, bei der Trimble Connect über Programmierschnittstellen (API) mit externen Datenbanken und Kalkulationsprogrammen verknüpft wird. In diesem Szenario ist das Ausführungsmodell nicht nur eine Datenbank für Attribute (wie in V2), sondern ein aktiver Trigger für betriebliche Folgeprozesse. Die Informationen fließen automatisch vom Ursprungsort im Tunnel bis zu den Übersichtstabellen für die Endabrechnung (Messung), ohne dass ein manueller Eingriff zur Datenübertragung erforderlich ist.

Variante 3 — Datenarchitektur für die Qualitätskontrolle (API-basierter Zukunftsausblick)

P-Set + Trimble API - automatische Weiterleitung an Baubit (UN) und Messerli (BL) - in Anlehnung an SN EN ISO 19650-1, -2, -4 und -5



Lesart: Identische 4-Ebenen-Struktur wie V1 und V2 — direkt vergleichbar. Ebene 3 hat zusätzlich drei Bausteine, die die Verbindungsschicht zeigen.
Software-Rollen: Baubit PRO auf UN-Seite (offiziell auf Trimble-Integrationsliste), Messerli auf BL-Seite (via IFC und Excel/CSV).

Abbildung 20, Systemarchitektur der Variante 2, Siehe im grossen Anhang F

Variante 3 erweitert die Architektur von Variante 2 um eine automatisierte Schnittstellenebene. Die Validierung am Modell löst über API, Webhooks und definierte Datenformate automatisierte Folgeprozesse aus. Dadurch können Daten an Ausmasssysteme, Kontrolltabellen oder Dashboards weitergegeben werden, ohne dass eine manuelle Übertragung erforderlich ist. Diese Variante reduziert Medienbrüche und Latenzzeiten am stärksten, setzt jedoch eine deutlich höhere technische, organisatorische und vertragliche Reife voraus.

Prozessintegration

Technische und organisatorische Schnittstellen Diese Variante erfordert die höchste Präzision bei der Definition der Schnittstellen, da Systeme automatisiert miteinander interagieren:

- **Technische Schnittstellen:** Implementierung von Schnittstellen über APIs und JSON-Formate, die bei einer Statusänderung im Modell (z. B. Von der Bauleitung abgenommen) die relevanten Mengen und Qualitäten automatisch an die Datenbank oder die Vermessungssoftware übermitteln. Parallel dazu können Live-Dashboards (z. B. Power BI) gespeist werden, die den Projektfortschritt in Echtzeit visualisieren.
- **Organisatorische Schnittstellen (Rollen):** Die Verantwortung verlagert sich stark in Richtung Datenmanagement. Die Bauleitung (BL) fungiert als finale Instanz, deren digitale Unterschrift (Freigabe im Modell) den buchhalterischen Prozess rechtssicher auslöst. Die IT-Abteilungen der Beteiligten rücken als strategische Partner für die Wartung der Schnittstellen in den Fokus.
- **Datentransfer:** Erfassung via digitale Maske → Validierung am Modellobjekt → Automatisierter Datenexport via API → Sofortige Verfügbarkeit für das Ausmass.

Stärken

- **Maximale Effizienz:** Der von Jonathan kritisierte Zeitversatz (Latenz) beim Ausmass wird von Wochen auf nahezu null reduziert.
- **Eliminierung des Faktors Mensch:** Manuelle Übertragungsfehler und Tippfehler bei der Dateneingabe im Büro werden vollständig ausgeschlossen.
- **Rechtssicherheit und Transparenz:** Jede Statusänderung ist im System mit einem unveränderlichen Zeitstempel und Benutzerprofil hinterlegt, was die Revisionssicherheit maximiert.

Schwächen

- **Hohe Komplexität und Kosten:** Die Entwicklung und Wartung individueller API-Schnittstellen erfordert spezialisiertes Fachpersonal und initiale Investitionen.
- **Systemabhängigkeit:** Ein Ausfall der digitalen Infrastruktur oder Inkompatibilitäten bei Software-Updates können den gesamten Abrechnungsprozess blockieren.

Eignung für die Zielsetzung

Variante 3 ist die einzige Lösung, die das volle Potenzial der Digitalisierung ausschöpft, um die im Titel geforderten "Mehrwerte" im Bereich der Zeitersparnis und Fehlerreduktion zu maximieren. Sie ist besonders geeignet für komplexe Grossprojekte wie den Gotthard-Tunnel, wo die schiere Menge an Prüfdaten eine manuelle Bearbeitung zunehmend ineffizient macht.

6.1.4 Übersicht

Die drei Varianten unterscheiden sich vor allem im Grad der Datenstrukturierung und in der Tiefe der Prozessintegration. Während Variante 1 die bestehende dokumentenbasierte Arbeitsweise in eine zentralere digitale Ablage überführt, erweitert Variante 2 den Prozess um eine modellbasierte Erfassung qualitätsrelevanter Informationen. Variante 3 geht darüber hinaus und sieht eine automatisierte Weitergabe der erfassten Daten an nachgelagerte Systeme vor.

Damit steigt von Variante 1 zu Variante 3 nicht nur der potenzielle digitale Mehrwert, sondern auch der technische, organisatorische und vertragliche Implementierungsaufwand. Die folgende Tabelle fasst die wesentlichen Unterschiede zusammen und bildet die Grundlage für die anschließende Bewertung der Varianten.

Tabelle 7, Übersicht über die Varianten

Merkmal	Variante 1 (Dokumente verknüpfen)	Variante 2 (Daten im Modell erfassen)	Variante 3 (Folgeprozesse automatisieren)
Grundprinzip	Zentrale Ablage und Verknüpfung qualitätsrelevanter Dokumente	Modellbasierte Erfassung qualitätsrelevanter Informationen über P-Sets	Automatisierte Weitergabe strukturierter Qualitätsdaten an Folgeprozesse
Primäre Datenform	PDF-Dokumente (verlinkt)	Strukturierte P-Sets	Automatisierte API-Daten
Maschinenlesbarkeit	Nein	Ja	Ja
Rolle des Modells	Orientierung und räumlicher Index	Träger qualitätsrelevanter Informationen	Prozessauslöser und Schnittstelle zu weiteren Systemen
Einbindung Kontrollplan	Über Dokumente und Nachweise	Über ausgewählte digitalisierte Prüfpunkte	Über strukturierte Prüfdaten und automatisierte Weitergabe
Interaktionsmethode	Modell als Index (Link)	Modell als Eingabemaske	Modell als Prozess-Trigger
Technische Basis	Trimble Connect Explorer / Dokumentenstruktur	Trimble Connect mit Eigenschaftsgruppen / P-Sets	Trimble Connect mit API-Integration und externen Systemen
Merkmal	Variante 1 (Basic)	Variante 2 (Pro/P-Sets)	Variante 3 (API)

6.2 Entscheidung Variante

Die Bewertung erfolgt qualitativ anhand der in Kapitel 5.3.2 definierten Kriterien. Die Einstufung in niedrig, mittel und hoch basiert auf dem Abgleich der Varianten mit den Anforderungen aus den Fachgesprächen sowie den technischen und organisatorischen Rahmenbedingungen des Pilotprojekts. Die Gesamtbewertung ist keine rein rechnerische Summe, sondern eine qualitative Einordnung. Besonders berücksichtigt wurden die Reduktion von Medienbrüchen, die technische Machbarkeit, die Minderung manueller Übertragungsfehler und die vertragliche Akzeptanz im laufenden Projekt.

Tabelle 8, Bewertung der Varianten

Evaluierungskriterien aus Fachgesprächen	V1	V2	V3
Lösung der Medienbrüche (Frage A1/A2): Ersetzung des manuellen Übertragens von PDF-Scans in Kontrolltabellen.	Niedrig	Hoch	Hoch
Informationsaktualität (Frage A1): Zentrale Datenbank für Planstände und Versionierung.	Hoch	Hoch	Hoch
Reduktion der Latenz (Frage B3): Beschleunigung des Ausmass-Prozesses zwischen Feld und Büro.	Niedrig	Mittel	Hoch
Technische Machbarkeit (Frage D4): Umsetzung ohne dedizierte Softwareentwicklung (No-Code Integration).	Hoch	Hoch	Niedrig
Minderung des Faktors Mensch (Frage B4): Reduktion von Übertragungsfehlern und subjektiver Auslegung.	Niedrig	Hoch	Hoch
Vertragliche Akzeptanz (Frage C1/C3): Bereitschaft zur digitalen Validierung im Rahmen bestehender Strukturen.	Hoch	Hoch	Niedrig
GESAMTBEWERTUNG (QUALITATIV)	Mittel	Hoch	Mittel

6.2.1 Begründung der Entscheidung

Die Wahl fällt auf die Variante 2: Modellbasierte Qualitätssicherung und Datenerfassung via P-Sets. Die Entscheidung ist das Ergebnis einer Abwägung zwischen dem digitalen Mehrwert und der realen Umsetzbarkeit im laufenden Grossprojekt:

- **Vorteil gegenüber V1 (Dokumentenbasiert):** Während V1 nur das Problem der Ablage löst, macht V2 die Daten maschinenlesbar. Da die Informationen direkt in die Property Sets (P-Sets) geschrieben werden, entfällt das von den Experten kritisierte manuelle Abtippen von PDF-Dokumenten (Medienbrüche).
- **Vorteil gegenüber V3 (API-Basiert):** V3 bietet zwar die höchste Automatisierung, ist jedoch aufgrund der starren Dienstleistungsverträge und der hohen Komplexität für ein Pilotprojekt aktuell nicht praktikabel. V2 nutzt hingegen die "No-Code"-Potenziale von Trimble Connect.
- **Fokus auf den Pilot-Test:** Da im Rahmen dieser Arbeit ein Test an der Fallstudie durchgeführt wird, bietet V2 die stabilste Grundlage. Sie ermöglicht eine geführte Dateneingabe direkt am Modell, die den „menschlichen Faktor“ reduziert, ohne die bestehende Systemarchitektur zu überfordern.

Die Variante 2 wird daher als Zielvariante für die prototypische Umsetzung im nächsten Kapitel gewählt.

7 Fallstudie

Mit Kapitel 7 wechselt die Arbeit von der konzeptionellen Variantenbildung zur anwendungsorientierten Erprobung. Die in Kapitel 6 ausgewählte Zielvariante, die modellbasierte Qualitätssicherung über Property Sets in Trimble Connect Pro, wird auf einen konkreten Bauteilausschnitt des Projekts angewendet. Ziel ist es, die praktische Tragfähigkeit der Variante zu prüfen und eine belastbare Grundlage für die späteren Handlungsempfehlungen zu schaffen.

Untersuchungsgegenstand ist der Innenausbau der Querverbindung QV04. Die Wahl dieses Anwendungsfalls ergibt sich aus zwei Gründen. Erstens markiert QV04 den nächsten produktiven Bauabschnitt im Bearbeitungszeitraum dieser Arbeit. Zweitens weist der Innenausbau eine dichte Abfolge unterschiedlicher Prüf- und Freigabeschritte auf und eignet sich deshalb besonders gut, um die modellbasierte Erfassung qualitätsrelevanter Informationen zu testen.

Für die Fallstudie werden stellvertretend zwei zeitlich aufeinanderfolgende Prüfstufen betrachtet:

- Prüfstufe 1 – Untergrund: Herstellung des Abdichtungsträgers und Vorbereitung der Baupiste.
- Prüfstufe 2 – Verlegen Abdichtungssystem: Aufbringen der Abdichtungsfolie samt Schutzfolien und Fugenbändern.

Die übrigen Prüfstufen werden im Rahmen der Fallstudie nicht im Detail ausgearbeitet. Die Methodik ist jedoch so aufgebaut, dass dieselbe Logik auf weitere Prüfstufen sowie auf die nachfolgende Querverbindung QV07 übertragen werden kann.

Der Aufbau des Kapitels folgt einem iterativen Vorgehen. Abschnitt 7.1 beschreibt die Entwicklung des Prototyps im Testprojekt. Abschnitt 7.2 validiert den Prototyp anhand der definierten Anforderungen sowie durch eine interne Rückmeldung der Projektbeteiligten. Abschnitt 7.3 greift die daraus abgeleiteten Verbesserungsmaßnahmen auf und ordnet die Ergebnisse für die weitere Umsetzung ein.

Die in Kapitel 0 definierte Abgrenzung bleibt dabei gewahrt. Die Fallstudie beschränkt sich auf den Innenausbau der QV04 im Baulos Nord und bildet keine vollständige digitale Integration aller Prüfprozesse oder Folgeprozesse ab.

7.1 Erste Iteration des Prototyps

Die Entwicklung des Prototyps dient dazu, die in Kapitel 6 ausgewählte Variante 2 in einer kontrollierten Testumgebung praktisch umzusetzen. Im Fokus steht nicht die geometrische Weiterbearbeitung des Modells, sondern die semantische Erweiterung ausgewählter Bauteile mit qualitätsrelevanten Informationen. Dadurch wird geprüft, ob die Anforderungen aus dem Kontrollplan modellbasiert abgebildet und im Baustellenprozess nutzbar gemacht werden können.

Der Prototyp umfasst drei zentrale Bestandteile: das Testprojekt mit dem Innenausbau-Modell der QV04, die Property-Set-Bibliothek „Abdichtung“ sowie einen operativen Workflow für Erfassung, Prüfung und Rückmeldung. Die folgenden Unterkapitel beschreiben den Aufbau dieser Bestandteile und die dabei erkannten Einschränkungen

7.1.1 Test-Projekt und Modellgrundlage

Für die Fallstudie wird in Trimble Connect Pro ein vom produktiven Projekt unabhängiges Testprojekt mit dem Arbeitstitel „Test MTH“ angelegt. Die getrennte Testumgebung verhindert Eingriffe in den laufenden Projektbetrieb und ermöglicht es, die Property-Set-Struktur ohne Risiko für das Hauptprojekt aufzubauen und zu prüfen. Die Pro-Lizenz ist dabei erforderlich, da das Anlegen und Bearbeiten von Property Sets nur mit erweitertem Funktionsumfang möglich ist.

Die Autorin übernimmt im Testprojekt die Administratorenrolle. Dadurch können Bibliotheken, Eigenschaftengruppen und Zuweisungen eigenständig erstellt und angepasst werden. Bei einer späteren Überführung in das produktive Projekt müssten die Modellverantwortlichen die Pflege, Freigabe und Weiterentwicklung der Bibliothek übernehmen.

Als Datenbasis dienen die von ILF gelieferten IFC-Modelle der QV04. Aus dem Gesamtmodell wird der Innenausbau in das Testprojekt geladen. An der geometrischen Modellschubstanz werden keine Änderungen vorgenommen; sämtliche Erweiterungen erfolgen ausschliesslich auf semantischer Ebene über Property Sets. Für die Prüfstufen 1 und 2 sind insbesondere drei Bauteilfamilien relevant: Abdichtungsträger, Abdichtungssystem und Fugenband.

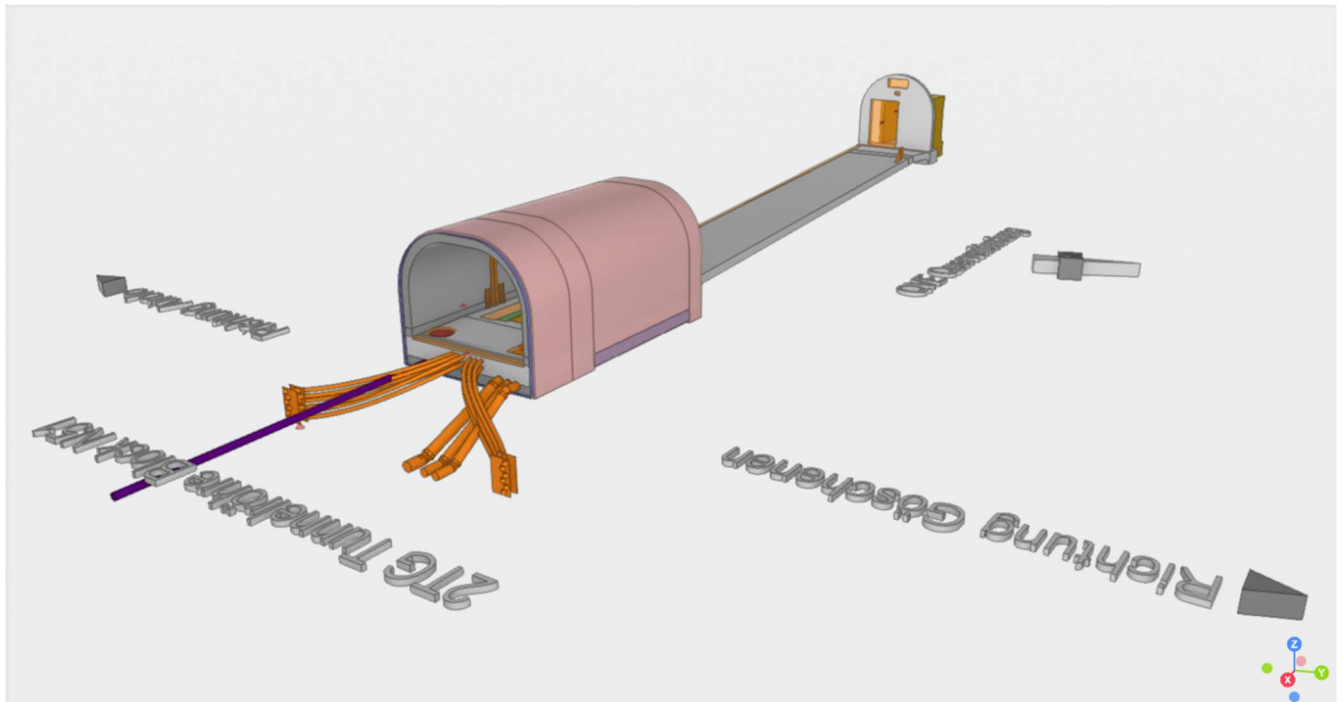


Abbildung 21, Axonometrische Übersicht des Innenausbau-Modells der QV04 im Test-Projekt; sichtbar sind die Anschlüsse an die zweite Tunnelröhre und der Lagebezug nach Göschenen (Screenshot des Testprojekts).

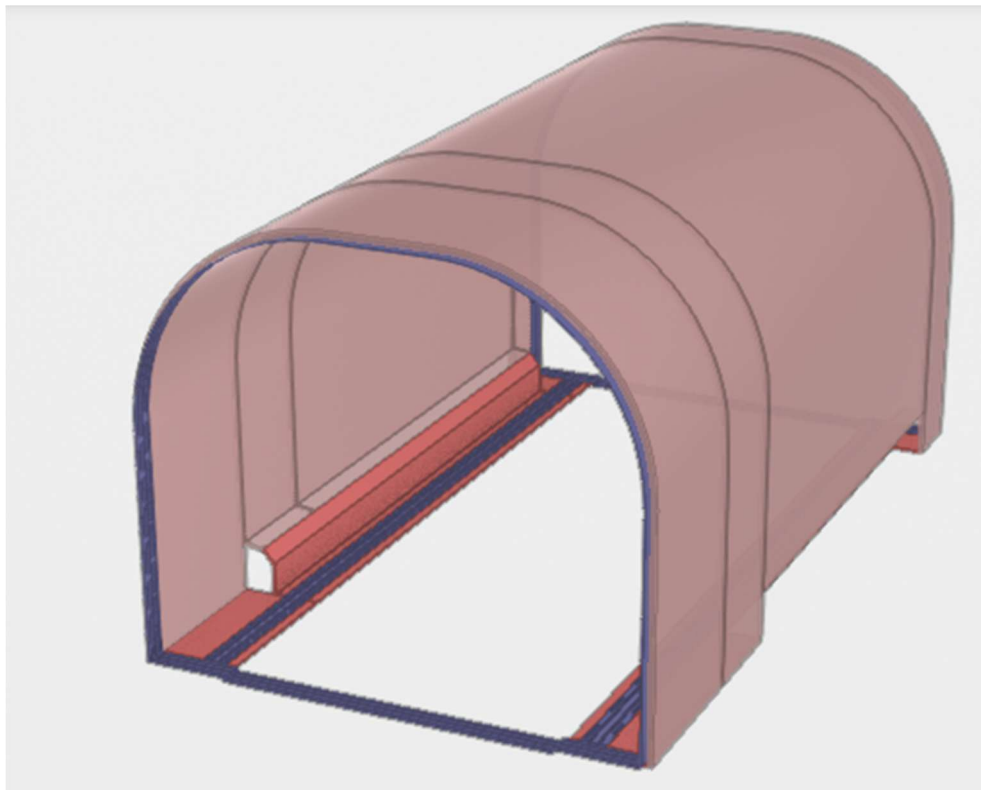


Abbildung 22, Detailansicht der Abdichtung (Screenshot des Testprojekts).

Die beiden Abbildungen zeigen die Modellgrundlage der Fallstudie. Während Abbildung 21 den räumlichen Zusammenhang des Innenausbaus der QV04 zeigt, verdeutlicht Abbildung 22 den für die Fallstudie relevanten Bauteilausschnitt im Bereich der Abdichtung.

7.1.2 Property-Set-Bibliothek „Abdichtung“

Kern des Prototyps ist eine projektbezogene Property-Set-Bibliothek mit dem Namen „Abdichtung“. In dieser Bibliothek werden die für die Fallstudie relevanten Prüfinformationen aus dem Kontrollplan in strukturierter Form abgebildet. Die Bibliothek bildet damit die Verbindung zwischen den Anforderungen aus dem Kontrollplan und den Modellelementen der QV04.

Die Wahl einer themenbezogenen Bibliothek folgt einem bewussten Designentscheid. Anstatt alle Qualitätsanforderungen des Kontrollplans in einer übergeordneten Gesamtstruktur abzubilden, wird der Prototyp auf den Bereich Abdichtung beschränkt. Dadurch bleibt die Struktur überschaubar, fachlich eindeutig zuordenbar und für die zuständigen Projektbeteiligten einfacher nachvollziehbar. Gleichzeitig kann dieselbe Logik später auf weitere Themenbereiche wie Bewehrung, Werkleitungen oder Betonarbeiten übertragen werden.

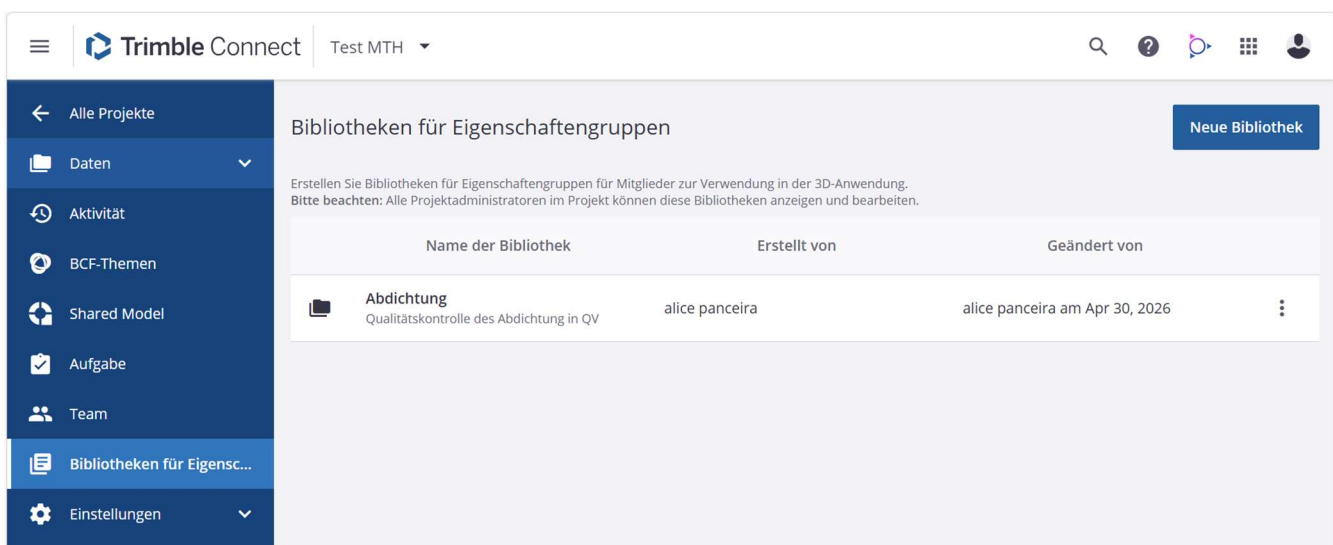


Abbildung 23, Menü „Bibliotheken für Eigenschaftengruppen“ im Test-Projekt mit der eigens angelegten Bibliothek „Abdichtung – Qualitätskontrolle der Abdichtung in QV“ (Screenshot des Testprojekts).

Abbildung 23 zeigt die im Testprojekt angelegte Bibliothek für qualitätsbezogene Eigenschaftengruppen. Sie dient als übergeordnete Struktur, in der die Prüfanforderungen für die betrachteten Prüfstufen organisiert werden.

Innerhalb der Bibliothek wird je Prüfstufe eine eigene Eigenschaftengruppe geführt. Für die Fallstudie wurden zwei Eigenschaftengruppen angelegt:

- Prüfstufe 1 – Untergrund
- Prüfstufe 2 – Verlegen Abdichtungssystem

Die Trennung folgt dem realen Bauablauf. Dadurch wird jede Prüfanforderung jener Phase zugeordnet, in der sie auf der Baustelle tatsächlich relevant ist. Gleichzeitig erleichtert diese Struktur die Anwendung durch Fachpersonen, da die digitalen Prüfpunkte nicht abstrakt, sondern entlang der bekannten Arbeits- und Kontrollschritte organisiert sind.

Für die einzelnen Felder wurden drei Datentypen verwendet:

- Datum: für den Zeitpunkt der Hauptkontrolle oder Abnahme.
- Wahr/Falsch: für binäre Kontrollen mit eindeutigem Sollzustand.
- Dropdown-Auswahl: für begrenzte Listen zulässiger Materialien oder Produkte.

Die booleschen Felder wurden dort mit dem erwarteten Sollzustand vorbelegt, wo der Kontrollplan einen eindeutigen Zielwert vorgibt. Dadurch kann die Erfassung vor Ort vereinfacht werden. Gleichzeitig bleibt sichtbar, welche Prüfpunkte aktiv bestätigt oder bei Abweichungen angepasst werden müssen.

Die Eigenschaftengruppe „Prüfstufe 1 – Untergrund“ umfasst die relevanten Prüfpunkte zur Vorbereitung des Abdichtungsträgers. Dazu gehören die Abdichtungsträgerkontrolle als Datum sowie Prüffelder zu Abdichtungsträgertyp, Festigkeit, Rauigkeit beziehungsweise Ebenheit, Sauberkeit und Trockenheit.

Name	Typ	Werte	Standard
Abdichtungsträger kontrolle	Datum Einzelwert	--	--
Abdichtungsträgertyp 30 mm (SC6*)	Wahr/Falsch	Wahr, Falsch	Wahr
Festigkeit	Wahr/Falsch	Wahr, Falsch	Wahr
Rauigkeit / Ebenheit	Wahr/Falsch	Wahr, Falsch	Wahr
Sauberkeit	Wahr/Falsch	Wahr, Falsch	Wahr
Trockenheit	Wahr/Falsch	Wahr, Falsch	Wahr

Abbildung 24, Eigenschaftengruppe „Prüfstufe 1: Untergrund“ mit den im Prototyp definierten Prüfkriterien

Die Eigenschaftengruppe „Prüfstufe 2 – Verlegen Abdichtungssystem“ erfasst die Prüfpunkte zur Applikation der Abdichtung. Dazu gehören die Abdichtungssystemkontrolle als Datum, die Auswahl der Drainagematte sowie Prüffelder zur zusätzlichen Schutzfolie, zur Abdichtungsfolie aus PVC-P, zur Schutzfolie bei Arbeitsfugen und zum Fugenband.

Name	Typ	Werte	Standard
Abdichtungssystemkontrolle des A...	Datum Einzelwert	--	--
Drenagematte	Dropdown-Auswahl	Enkadrain5020Z, Kunstfaservlies 10...	--
zusätzlicher Schutzfolie??	Wahr/Falsch	Wahr, Falsch	Falsch
Abdichtungsfolie kunststoffdichtungsbahn PVC-P 2 mm typ...	Wahr/Falsch	Wahr, Falsch	Wahr
Schutzfolie Schutzfolie PVC 2 mm, bei Arbeitsfugen T...	Wahr/Falsch	Wahr, Falsch	Wahr
Fugenband Typ: Sika waterbar AF AT	Wahr/Falsch	Wahr, Falsch	Falsch

Abbildung 25, Eigenschaftengruppe „Prüfstufe 2: Verlegen Abdichtungssystem“ mit den Prüfkriterien für das Aufbringen der Abdichtung

Die Verbindung zwischen Prüfanforderung und Bauwerk erfolgt über die Zuweisung der Eigenschaftengruppen an die entsprechenden Modellelemente. Bauteile der Familie Abdichtungsträger erhalten die Eigenschaftengruppe „Prüfstufe 1 – Untergrund“. Bauteile der Familien Abdichtungssystem und Fugenband erhalten die Eigenschaftengruppe „Prüfstufe 2 – Verlegen Abdichtungssystem“.

Die Zuweisung erfolgt im Testprojekt über Filter und gespeicherte Auswahlmengen. Dadurch kann auch bei einer grösseren Anzahl von Bauteilen eine konsistente und nachvollziehbare Zuordnung sichergestellt werden. Diese Zuordnung ist entscheidend, weil sie bestimmt, welche Prüfinformationen später an welchem Bauteil angezeigt und bearbeitet werden können.



Abbildung 26, Zuweisung der neuen Properties an die Elemente des Modells (Screenshot des Testprojekts).

Abbildung 26 zeigt beispielhaft die Zuweisung der neu angelegten Eigenschaftengruppen an die entsprechenden Modellelemente. Damit wird der Kontrollplan nicht mehr nur als separates Dokument geführt, sondern in eine bauteilbezogene digitale Struktur überführt.

7.1.3 Operativer Workflow und Rückkanal

Das Rollenmodell des bestehenden Qualitätsprozesses bleibt im Prototyp grundsätzlich erhalten. Die fachlichen Verantwortlichkeiten von Unternehmer und Bauleitung werden nicht verändert; verändert wird lediglich das Medium, über das die Prüfinformationen erfasst, geprüft und zurückgemeldet werden. Die bisher papier- oder PDF-basierte Dokumentation wird im Prototyp durch eine modellgebundene Erfassung über Property Sets ergänzt.

Die Unternehmung erfasst die Istwerte der jeweiligen Prüfkriterien direkt am zugehörigen Modellelement. Je nach Feldtyp werden dabei das Datum der Kontrolle, der Status eines binären Prüfkriteriums oder ein zulässiges Material beziehungsweise Produkt eingetragen. Die Hauptkontrolle wird über das Datumsfeld dokumentiert. Damit bleibt der Eintrag dem entsprechenden Bauteil zugeordnet und kann im Modellkontext nachvollzogen werden.

Die Bauleitung prüft die erfassten Werte ebenfalls am Modell. Dabei werden die hinterlegten Sollvorgaben mit den erfassten Istwerten verglichen. Sind die Anforderungen erfüllt, kann die Prüfung freigegeben beziehungsweise der entsprechende Status weitergeführt werden. Werden Abweichungen festgestellt, erfolgt die Rückmeldung über die in Trimble Connect vorhandene ToDo-/BCF-Funktion. Dabei kann ein Korrekturauftrag erstellt, einer verantwortlichen Person zugewiesen und mit Beschreibung, Modellausschnitt sowie ergänzenden Bildern dokumentiert werden.



Abbildung 27, Beispielhafter ToDo-Eintrag „Korrektur dem Fugenband“ als Rückkanal von der Bauleitung an den Unternehmer; sichtbar sind Beschreibung, Zuweisung und beigefügte Modellausschnitte (Screenshot des Testprojekts).

Abbildung 27 zeigt beispielhaft einen ToDo-Eintrag zur Korrektur am Fugenband. Der Eintrag dient als digitaler Rückkanal von der Bauleitung an die Unternehmung und ermöglicht es, Abweichungen bauteilbezogen zu dokumentieren und nachzuverfolgen.

Durch diese Kombination aus Property Sets und ToDo-/BCF-Funktion entsteht ein modellbezogener Prüfablauf. Die qualitätsrelevanten Informationen werden nicht mehr ausschliesslich in separaten Papier- oder PDF-Dokumenten geführt, sondern direkt mit dem betroffenen Bauteil verknüpft. Dadurch reduziert der Prototyp die Trennung zwischen Modell und Qualitätsdaten und schafft eine gemeinsame Informationsbasis für Erfassung, Prüfung und Rückmeldung.

7.2 Validierung des Prototyps

Die Validierung des Prototyps erfolgt in zwei Schritten. Zunächst wird die im Testprojekt aufgebaute Lösung formal mit den in Kapitel 5.3 entwickelten Evaluierungskriterien abgeglichen. Dabei wird geprüft, ob die technische Konfiguration des Prototyps die zentralen Anforderungen an Datenstruktur, Rollenmodell, Modellbezug und Rückkanal erfüllt.

In einem zweiten Schritt wird der Prototyp mit den unmittelbar beteiligten Projektakteuren validiert. Diese interne Validierung dient dazu, die technische Lösung nicht nur aus Sicht der Modellstruktur, sondern auch hinsichtlich ihrer Eignung für den realen Baustellen- und Abnahmeprozess zu beurteilen. Ergänzend wird eine Fachauskunft von Marko Timic, Digital Engineering Specialist bei Building-Point Schweiz AG, einbezogen.

Aus beiden Validierungsschritten werden anschliessend Verbesserungsmaßnahmen abgeleitet, die in Abschnitt 7.3 vertieft betrachtet werden.

7.2.1 Formale Validierung anhand der Evaluierungskriterien

Im ersten Validierungsschritt wird der Prototyp mit den in Kapitel 5.3 definierten Anforderungen abgeglichen. Die Beurteilung erfolgt kriterienbezogen mit den drei Stufen erfüllt, teilweise erfüllt und nicht erfüllt. Ziel dieser formalen Validierung ist es, zu prüfen, ob die in Kapitel 6 gewählte Zielvariante im Testprojekt grundsätzlich technisch und operativ abgebildet werden kann.

Die formale Validierung zeigt, dass der Prototyp die zentralen technischen Anforderungen weitgehend erfüllt. Das IFC-Modell der QV04 ist im CDE verfügbar, die Property-Set-Bibliothek „Abdichtung“ wurde angelegt und die beiden untersuchten Prüfstufen sind über Eigenschaftengruppen abgebildet. Zudem wurde die Verbindung zwischen Prüfanforderung und Modellelement durch die Zuweisung der Eigenschaftengruppen an die relevanten Bauteilfamilien hergestellt.

Auch auf operativer Ebene werden wesentliche Anforderungen erfüllt. Das Rollenmodell aus Unternehmer und Bauleitung lässt sich im Prototyp abbilden. Die Unternehmung kann Istwerte direkt am Modellelement erfassen, während die Bauleitung die Angaben im Modellkontext prüfen und Rückmeldungen über die ToDo-/BCF-Funktion auslösen kann. Damit sind Erfassung, Prüfung und Rückmeldung grundsätzlich in einer gemeinsamen digitalen Umgebung möglich.

Eine zentrale Anforderung kann jedoch nicht vollständig erfüllt werden: die Unveränderbarkeit eines validierten Prüfeintrags nach Freigabe durch Unternehmer und Bauleitung. Im papiergebundenen Prozess wird diese Anforderung durch die doppelte Unterschrift erfüllt. Nach der Unterzeichnung können Mess- und Statuswerte nicht mehr einseitig verändert werden. Im Prototyp lassen sich die Zugriffsrechte zwar über Rollen und Berechtigungen einschränken, eine attributweise technische Sperre einzelner Property-Set-Werte nach erfolgter Validierung ist jedoch nicht vorgesehen.

Diese Einschränkung ist für die weitere Beurteilung entscheidend, weil sie die vertragliche Verwertbarkeit des digitalen Prüfprozesses betrifft. Der Befund wird deshalb in der internen Validierung in Abschnitt 7.2.2 vertieft geprüft.

Tabelle 9, Formale Validierung des Prototyps anhand der Evaluierungskriterien

Kriterium	Ergebnis	Bemerkung
IFC-Modell im CDE verfügbar	erfüllt	Das Innenausbau-Modell der QV04 wurde in das Testprojekt geladen.
Property-Set-Bibliothek eingerichtet	erfüllt	Die Bibliothek „Abdichtung“ wurde mit zwei Eigenschaftengruppen aufgebaut.
Prüfstufen digital abgebildet	erfüllt	Prüfstufe 1 und Prüfstufe 2 wurden über strukturierte Felder umgesetzt.
Bauteilbezogene Zuordnung	erfüllt	Die Eigenschaftengruppen wurden den relevanten Bauteilfamilien zugewiesen.
Rollenmodell UN / BL abbildbar	erfüllt	Erfassung durch UN und Prüfung durch BL sind im Workflow vorgesehen.
Rückkanal bei Abweichungen	erfüllt	Rückmeldungen können über ToDo-/BCF-Funktionen dokumentiert werden.
Maschinenlesbare Prüfinformationen	teilweise erfüllt	Die P-Set-Werte sind strukturiert erfassbar, jedoch nicht vollständig mit nachgelagerten Systemen verknüpft.
Unveränderbarkeit nach Freigabe	nicht erfüllt	Eine attributweise Sperre validierter P-Set-Werte ist in der gewählten Konfiguration nicht möglich.

Die Tabelle zeigt, dass der Prototyp für die modellbasierte Erfassung und Prüfung qualitätsrelevanter Informationen grundsätzlich geeignet ist. Die wesentliche offene Schwachstelle betrifft nicht die Datenstruktur selbst, sondern die fehlende technische Absicherung validierter Prüfeinträge nach der Freigabe.

7.2.2 Interne Validierung mit Projektbeteiligten und Fachauskunft

Die interne Validierung erfolgte am 30. April 2026 im Rahmen einer projektinternen Besprechung mit Vertreterinnen und Vertretern der Projektplanung, der ausführenden Unternehmung und der Bauleitung. Vorgestellt wurde die in Abschnitt 7.1 entwickelte Property-Set-Bibliothek „Abdichtung“ einschliesslich der modellbasierten Erfassung, der bauteilbezogenen Prüfinformationen und des Rückkanals über ToDo-/BCF-Funktionen.

Ziel der Validierung war es, die Eignung des Prototyps nicht nur technisch, sondern auch aus Sicht des realen Baustellen- und Abnahmeprozesses zu beurteilen. Im Mittelpunkt stand die Frage, ob die

modellbasierte Erfassung über Property Sets den bisherigen papiergebundenen Prüfprozess funktional ersetzen oder zumindest sinnvoll ergänzen kann.

Die Rückmeldungen zur Grundlogik des Prototyps fielen grundsätzlich positiv aus. Die Beteiligten beurteilten insbesondere die bauteilbezogene Verknüpfung der Prüfinformationen, die zentrale Verfügbarkeit im Modell und die bessere Nachvollziehbarkeit gegenüber einer rein datei- oder papierbasierten Ablage als sinnvoll. Die Property-Set-Struktur wurde damit methodisch als geeigneter Ansatz zur Strukturierung qualitätsrelevanter Informationen bestätigt.

Gleichzeitig wurde ein kritischer Einwand formuliert: Die in Property Sets erfassten Prüfwerte bleiben für Personen mit entsprechenden Schreibrechten weiterhin veränderbar. Damit fehlt im Prototyp jenes Sperrelement, das im bisherigen papiergebundenen Verfahren durch die doppelte Unterschrift von Unternehmung und Bauleitung entsteht. Nach der Unterzeichnung eines Papierprotokolls sind Messwerte, Statusangaben und Verantwortlichkeiten nicht mehr einseitig veränderbar. Für eine vertraglich verbindliche Nutzung digitaler Prüfprotokolle ist diese Unveränderbarkeit jedoch zentral. (Von Mandach, 2026)

Zur fachlichen Absicherung dieses Befunds wurde im Anschluss an die interne Besprechung eine Fachauskunft bei Marko Timic, Digital Engineering Specialist bei BuildingPoint Schweiz AG, eingeholt. Die Rückmeldung vom 5. Mai 2026 bestätigte die technische Grenze der gewählten Lösung: Property Sets sind in Trimble Connect Pro als lebende Objektinformationen konzipiert. Berechtigungen können zwar auf Ebene von Eigenschaftengruppen beziehungsweise Nutzergruppen gesteuert werden, eine technische Sperre einzelner Attribute nach abgeschlossener Eingabe ist jedoch in der betrachteten Konfiguration nicht vorgesehen.

Damit liegt die festgestellte Einschränkung nicht im Aufbau des Prototyps, sondern im Funktionsumfang der gewählten Plattform. Die Property Sets eignen sich gut zur strukturierten Erfassung und laufenden Fortschreibung von Qualitätsinformationen, erfüllen für sich allein jedoch nicht die Anforderung an ein unveränderliches, doppelt freigegebenes Prüfprotokoll.

Im Rahmen der Fachauskunft wurden vier mögliche Lösungsansätze eingeordnet:

- ToDo-/BCF-Funktion in Trimble Connect: geeignet für Rückmeldungen, Mängel und Nachverfolgung, jedoch nur begrenzt als Ersatz für klassische Prüfprotokolle mit mehreren Kontrollpunkten.
- Trimble Connect Forms: funktional nicht Bestandteil der eingesetzten Trimble-Connect-Umgebung, sondern dem Produktumfeld Viewpoint / Field View zuzuordnen.
- Property Sets mit signiertem PDF-Snapshot über API: grundsätzlich denkbar, jedoch mit hohem Entwicklungs- und Integrationsaufwand verbunden.
- Checklist Extension für Trimble Connect: funktional näher am bisherigen Prüfprotokoll, da strukturierte Checkpunkte, Anhänge, Status, Historie und PDF-Ausgabe unterstützt werden; jedoch mit zusätzlicher Lizenzierung verbunden.

Die interne Validierung ergibt damit ein zweigeteiltes Bild. Die modellbasierte Property-Set-Logik ist als Datenstruktur und als Grundlage für einen bauteilbezogenen Qualitätsstatus tragfähig. Für den vertraglich verbindlichen Prüfnachweis reicht sie ohne ergänzende Sperr-, Archivierungs- oder Protokollfunktion jedoch nicht aus. Aus diesem Befund werden in Abschnitt 7.2.3 konkrete Verbesserungsmassnahmen abgeleitet.

7.2.3 Ableitung von Verbesserungsmassnahmen

Aus der formalen und internen Validierung ergibt sich ein klarer Handlungsbedarf. Die Property-Set-Bibliothek erfüllt die Anforderungen an eine strukturierte, modellbezogene Erfassung qualitätsrelevanter Informationen, kann jedoch die Unveränderbarkeit validierter Prüfeinträge nicht sicherstellen. Für die weitere Bearbeitung werden deshalb vier mögliche Massnahmen geprüft, die entweder die Sperranforderung ergänzen oder alternative Wege zur digitalen Prüfprotokollierung aufzeigen.

Die Massnahmen werden hinsichtlich ihres Beitrags zur Sperranforderung, ihres Umsetzungsaufwands und ihrer Verfügbarkeit im bestehenden Projektumfeld bewertet.

Tabelle 10, Gegenüberstellung der vier Massnahmen-Optionen aus der internen Validierung

Nr.	Massnahme	Beitrag zur Sperranforderung	Aufwand / Verfügbarkeit	Entscheid
1	Property Sets beibehalten und mit der Checklist Extension für Trimble Connect ergänzen	Validierte Prüfungen können über Status, Historie, Anhänge und PDF-Ausgabe dokumentiert werden.	Mittlerer Aufwand; zusätzliche Lizenzierung der Checklist Extension erforderlich.	Zur vertieften Prüfung ausgewählt, da die Lösung nahe am bisherigen Prüfprotokoll liegt und die Property Sets weiter für den Modellstatus genutzt werden können.
2	Prüfprotokolle über strukturierte ToDos in Trimble Connect abbilden	Geschlossene ToDos verfügen über ein Aktivitätsprotokoll und können über Berechtigungen kontrolliert werden.	Geringer bis mittlerer Aufwand; keine zusätzliche Lizenz erforderlich.	Als Rückfallpfad geeignet, falls die Checklist Extension nicht verfügbar ist.
3	Property Sets beibehalten und je Prüfung einen signierten PDF-Snapshot über API erzeugen	Der validierte Datenstand könnte als schreibgeschützter Nachweis archiviert werden; die P-Set-Werte bleiben jedoch weiterhin als Arbeitsdaten bestehen.	Hoher Aufwand durch API-Integration, Automatisierung und Berechtigungsmanagement.	Für diese Arbeit nicht prioritär; als langfristige Option in den Handlungsempfehlungen zu behandeln.
4	Trimble Connect Forms beziehungsweise Viewpoint / Field View einsetzen	Prüfprotokolle könnten systemseitig strukturiert und freigegeben werden.	Im aktuellen Trimble-Connect-Setup nicht direkt verfügbar.	Verworfen, da die Lösung nicht Bestandteil der eingesetzten Systemumgebung ist.

Für die zweite Iteration werden Massnahme 1 und Massnahme 2 weiter betrachtet. Massnahme 1, die Kombination aus Property Sets und Checklist Extension, wird vertieft geprüft, weil sie die bestehende modellbasierte Datenstruktur erhält und gleichzeitig näher an einem klassischen Prüfprotokoll liegt. Massnahme 2, die Abbildung über strukturierte ToDos, wird als pragmatischer Rückfallpfad berücksichtigt, falls die Checklist Extension projektseitig nicht rechtzeitig aktiviert oder lizenziert werden kann.

Massnahme 3 wird nicht im Rahmen des Prototyps umgesetzt, bleibt jedoch als langfristiger Zielzustand relevant. Sie ist die einzige der betrachteten Optionen, die eine strukturierte modellbasierte Datenerfassung mit einer automatisierten Archivierungs- oder Sperrlogik verbinden könnte. Massnahme 4 wird für die vorliegende Fallstudie nicht weiterverfolgt, da sie nicht in der aktuell eingesetzten Trimble-Connect-Umgebung verfügbar ist.

Damit ist die Validierungsphase abgeschlossen. Die ausgewählten Massnahmen bilden die Grundlage für die zweite Iteration in Abschnitt 7.3.

7.2.4 Einschränkungen und Ergebnis der Entwicklungsphase

Bereits während der Entwicklung des Prototyps wurden mehrere Randbedingungen sichtbar, die für die spätere Validierung relevant sind. Erstens ist das Anlegen und Bearbeiten von Property Sets an die entsprechende Trimble-Connect-Pro-Funktionalität gebunden. Anwenderinnen und Anwender ohne ausreichende Berechtigung können die Eigenschaftengruppen nicht erstellen oder anpassen.

Zweitens setzt die Veröffentlichung neuer oder geänderter Eigenschaftengruppen Administrationsrechte voraus. Dadurch muss im produktiven Projekt klar geregelt werden, wer die Bibliothek pflegt, wer Änderungen freigibt und wie verhindert wird, dass unterschiedliche Versionen derselben Prüfstruktur parallel verwendet werden.

Drittens hängt die Zuordnung der Eigenschaftengruppen von der Modellstruktur und den Bauteilinformationen ab. Werden geometrische Elemente ausgetauscht, umbenannt oder in einer neuen Modellversion anders strukturiert, müssen die Zuweisungen überprüft und gegebenenfalls angepasst werden. Für eine produktive Anwendung ist deshalb ein Versionierungs- und Prüfmechanismus erforderlich.

Viertens sind Property Sets nur eingeschränkt geeignet, um ergänzende Nachweise wie Bilder, externe Dokumente oder detaillierte Mängelbeschreibungen direkt abzubilden. Solche Informationen werden im Prototyp zweckmässig über die ToDo-/BCF-Funktion ergänzt, da dort Modellausschnitte, Kommentare und Anhänge besser dokumentiert werden können.

Am Ende der Entwicklungsphase liegt ein validierungsreifer Prototyp vor. Dieser umfasst das Testprojekt mit dem importierten Innenausbau-Modell der QV04, die Property-Set-Bibliothek „Abdichtung“ mit den beiden Eigenschaftengruppen für Prüfstufe 1 und Prüfstufe 2, die Zuweisung dieser Gruppen an die relevanten Bauteilfamilien sowie einen definierten Workflow für Erfassung, Prüfung und Rückmeldung.

Damit ist die Grundlage für die anschliessende Test- und Validierungsphase in Abschnitt 7.2 geschaffen.

7.3 Zweite Iteration und Einordnung

Auf Grundlage, der in Abschnitt 7.2.3 abgeleiteten Massnahmen wird der Prototyp in einer zweiten Iteration weiter untersucht. Im Fokus steht dabei die Frage, ob die fehlende Sperr- und Protokollfunktion der Property Sets mit nativen oder ergänzenden Funktionen von Trimble Connect geschlossen werden kann.

Vertieft geprüft wird zunächst die Checklist Extension für Trimble Connect, da sie im Rahmen der Fachauskunft als funktional naheliegende Ergänzung zum bisherigen Prüfprotokoll identifiziert wurde. Ergänzend wird die dokumentenbasierte Variante aus Kapitel 6.2.1 erneut betrachtet, diesmal jedoch ausdrücklich als kurzfristige Übergangslösung für den vertraglich verbindlichen Prüfnachweis.

Die zweite Iteration verfolgt damit nicht das Ziel, die in Kapitel 6 gewählte Zielvariante grundsätzlich zu ersetzen. Vielmehr wird geprüft, wie die modellbasierte Property-Set-Logik kurzfristig um einen belastbaren Nachweisprozess ergänzt werden kann und welche Lösung langfristig weiterzuentwickeln ist.

7.3.1 Prüfung der Checklist Extension

Die Checklist Extension wurde im Rahmen einer praktischen Vorführung mit Marko Timic, Digital Engineering Specialist bei BuildingPoint Schweiz AG, am 8. Mai 2026 am bestehenden Testprojekt geprüft. Ziel war es, zu beurteilen, ob die Erweiterung, die in Abschnitt 7.2 identifizierte Lücke zwischen modellbasierter Datenerfassung und unveränderlichem Prüfprotokoll schliessen kann.

Die Extension ermöglicht das Anlegen von Checklisten-Vorlagen mit einzelnen Prüfpunkten, das Ausfüllen der Checklisten vor Ort, das Anhängen von Fotos und Dokumenten, das Setzen eines abschliessenden Status sowie die automatische Erzeugung eines PDF-Berichts. Auf der Ebene des klassischen Prüfprotokolls erfüllt sie damit wesentliche Anforderungen: Prüfpunkte können strukturiert abgearbeitet, dokumentiert und als PDF exportiert werden. Auch die Nachvollziehbarkeit wird durch Statusinformationen und Historie verbessert.

Bei näherer Betrachtung zeigt sich jedoch, dass der Mehrwert gegenüber dem heutigen Papierprozess begrenzt bleibt. Die Checklist Extension digitalisiert in erster Linie die Form des Prüfprotokolls. Der erzeugte Nachweis bleibt funktional ein PDF-Bericht mit ausgefüllten Prüfpunkten, Datum, Anhängen und Verantwortlichkeiten. Die Informationen sind damit zwar digital erfasst und besser dokumentiert, aber nur eingeschränkt als strukturierte, modellgebundene Qualitätsdaten weiterverwendbar.

Zudem entstehen zusätzliche Anforderungen an Lizenzierung, Schulung und Pflege der Checklisten-Vorlagen. Für klassische Prüfprotokolle ist die Extension grundsätzlich geeignet. Sie unterstützt jedoch den in dieser Arbeit angestrebten Schritt zu einer modellgebundenen und auswertbaren Qualitätsdatenstruktur nur begrenzt. Im Verhältnis zum bereits bestehenden Vorgehen – Papierprotokoll, doppelte Unterschrift, Scan und Ablage – bietet sie deshalb keinen ausreichenden funktionalen Mehrwert, um als bevorzugte Lösung für die Fallstudie weiterverfolgt zu werden.

Die Prüfung der Checklist Extension bestätigt damit den Befund aus Abschnitt 7.2: Eine ergänzende Protokollfunktion kann die Sperranforderung zwar teilweise lösen, führt aber nicht automatisch zu einer durchgängigen modellbasierten Qualitätssicherung. Für die weitere Einordnung wird deshalb die dokumentenbasierte Übergangslösung nach dem Prinzip von Variante 1 erneut betrachtet.

7.3.2 Dokumentenbasierte Übergangslösung

Auf Grundlage der Prüfung der Checklist Extension wird die dokumentenbasierte Variante aus Kapitel 6.2.1 erneut betrachtet. Sie wird an dieser Stelle jedoch nicht als eigentliche Zielvariante verstanden, sondern als pragmatische Übergangslösung für den vertraglich verbindlichen Prüfnachweis.

Die Übergangslösung folgt im Wesentlichen dem heutigen Prüfablauf. Das Prüfprotokoll wird auf der Baustelle ausgefüllt, durch Unternehmung und Bauleitung unterzeichnet, anschliessend digitalisiert und als PDF im CDE abgelegt. Der Unterschied zum heutigen Vorgehen liegt darin, dass das Dokument nicht nur in einer Ordnerstruktur gespeichert, sondern zusätzlich mit dem zugehörigen Bauteil oder Bauabschnitt im Modell verknüpft wird.

Die in Abschnitt 7.1 entwickelte Property-Set-Bibliothek bleibt dabei weiterhin relevant. Sie dient jedoch nicht als alleiniger rechtlich verbindlicher Nachweis, sondern als modellbezogene Status- und Informationsstruktur. Der vertraglich relevante Prüfnachweis liegt im unterzeichneten und abgelegten PDF. Damit entsteht eine hybride Lösung: Das PDF sichert die Nachweis- und Sperranforderung, während das Modell die Auffindbarkeit und den bauteilbezogenen Kontext verbessert.

Die Sperranforderung wird durch das unterzeichnete und gescannte PDF eindeutig erfüllt. Nach der Unterzeichnung können die dokumentierten Werte nicht mehr einseitig verändert werden, ohne dass dies als neuer Nachweis oder neue Version abgelegt werden müsste. Gleichzeitig reduziert die Verknüpfung am Modell den Medienbruch zwischen Bauteil und Prüfdokument gegenüber einer rein dateiorientierten Ablage.

Auf der Datenebene bleibt die Lösung jedoch begrenzt. Die Prüfinformationen sind im PDF enthalten und damit nur eingeschränkt maschinenlesbar oder auswertbar. Eine automatische Auswertung, ein direkter Vergleich mit Sollwerten oder eine strukturierte Weiterverwendung für Folgeprozesse wie Ausmass und Reporting ist weiterhin nicht möglich. Der ursprüngliche Anspruch der Zielvariante – qualitätsrelevante Informationen strukturiert und modellgebunden zu führen – wird durch diese Übergangslösung daher nur teilweise erfüllt.

Die dokumentenbasierte Übergangslösung ist somit kurzfristig robust und ohne zusätzliche Systementwicklung umsetzbar. Sie eignet sich insbesondere, um die bestehende vertragliche Logik beizubehalten und gleichzeitig die Modellverknüpfung als ersten Digitalisierungsschritt einzuführen. Für eine vollständige modellbasierte Qualitätssicherung bleibt jedoch eine weiterführende technische Lösung erforderlich.

7.4 Schlussfolgerung: hybride Umsetzung und API-basierter Zielzustand

Die zweite Iteration zeigt eine zentrale Grenze der untersuchten No-Code-Lösungen auf. Innerhalb der nativ verfügbaren Funktionen von Trimble Connect lassen sich die beiden wesentlichen Anforderungen der Fallstudie nicht gleichzeitig vollständig erfüllen: Einerseits braucht es eine strukturierte, modellgebundene Erfassung der Qualitätsinformationen über Property Sets. Andererseits muss ein validierter Prüfnachweis nach Freigabe durch Unternehmung und Bauleitung unveränderbar dokumentiert werden können.

Die Property-Set-Bibliothek erfüllt die erste Anforderung. Sie ermöglicht es, qualitätsrelevante Informationen direkt am Modellobjekt zu führen, Soll- und Istwerte bauteilbezogen zu verknüpfen und den aktuellen Prüfstatus im Modell sichtbar zu machen. Für sich allein erfüllt sie jedoch nicht die vertragliche Anforderung an einen unveränderlichen Prüfnachweis, da P-Set-Werte bei entsprechenden Schreibrechten weiterhin verändert werden können.

Die Checklist Extension und die dokumentenbasierte Übergangslösung erfüllen demgegenüber die Nachweisanforderung besser, bleiben jedoch näher am klassischen Prüfprotokoll. Sie sichern die Dokumentation über Status, Historie oder PDF-Ablage, führen aber nicht zu einer vollständig auswertbaren, modellgebundenen Datenstruktur. Damit lösen sie die Sperrlogik, ohne den eigentlichen Schritt zu strukturierten Qualitätsdaten vollständig zu vollziehen.

Für die weitere Umsetzung ergibt sich daraus eine zweigleisige Strategie. Kurz- bis mittelfristig bietet sich eine hybride Lösung an: Das unterzeichnete Prüfprotokoll wird weiterhin als verbindlicher Nachweis verwendet, digitalisiert und im CDE mit dem zugehörigen Bauteil verknüpft. Parallel dazu bleibt die Property-Set-Bibliothek als modellbezogene Status- und Informationsstruktur bestehen. Dadurch wird die vertragliche Sicherheit des heutigen Prozesses erhalten, während gleichzeitig ein erster Schritt zu einer bauteilbezogenen digitalen Qualitätssicherung umgesetzt wird.

Langfristig bleibt die modellbasierte Property-Set-Logik der fachlich geeignete Zielzustand. Damit sie auch die Anforderungen an einen verbindlichen Prüfnachweis erfüllt, müsste sie um eine API-basierte Archivierungs- und Freigabelogik erweitert werden. Denkbar wäre, dass ein definierter Statuswechsel nach Freigabe durch Unternehmung und Bauleitung automatisch einen signierten PDF-Snapshot oder einen anderweitig schreibgeschützten Datenstand erzeugt. Spätere Änderungen müssten versioniert, nachvollziehbar protokolliert und über definierte Rollenprozesse gesteuert werden.

Diese API-basierte Erweiterung übersteigt den Bearbeitungsumfang der vorliegenden Arbeit, wird aber als strategischer Zielzustand identifiziert. Sie würde die Vorteile der Variante 2, also die strukturierte modellgebundene Datenerfassung, mit der vertraglichen Nachweissicherheit des heutigen Papierprozesses verbinden. Damit könnte die ursprüngliche Zielvariante in einem nächsten Entwicklungsschritt vollständig umgesetzt werden.

Die Fallstudie zeigt somit, dass die modellbasierte Qualitätssicherung über Property Sets technisch und methodisch tragfähig ist, für eine produktive vertragliche Nutzung jedoch eine ergänzende Sperr- oder Archivierungslogik benötigt. Als operative Übergangslösung wird daher die Kombination aus unterzeichnetem PDF-Nachweis, CDE-Verlinkung und paralleler P-Set-Führung empfohlen. Als langfristiger Zielzustand wird eine API-erweiterte P-Set-Lösung festgehalten. Die daraus abgeleiteten organisatorischen und technischen Empfehlungen werden in Kapitel 8 zusammengeführt.

8 Handlungsempfehlungen

Aus der in Kapitel 7 dokumentierten Fallstudie ergibt sich, dass die digitale Qualitätskontrolle auf der Baustelle nicht allein durch ein einzelnes technisches Werkzeug eingeführt werden kann. Entscheidend ist vielmehr das Zusammenspiel von Prozessanpassung, klaren Verantwortlichkeiten, technischer Datenstruktur und Akzeptanz bei den beteiligten Personen.

Die Fallstudie hat gezeigt, dass die modellbasierte Erfassung über Property Sets grundsätzlich geeignet ist, qualitätsrelevante Informationen bauteilbezogen zu strukturieren. Gleichzeitig wurde deutlich, dass für einen vertraglich belastbaren Prüfnachweis weiterhin eine Freigabe- und Archivierungslogik erforderlich ist, welche die heutige doppelte Unterschrift funktional abbildet. Daraus ergibt sich kein unmittelbarer Ersatz des bestehenden Prüfprozesses, sondern eine schrittweise Weiterentwicklung hin zu einem modellgebundenen Soll-Zustand.

Das vorliegende Kapitel verdichtet die Erkenntnisse aus der Fallstudie zu konkreten Handlungsempfehlungen. Damit wird insbesondere die Teilforschungsfrage beantwortet, welche organisatorischen Prozessanpassungen und welche Massnahmen zur Förderung der Akzeptanz notwendig sind, um die digitale Qualitätskontrolle erfolgreich in den Baustellenalltag zu integrieren.

Das Kapitel gliedert sich in fünf Teile. Zunächst wird der aus der Fallstudie abgeleitete Soll-Prozess beschrieben (Kapitel 8.1). Anschliessend folgen Empfehlungen zur Prozessanpassung (Kapitel 8.2), zur Förderung der Akzeptanz (Kapitel 8.3) sowie zur Verbesserung von Transparenz, Nachvollziehbarkeit und Effizienz (Kapitel 8.4). Abschliessend wird die Teilforschungsfrage zusammenfassend beantwortet (Kapitel 8.5).

8.1 Konsolidierter Soll-Prozess für die digitale Qualitätskontrolle

Bevor die einzelnen Empfehlungen formuliert werden, wird der aus der Fallstudie abgeleitete Soll-Prozess für die digitale Qualitätskontrolle der Querverbindungen beschrieben. Er stellt das angestrebte Zielbild dar und zeigt, wie Erfassung, Prüfung, Freigabe, Archivierung und Weiterverwendung qualitätsrelevanter Informationen künftig zusammengeführt werden können.

Der Soll-Prozess basiert auf der in Kapitel 7 entwickelten Property-Set-Logik, ergänzt diese jedoch um eine Freigabe- und Archivierungslogik. Damit wird die zentrale Erkenntnis der Fallstudie aufgenommen: Strukturierte Qualitätsdaten am Modell sind fachlich sinnvoll, benötigen für eine vertraglich belastbare Nutzung jedoch eine nachvollziehbare und unveränderbare Sicherung des validierten Datenstands.

Der Soll-Prozess gliedert sich in fünf Schritte:

- **Erfassung:** Die Unternehmung erfasst die Istwerte je Prüfkriterium direkt am zugehörigen Modellelement. Die Eingabe erfolgt über die definierte Property-Set-Struktur, beispielsweise mit der in Kapitel 7.1 entwickelten Bibliothek „Abdichtung“ als Vorlage.
- **Prüfung:** Die Bauleitung prüft die erfassten Werte im Modellkontext und vergleicht Soll- und Ist-Informationen. Sind die Anforderungen erfüllt, wird die Prüfung freigegeben. Bei Abweichungen wird über die ToDo-/BCF-Funktion ein Korrekturauftrag erstellt und der zuständigen Person zugewiesen.
- **Beidseitige Freigabe:** Nach erfolgreicher Prüfung bestätigen Unternehmung und Bauleitung den abgeschlossenen Prüfschritt digital im CDE. Diese beidseitige Freigabe bildet funktional die heutige doppelte Unterschrift ab. Sie ist dabei nicht mit einer qualifizierten elektronischen Signatur gleichzusetzen, sondern beschreibt einen dokumentierten Freigabeschritt innerhalb des Projektworkflows.
- **Archivierung des validierten Datenstands:** Die beidseitige Freigabe löst in der Zielarchitektur eine API-basierte Archivierungslogik aus. Der validierte Datenstand wird als schreibgeschützter Nachweis gesichert, beispielsweise durch einen signierten PDF-Snapshot oder eine versionierte Archivierung im CDE. Spätere Änderungen müssen nachvollziehbar protokolliert und über definierte Rollen- und Freigabeprozesse gesteuert werden.

- **Konsolidierung und Weiternutzung:** Die gesicherten Qualitätsinformationen stehen anschließend für nachgelagerte Auswertungen zur Verfügung, beispielsweise für monatliche Berichte, Soll-Ist-Vergleiche, Abnahmevorbereitungen oder die spätere Weiterentwicklung in Richtung Ausmass und Reporting.

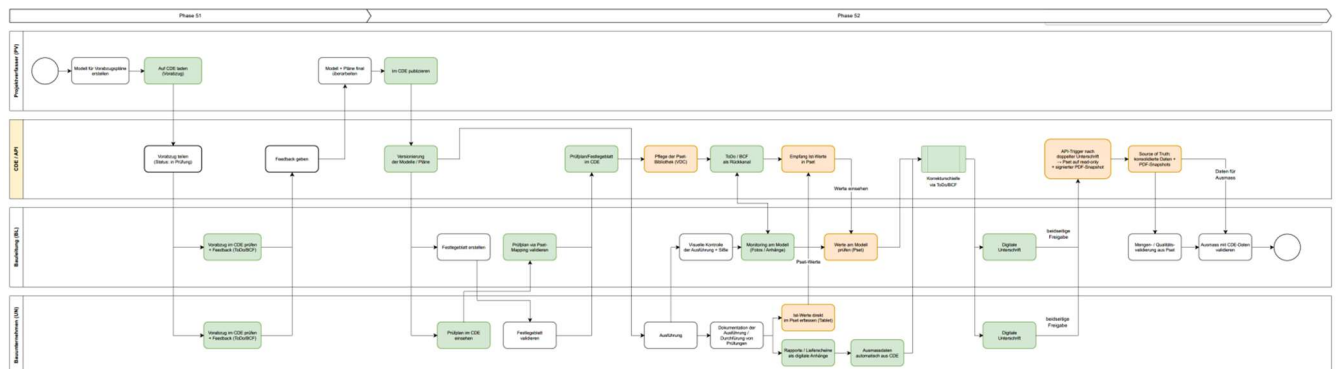


Abbildung 28, Soll Prozesse, Screenshot von Anhang G

Abbildung 28 visualisiert den Soll-Prozess als Swimlane-Diagramm mit den drei Bahnen Unternehmung, Bauleitung und CDE/API. Die Darstellung orientiert sich an der Notationslogik des Ist-Prozesses aus Kapitel 4 und ermöglicht dadurch einen direkten Vergleich zwischen heutigem Ablauf und angestrebtem Zielzustand.

Der Soll-Prozess gilt im vollständigen Umfang erst nach der Implementierung der beschriebenen API-basierten Archivierungs- und Freigabelogik. Bis zu deren Verfügbarkeit wird die in Kapitel 7.3.2 dokumentierte Übergangslösung eingesetzt: Das unterzeichnete Prüfprotokoll wird weiterhin als verbindlicher Nachweis verwendet, digitalisiert und im CDE mit dem zugehörigen Bauteil verknüpft. Die Property-Set-Bibliothek kann parallel dazu für den laufenden Modellstatus und die bauteilbezogene Strukturierung der Qualitätsinformationen genutzt werden.

Damit entsteht ein zweistufiger Umsetzungspfad: kurzfristig eine robuste, dokumentenbasierte Übergangslösung mit Modellverknüpfung; langfristig ein modellbasierter Soll-Prozess mit strukturierter Datenerfassung, beidseitiger digitaler Freigabe und gesicherter Archivierung des validierten Datenstands.

8.2 Empfehlungen zur Prozessanpassung

Die erfolgreiche Einführung der digitalen Qualitätskontrolle erfordert eine Anpassung des bestehenden Prozesses in zwei Stufen. Kurzfristig muss der heute vertraglich etablierte Prüfnachweis in eine konsistente CDE-Struktur überführt werden. Mittelfristig soll diese dokumentenbasierte Übergangslösung schrittweise durch eine modellbasierte Datenstruktur ergänzt und später durch eine API-basierte Freigabe- und Archivierungslogik erweitert werden.

Die folgenden Empfehlungen beziehen sich deshalb sowohl auf den sofort umsetzbaren Übergangsprozess als auch auf die Weiterentwicklung zur Zielarchitektur.

8.2.1 Verankerung der Übergangslösung im Tagesgeschäft

Solange die in Abschnitt 8.1 beschriebene API-basierte Archivierungs- und Freigabelogik nicht verfügbar ist, wird empfohlen, die dokumentenbasierte Übergangslösung verbindlich im Projektprozess zu verankern. Diese Lösung folgt dem heutigen Freigabeprozess: Das Prüfprotokoll wird auf der Baustelle ausgefüllt, durch Unternehmung und Bauleitung unterzeichnet, anschliessend digitalisiert und im CDE abgelegt.

Der wesentliche Unterschied zum heutigen Vorgehen liegt in der bauteilbezogenen Verknüpfung. Das unterzeichnete PDF wird nicht nur in einer Ordnerstruktur gespeichert, sondern zusätzlich mit dem zugehörigen Bauteil oder Bauabschnitt im IFC-Modell verknüpft. Dadurch bleibt die vertragliche Nachweislogik erhalten, während die Auffindbarkeit und der Bezug zum Bauwerk verbessert werden.

Damit diese Übergangslösung zuverlässig funktioniert, sollte sie nicht informell angewendet, sondern als verbindlicher Standard im Qualitätshandbuch oder in einer projektspezifischen Arbeitsanweisung festgelegt werden. Dazu gehören insbesondere Vorgaben zu Dateinamen, Ablagestruktur, Versionierung, Zuständigkeiten und Verlinkung am Bauteil. Eine Prüfung sollte erst dann als vollständig dokumentiert gelten, wenn der unterzeichnete Nachweis im CDE abgelegt und mit dem entsprechenden Modellobjekt verknüpft ist.

Diese Massnahme erzeugt keinen zusätzlichen Entwicklungsaufwand und keine neue Systemabhängigkeit. Gleichzeitig schafft sie einen ersten konsolidierten digitalen Nachweisprozess, auf dem die spätere modellbasierte Weiterentwicklung aufbauen kann.

8.2.2 Schrittweise Überführung in die Zielarchitektur

Parallel zur Übergangslösung wird empfohlen, die in Kapitel 7.1 entwickelte Property-Set-Bibliothek als modellbezogene Status- und Informationsstruktur weiterzuführen. Sie bildet das Datenrückgrat für die spätere Zielarchitektur und sollte nicht erst nach Einführung einer API-Lösung aufgebaut werden.

Die Erweiterung sollte schrittweise erfolgen. Zunächst werden die in der Fallstudie betrachteten Prüfstufen der Abdichtung weitergeführt. Anschliessend kann die Struktur auf weitere Bauteilthemen wie Verkleidung, Sohle, Anschlüsse, Bewehrung oder Werkleitungen übertragen werden. Dabei sollte die im Prototyp verwendete Logik beibehalten werden: themenbezogene Bibliotheken, Eigenschaftengruppen je Prüfstufe und möglichst einfache Feldtypen, die direkt vor Ort beantwortet werden können.

Mittelfristig sollte die API-basierte Erweiterung als eigenes Folgemodul geplant werden. Ziel dieser Erweiterung ist nicht die Ablösung der Property Sets, sondern deren Absicherung als verbindlicher Datenstand. Ein definierter Freigabeschritt durch Unternehmung und Bauleitung könnte dabei automatisch eine Archivierung des validierten Datenstands auslösen, beispielsweise als signierter PDF-Snapshot oder als versionierter Nachweis im CDE. Spätere Änderungen müssten nachvollziehbar protokolliert und über definierte Rollenprozesse gesteuert werden.

Für die Umsetzung wird empfohlen, die API-Erweiterung zunächst an einer kleinen Bauteilfamilie und einer klar abgegrenzten Prüfstufe zu testen. Erst nach erfolgreicher technischer und organisatorischer Validierung sollte die Lösung auf weitere Prüfstufen und Querverbindungen ausgeweitet werden.

8.2.3 Rollen, Verantwortlichkeiten und Pflege der Bibliothek

Die Fallstudie zeigt, dass die digitale Qualitätskontrolle nur funktioniert, wenn die Verantwortlichkeiten für Erfassung, Prüfung, Freigabe und Pflege eindeutig geregelt sind. Ohne klare Rollen besteht das Risiko, dass Property Sets uneinheitlich gepflegt, Nachweise unterschiedlich abgelegt oder Modellverknüpfungen nicht konsequent erstellt werden.

Empfohlen wird folgende Rollenverteilung:

- Modellverantwortliche / VDC: Aufbau, Versionierung und Veröffentlichung der Property-Set-Bibliotheken im produktiven Trimble-Connect-Projekt. Dazu gehört auch die Prüfung, ob neue Modellversionen Auswirkungen auf bestehende Zuweisungen haben.
- Unternehmung: Erfassung der Istwerte vor Ort, Bereitstellung der unterzeichneten Prüfnachweise und Ablage beziehungsweise Verknüpfung der Dokumente gemäss Projektvorgaben.
- Bauleitung: Prüfung der eingetragenen Werte und Nachweise, Freigabe der Prüfschritte, Erstellung von Korrekturaufträgen über ToDo-/BCF-Funktionen sowie Kontrolle der vollständigen Dokumentation im CDE.
- Bauherrschaft / Projektleitung: Festlegung der verbindlichen Projektvorgaben, Entscheidung über zusätzliche Lizenzen oder API-Erweiterungen und formale Anerkennung der digitalen Nachweisprozesse.

Zusätzlich wird empfohlen, ein leichtgewichtiges Versionierungsregister im CDE zu führen. Darin wird dokumentiert, welche Version der Property-Set-Bibliothek verwendet wird, wann Änderungen vorgenommen wurden und welche Modellversion davon betroffen ist. Geometrische Modelländerungen oder neue IFC-Versionen sollten einen formalen Abgleich der P-Set-Zuweisungen auslösen.

Diese organisatorische Verankerung ist entscheidend, damit die digitale Qualitätskontrolle nicht von einzelnen Personen abhängig bleibt, sondern über mehrere Bauphasen und Beteiligte hinweg konsistent angewendet werden kann.

8.3 Empfehlungen zur Förderung der Akzeptanz

Die Fallstudie zeigt, dass die Akzeptanz digitaler Qualitätskontrolle nicht allein von der technischen Funktionalität abhängt. Entscheidend ist, ob die Lösung im Baustellenalltag einfach anwendbar ist, bestehende Verantwortlichkeiten respektiert und einen unmittelbar erkennbaren Nutzen für die beteiligten Personen erzeugt. Insbesondere im Untertagebau muss die Anwendung robust, verständlich und mit den vorhandenen Arbeitsabläufen vereinbar sein.

Die folgenden Empfehlungen zielen deshalb darauf ab, die digitale Qualitätskontrolle schrittweise einzuführen und die Mitarbeitenden nicht durch zusätzliche Parallelprozesse zu belasten.

8.3.1 Schulung und Befähigung der Mitarbeitenden

Für die Einführung wird ein kurzes, bauteilbezogenes Schulungsformat empfohlen. Die Schulung sollte nicht als allgemeine Softwareeinführung aufgebaut sein, sondern direkt am konkreten Prüfprozess der Querverbindung ansetzen. Im Mittelpunkt stehen dabei die drei praktischen Fragen: Wo finde ich das richtige Bauteil? Wo trage ich den Prüfwert ein? Wie erkenne ich, ob ein Nachweis vollständig dokumentiert ist?

Für Poliere, Bauführer und Bauleitung genügt zu Beginn ein kompakter Einstieg von maximal 30 Minuten direkt am Tablet oder am Baustellenarbeitsplatz. Dabei sollte mit denselben Modellansichten, Property Sets und Dokumenten gearbeitet werden, die später im produktiven Ablauf verwendet werden. Dadurch wird die Hürde zur Anwendung reduziert und der Nutzen unmittelbar sichtbar.

Nach den ersten zwei bis drei realen Anwendungsfällen sollte ein kurzer Refresh durchgeführt werden. Dieser dient dazu, wiederkehrende Bedienfehler, unklare Feldbezeichnungen oder Probleme bei der Ablage und Verlinkung frühzeitig zu erkennen. Die Rückmeldungen aus diesem Refresh sollten direkt in die Property-Set-Bibliothek, die Arbeitsanweisung und die Ablagestruktur einfließen.

Das Schulungsmaterial sollte bewusst einfach gehalten werden. Empfohlen werden kurze Schritt-für-Schritt-Anleitungen mit Screenshots aus dem Projekt, nicht umfangreiche Handbücher. Ziel ist es, die Anwendung in den bestehenden Arbeitsablauf einzubetten und nicht als zusätzliche administrative Aufgabe wahrnehmbar zu machen.

8.3.2 Iterative Einführung über die nächsten Querverbindungen

Die Einführung sollte nicht projektweit in einem einzigen Schritt erfolgen. Empfohlen wird eine iterative Skalierung entlang der tatsächlichen Bauabfolge. Ausgangspunkt bilden die in der Fallstudie betrachteten Prüfstufen der QV04. Danach kann die Anwendung auf weitere Prüfstufen derselben Querverbindung und anschliessend auf die nachfolgende QV07 übertragen werden.

Dieses Vorgehen hat mehrere Vorteile. Erstens bleibt der Einführungsumfang überschaubar. Zweitens können Erfahrungen aus der Anwendung unmittelbar in die Weiterentwicklung der Bibliothek und der Arbeitsanweisung einfließen. Drittens werden erste Erfolge schnell sichtbar, was die Akzeptanz bei den Beteiligten erhöht.

Jede Iteration sollte mit einer kurzen Rückmeldung der Anwenderinnen und Anwender abgeschlossen werden. Dabei ist zu prüfen, ob die Feldstruktur verständlich ist, ob die Modellverknüpfung funktioniert, ob die Ablage der Nachweise eindeutig ist und ob der Prozess im Tagesgeschäft tatsächlich Zeit spart oder zumindest keine zusätzliche Belastung erzeugt. Die Ergebnisse dieser Rückmeldungen sollten im CDE dokumentiert und bei der nächsten Iteration berücksichtigt werden.

Die iterative Einführung unterstützt damit nicht nur die technische Optimierung, sondern auch den kulturellen Übergang von einer papierorientierten zu einer modellbezogenen Qualitätskontrolle.

8.3.3 Vertragliche und kulturelle Einbettung

Die interne Validierung in Kapitel 7 hat gezeigt, dass digitale Qualitätskontrolle nur dann akzeptiert wird, wenn sie die Anforderungen des heutigen Freigabeprozesses zuverlässig erfüllt. Besonders relevant ist dabei die Nachweissicherheit nach der beidseitigen Freigabe durch Unternehmung und Bauleitung. Solange diese Anforderung nicht eindeutig geregelt ist, wird die digitale Lösung im Projektalltag nur begrenzt als Ersatz oder Ergänzung zum Papierprozess akzeptiert.

Empfohlen wird daher, die dokumentenbasierte Übergangslösung und die spätere API-basierte Archivierungs- und Freigabelogik in den Projektvorgaben klar zu beschreiben. Dazu gehört insbesondere die Festlegung, welche digitale Ablageform als vollständiger Prüfnachweis gilt, wer die Freigabe erteilen darf, wie Änderungen nach der Freigabe behandelt werden und welche Version im Konfliktfall massgebend ist.

Die Bauherrschaft und die Projektleitung spielen dabei eine zentrale Rolle. Sie müssen die digitale Qualitätskontrolle nicht nur technisch ermöglichen, sondern auch organisatorisch stützen. Dazu gehören klare Vorgaben im Qualitätshandbuch, die Bereitstellung der notwendigen Lizenzen, die Anerkennung definierter digitaler Nachweisformen und eine sichtbare Rückendeckung gegenüber den beteiligten Unternehmen.

Kulturell ist entscheidend, dass die digitale Qualitätskontrolle nicht als zusätzliche Kontrollschicht wahrgenommen wird. Sie sollte als Vereinfachung des bestehenden Prozesses eingeführt werden: gleiche fachliche Verantwortung, klarere Ablage, bessere Auffindbarkeit und weniger manuelle Nacharbeit. Dadurch steigt die Wahrscheinlichkeit, dass die Lösung im Baustellenalltag tatsächlich genutzt und nicht nur formal eingeführt wird.

8.4 Empfehlungen zur Verbesserung von Transparenz, Nachvollziehbarkeit und Effizienz

Die in Kapitel 5.3 definierten Bewertungskriterien zeigen, dass der Mehrwert der digitalen Qualitätskontrolle insbesondere in drei Bereichen liegt: Transparenz, Nachvollziehbarkeit und Effizienz. Diese drei Wirkungsdimensionen werden im Folgenden als Soll-Ist-Vergleich zwischen dem heutigen analog-hybriden Verfahren und der vorgeschlagenen Lösung konkretisiert.

Dabei ist zu unterscheiden zwischen der kurzfristigen Übergangslösung und dem langfristigen Zielzustand. Bereits die dokumentenbasierte Verknüpfung im CDE verbessert die Auffindbarkeit und Nachvollziehbarkeit der Prüfnachweise. Die vollständigen Effizienzgewinne entstehen jedoch erst, wenn die modellbasierte Datenerfassung über Property Sets mit einer Freigabe-, Archivierungs- und Auswertungslogik verbunden wird.

8.4.1 Transparenz

Im heutigen Prozess liegen qualitätsrelevante Informationen teilweise in Papierform, als PDF, in E-Mail-Verläufen oder in individuell geführten Ordnerstrukturen vor. Dadurch ist nicht immer unmittelbar ersichtlich, ob ein bestimmter Prüfnachweis vorhanden ist, welche Version aktuell ist und welchem Bauteil oder Bauabschnitt der Nachweis zugeordnet werden muss.

Empfohlen wird deshalb eine verbindliche Ablage aller qualitätsrelevanten Prüfnachweise im CDE. Jeder Nachweis soll mit dem zugehörigen Bauteil, Bauabschnitt oder Modellbereich verknüpft werden. Dadurch entsteht eine einheitliche Informationsbasis, über die Bauleitung, Unternehmung und weitere Projektbeteiligte auf denselben Datenstand zugreifen können.

Für die Transparenz ist entscheidend, dass die Ablage nicht optional bleibt. Eine Prüfung sollte erst dann als vollständig dokumentiert gelten, wenn der zugehörige Nachweis im CDE abgelegt und mit dem entsprechenden Modellobjekt oder Bauabschnitt verknüpft ist. Damit wird der Status der Qualitätskontrolle für alle Beteiligten nachvollziehbarer und weniger abhängig von individuellen Ablagepraktiken einzelner Personen.

Im langfristigen Zielzustand wird diese Transparenz durch die Property-Set-Struktur weiter erhöht. Prüfinformationen sind dann nicht nur als Dokument auffindbar, sondern direkt am Modellobjekt sichtbar. Dadurch kann der Prüfstatus eines Bauteils schneller erkannt und mit den hinterlegten Sollwerten verglichen werden.

8.4.2 Nachvollziehbarkeit

Nachvollziehbarkeit bedeutet, dass zu einem späteren Zeitpunkt erkennbar bleibt, wer welche Prüfung durchgeführt, geprüft, freigegeben oder beanstandet hat. Im heutigen Prozess wird diese Nachvollziehbarkeit vor allem über unterzeichnete Prüfprotokolle, E-Mail-Verläufe und abgelegte PDF-Dokumente hergestellt. Diese Nachweise sind grundsätzlich belastbar, jedoch oft nicht direkt mit dem Modell oder dem betroffenen Bauteil verknüpft.

Die empfohlene Übergangslösung verbessert diese Situation, indem das unterzeichnete Prüfprotokoll weiterhin als verbindlicher Nachweis dient, aber zusätzlich im CDE bauteilbezogen abgelegt wird. Dadurch entsteht ein direkter Zusammenhang zwischen Bauteil, Prüfdokument und Freigabestatus. Rückfragen können schneller geklärt werden, da der relevante Nachweis nicht mehr nur über Dateinamen oder Ordnerstrukturen gesucht werden muss.

Im Zielzustand wird diese Nachvollziehbarkeit durch eine versionierte Freigabe- und Archivierungslogik ergänzt. Nach beidseitiger Freigabe durch Unternehmung und Bauleitung soll der validierte Datenstand gesichert und spätere Änderungen nachvollziehbar dokumentiert werden. Dadurch entsteht ein durchgängiger Audit-Pfad vom geprüften Bauteil über den digitalen Prüfstatus bis zum archivierten Freigabenachweis.

Empfohlen wird, diese Nachweislogik auch in die regelmässige Berichterstattung an Bauherrschaft und Projektleitung einzubinden. Dadurch wird die gewonnene Nachvollziehbarkeit nicht nur intern nutzbar, sondern auch für die Steuerung und Überwachung des Projekts sichtbar.

8.4.3 Effizienz

Effizienzgewinne sind für die digitale Qualitätskontrolle relevant, weil Prüf- und Freigabeprozesse direkte Auswirkungen auf nachgelagerte Arbeiten, Abnahmen und Entscheidungen im Bauablauf haben. Der Nutzen liegt deshalb nicht nur in einer schnelleren Datenerfassung, sondern vor allem darin, Informationsverluste, Suchaufwand und manuelle Übertragungen zu reduzieren.

Im heutigen Prozess entstehen Verzögerungen insbesondere dadurch, dass Prüfinformationen vor Ort erfasst, anschliessend in Protokolle übertragen, per E-Mail oder Dateiablage weitergegeben und für Ausmass, Berichte oder Freigaben erneut gesucht oder manuell ausgewertet werden müssen.

Die Übergangslösung reduziert zunächst vor allem den Such- und Abstimmungsaufwand. Durch die Ablage im CDE und die Verlinkung am Modellobjekt sind Prüfnachweise schneller auffindbar und eindeutiger dem Bauwerk zugeordnet. Dadurch können Rückfragen zwischen Unternehmung, Bauleitung und Büro reduziert werden.

Der grössere Effizienzgewinn entsteht im langfristigen Zielzustand, weil Prüfinformationen nicht mehr nur als Dokumente, sondern als strukturierte, objektbezogene Daten geführt werden. Werden Soll- und Istwerte direkt am Modellobjekt erfasst und nach der Freigabe gesichert, können diese Informationen für Berichte, Soll-Ist-Vergleiche oder Abnahmevorbereitungen weiterverwendet werden. Dadurch sinkt der Bedarf an manueller Übertragung zwischen Prüfprotokoll, Kontrollübersicht und nachgelagerten Auswertungen.

Empfohlen wird, die Effizienzgewinne ab der ersten produktiven Anwendung mit einfachen Kennzahlen zu messen. Geeignet sind insbesondere:

- Durchlaufzeit von der Prüfung bis zur Freigabe
- Anzahl Korrekturschleifen pro Prüfstufe
- Anteil vollständig im CDE dokumentierter Prüfnachweise

Diese Kennzahlen sind bewusst einfach gehalten und können ohne grossen Zusatzaufwand erhoben werden. Sie ermöglichen es, den Nutzen der digitalen Qualitätskontrolle nicht nur qualitativ zu beschreiben, sondern im Projektverlauf sichtbar zu machen.

8.5 Zusammenfassende Antwort auf die Teilforschungsfrage

Die in diesem Kapitel formulierten Handlungsempfehlungen beantworten die Teilforschungsfrage, welche organisatorischen Prozessanpassungen und welche Massnahmen zur Förderung der Akzeptanz notwendig sind, um die digitale Qualitätskontrolle erfolgreich in den Baustellenalltag zu integrieren.

Die Fallstudie zeigt, dass dafür drei Hebel zusammenwirken müssen. Erstens ist die heutige papier- und PDF-basierte Prüfpraxis nicht abrupt zu ersetzen, sondern zunächst als dokumentenbasierte Übergangslösung verbindlich im CDE zu verankern. Durch die Ablage und Verlinkung der unterzeichneten Prüfnachweise am Modell wird der bestehende Nachweisprozess beibehalten, aber transparenter und bauteilbezogener organisiert.

Zweitens muss die modellbasierte Datenerfassung über Property Sets parallel weitergeführt und schrittweise ausgebaut werden. Sie bildet die Grundlage für eine strukturierte, auswertbare und modellgebundene Qualitätssicherung. Damit diese Datenstruktur auch für verbindliche Freigaben genutzt werden kann, ist langfristig eine ergänzende API-basierte Freigabe- und Archivierungslogik erforderlich.

Drittens hängt die erfolgreiche Einführung wesentlich von der Akzeptanz der beteiligten Personen ab. Diese entsteht nicht durch zusätzliche Vorgaben allein, sondern durch einfache Bedienung, kurze bauteilbezogene Schulungen, klare Rollen, eine iterative Einführung über die nächsten Querverbindungen und eine sichtbare Rückendeckung durch Bauherrschaft und Projektleitung.

Damit wird die digitale Qualitätskontrolle nicht als zusätzlicher Parallelprozess eingeführt, sondern als schrittweise Weiterentwicklung der bestehenden Qualitätssicherung. Kurzfristig erhöht sie Transparenz und Nachvollziehbarkeit durch eine konsistente CDE-Ablage mit Modellbezug. Langfristig ermöglicht sie eine durchgängige, modellbasierte und auswertbare Qualitätskontrolle, sofern die technischen und organisatorischen Voraussetzungen für Freigabe, Archivierung und Weiterverwendung geschaffen werden.

9 Resultate

Das vorliegende Kapitel verdichtet die in den Kapiteln 4 bis 8 erarbeiteten Ergebnisse zu einer systematischen Übersicht. Die Darstellung erfolgt deskriptiv: Daten werden ausgewiesen, Aussagen werden zusammengefasst und zentrale Ergebnisse in tabellarischer Form gegenübergestellt. Eine vertiefte Interpretation der Ergebnisse, ihre Einordnung in den Forschungsstand sowie der Ausblick auf weiterführende Arbeiten erfolgen in Kapitel 10.

Strukturell folgt die Auswertung dem Bearbeitungsfluss der Arbeit. Zunächst werden die Ergebnisse der Fachgespräche zusammengefasst (Kapitel 9.1). Anschliessend folgt die Auswertung der Variantenstudie (Kapitel 9.2). Danach werden die Ergebnisse der prototypischen Umsetzung und Validierung in der Fallstudie dargestellt (Kapitel 10). Abschliessend werden der heutige Zustand, die Übergangslösung und der langfristige Zielzustand anhand der Bewertungskategorien aus Kapitel 5.3.2 gegenübergestellt (Kapitel 9.4).

9.1 Auswertung der Datenerhebung

Die empirische Datenerhebung umfasste 18 semi-strukturierte Fachgespräche mit Schlüsselpersonen aus Bauleitung, Ausführung, Planung, Digitalisierung und Bauherrschaft. Die Gespräche wurden in zwei Erhebungsphasen durchgeführt. Die erste Phase fokussierte auf die heutige Baustellenpraxis, die operative Qualitätssicherung und die Schnittstellen zwischen Bauleitung und ausführender Unternehmung. Die zweite Phase diente der Ergänzung durch Perspektiven aus Planung, BIM-/VDC-Management, Systemanwendung und Bauherrschaft.

Tabelle 11, Verteilung der 17 Befragten nach Funktion und Erhebungsphase
Tabelle 11 fasst die Verteilung der Befragten nach Funktion und Erhebungsphase zusammen. Die vollständigen Angaben zu Personen, Firmen und Fachgebieten sind in Kapitel 10 dokumentiert.

Tabelle 11, Verteilung der 17 Befragten nach Funktion und Erhebungsphase

Funktion / Rolle	Phase 1: Bauleitung & Ausführung	Phase 2: Planung & Digitalisierung	Total
Schichtbauleiter	5	–	5
Bauführer / Polier	4	–	4
Losleiter/ Chefbauleiter	2	–	2
BIM-Management / BIM-Koordination / Modellierung	–	4	4
Projektingenieur Planung	–	1	1
Trimble Connect Specialist	–	1	1
Bauherrschaft	–	1	1
Total	11	7	18

Aus den Fachgesprächen wurden 14 konsolidierte Anforderungen entlang der vier Module des Fragenkatalogs abgeleitet. Diese Anforderungen bilden die Grundlage für die Variantenbewertung in Kapitel 6 sowie für die Validierung des Prototyps in Kapitel 7. Tabelle 12 zeigt die Verteilung der Anforderungen nach Modul.

Tabelle 12, Anzahl der aus den Fachgesprächen abgeleiteten Anforderungen pro Modul

Modul	Themenfeld	Anzahl konsolidierter Anforderungen
A	Prozessanalyse: Versionskontrolle, Single Source of Truth, Übergang Phase 51 → 52	2
B	Operative Realität: Reaktionszeit, Tablet, Offline-Nutzung, Authentifizierung, geführte Checklisten	5
C	Strategie und Vertrag: digitale Validierung, Vertragsintegration, Rückverfolgbarkeit	3
D	Technische Implementierung: Trimble-Connect-Funktionen, API als Folgeschritt, CSV-/Excel-Export	4
Total		14

Die Datenerhebung zeigt damit die fachliche Breite der Anforderungen: Neben technischen Fragen zur Plattformnutzung wurden insbesondere operative, organisatorische und vertragliche Aspekte als relevante Bedingungen für eine digitale Qualitätskontrolle identifiziert.

9.2 Auswertung der Variantenstudie

Die in Kapitel 6.2 entwickelten Lösungsvarianten wurden anhand der in Kapitel 5.3.2 definierten Evaluierungskriterien qualitativ bewertet. Die Bewertung erfolgte auf der Skala niedrig / mittel / hoch und berücksichtigt neben dem digitalen Potenzial auch die technische Machbarkeit, den Implementierungsaufwand und die organisatorische Eignung im Pilotkontext.

Tabelle 13 fasst die Gesamtbewertung der drei Varianten zusammen. Die detaillierte kriterienspezifische Bewertung ist in Kapitel 6.2 dokumentiert.

Tabelle 13, Übersicht der Gesamtbewertungen der drei Lösungsvarianten

Variante	Datenform	Maschinenlesbarkeit	Technische Grundlage	Gesamtbewertung
V1 – Dokumente verknüpfen	PDF-Dokumente, modellbezogen verlinkt	nein	Trimble Connect Basic	mittel
V2 – Daten im Modell erfassen	Property Sets / strukturierte Attribute	ja	Trimble Connect Pro	hoch
V3 – Folgeprozesse automatisieren	strukturierte Daten mit API-Anbindung	ja	Trimble Connect Pro mit Schnittstellenentwicklung	mittel

Variante 2 weist in der Variantenstudie die höchste Gesamtbewertung auf. Sie verbindet die strukturierte Erfassung qualitätsrelevanter Informationen am Modell mit einer im Pilotkontext noch beherrschbaren technischen Umsetzung. Aus diesem Grund wurde Variante 2 als Zielvariante für die prototypische Umsetzung in der Fallstudie ausgewählt.

9.3 Auswertung der Fallstudie

Die Fallstudie in Kapitel 7 diente dazu, die in der Variantenstudie ausgewählte Zielvariante prototypisch zu prüfen. Im Mittelpunkt standen die modellbasierte Erfassung qualitätsrelevanter Informationen über Property Sets, die formale Validierung gegenüber dem Anforderungskatalog sowie die Überprüfung der Lösung im Hinblick auf den realen Baustellen- und Abnahmeprozess.

Die Ergebnisse werden im Folgenden in drei Schritten dargestellt: Zunächst wird die Konfiguration des Prototyps zusammengefasst (Kapitel 9.3.1), anschliessend die formale Validierung gegenüber dem Anforderungskatalog ausgewiesen (Kapitel 9.3.2) und abschliessend der Status der aus der internen Validierung abgeleiteten Verbesserungsmassnahmen dargestellt (Kapitel 9.3.3).

9.3.1 Konfiguration des Prototyps

Die in Kapitel 7.1 dokumentierte Konfiguration des Prototyps umfasst ein eigenständiges Testprojekt in Trimble Connect Pro, das Innenausbau-Modell der QV04 sowie eine Property-Set-Bibliothek für den Bereich Abdichtung. Die Bibliothek enthält zwei Eigenschaftengruppen für die Prüfstufen Untergrund und Verlegen Abdichtungssystem.

Insgesamt wurden zwölf Prüfkriterien definiert und den relevanten Bauteilfamilien zugewiesen. Tabelle 14 fasst die zentralen Kennzahlen der prototypischen Konfiguration zusammen.

Tabelle 14, Kennzahlen der prototypischen Konfiguration im Testprojekt

Element	Anzahl / Bezeichnung
Testprojekt in Trimble Connect Pro	1 („Test MTH“)
Importierte IFC-Modelle	1 Innenausbau-Modell QV04
Einbezogene Bauteilfamilien	3: Abdichtungsträger, Abdichtungssystem, Fugenband
Property-Set-Bibliotheken	1: „Abdichtung“
Eigenschaftengruppen	2: Prüfstufe 1 – Untergrund; Prüfstufe 2 – Verlegen Abdichtungssystem
Definierte Prüfkriterien	12: 6 in Prüfstufe 1, 6 in Prüfstufe 2
Verwendete Datentypen	3: Wahr/Falsch, Datum, Dropdown-Auswahl

Die Konfiguration zeigt, dass der ausgewählte Ausschnitt des Kontrollplans in eine kompakte und bauteilbezogene digitale Struktur überführt werden konnte. Die Umsetzung beschränkt sich bewusst auf einen abgegrenzten Prüfumfang, bildet jedoch die Grundlogik für eine spätere Erweiterung auf weitere Prüfstufen und Bauteile ab.

9.3.2 Validierung gegenüber dem Anforderungskatalog

Die formale Validierung des Prototyps erfolgte anhand der 14 aus den Fachgesprächen abgeleiteten Anforderungen. Für jedes Modul wurde geprüft, ob die jeweilige Anforderung im Testprojekt erfüllt, teilweise erfüllt oder nicht erfüllt wurde. Tabelle 15 fasst das Ergebnis je Modul zusammen.

Tabelle 15, Ergebnis der formalen Validierung des Prototyps gegenüber den Anforderungen

Modul	Themenfeld	Erfüllt	Teilweise / nicht erfüllt
A	Prozessanalyse	2 / 2	0
B	Operative Realität	5 / 5	0
C	Strategie und Vertrag	2 / 3	1: Sperranforderung nach beidseitiger Freigabe
D	Technische Implementierung	4 / 4	0
Total		13 / 14	1

Die formale Validierung zeigt, dass 13 von 14 Anforderungen im Prototyp erfüllt werden konnten. Die einzige nicht vollständig erfüllte Anforderung betrifft jedoch einen zentralen Punkt: die unveränderbare Sicherung eines validierten Prüfeintrags nach beidseitiger Freigabe durch Unternehmung und Bauleitung. Diese Einschränkung führte zur vertieften Prüfung alternativer beziehungsweise ergänzender Massnahmen in der zweiten Iteration.

9.3.3 Ergebnisse der iterativen Verbesserung

Aus der internen Validierung wurden vier mögliche Massnahmen abgeleitet, um die in Abschnitt 9.3.2 identifizierte Lücke zwischen strukturierter Property-Set-Erfassung und unveränderbarem Prüfnachweis zu behandeln. Die Massnahmen wurden in Kapitel 7.2.3 gegenübergestellt und in Kapitel 7.3 teilweise vertieft geprüft.

Tabelle 16 zeigt den Status der vier Massnahmen nach Abschluss der Fallstudie.

Tabelle 16, Status der vier Massnahmen nach Abschluss der Verbesserungsphase

Nr.	Massnahme	Status nach Kapitel 7.3
1	Property Sets mit Checklist Extension	Geprüft am 8. Mai 2026; erfüllt die Protokollfunktion teilweise, bietet jedoch keinen ausreichenden funktionalen Mehrwert gegenüber dem etablierten Papier-/PDF-Verfahren.
2	Prüfprotokolle über strukturierte ToDos	Als möglicher Rückfallpfad dokumentiert; aufgrund der begrenzten Eignung für klassische Prüfprotokolle nicht weiterverfolgt.
3	Property Sets mit API-basierter Archivierung des validierten Datenstands	Als langfristiger Zielzustand identifiziert; in Kapitel 8 als strategische Empfehlung aufgenommen.
4	Trimble Connect Forms / Viewpoint Field View	Verworfen, da die Lösung nicht Bestandteil der eingesetzten Trimble-Connect-Umgebung ist.

Als Ergebnis der iterativen Verbesserung wird eine zweistufige Umsetzung abgeleitet. Kurzfristig eignet sich die dokumentenbasierte Verknüpfung nach Variante 1 als operative Übergangslösung. Langfristig bleibt die modellbasierte Property-Set-Struktur massgebend, muss jedoch durch eine API-basierte Freigabe- und Archivierungslogik ergänzt werden, um die Anforderungen an einen verbindlichen Prüfnachweis vollständig abzudecken.

9.4 Synthetische Gegenüberstellung der drei Zustände

Zum Abschluss des Ergebniskapitels werden die drei zentralen Zustände der Arbeit gegenübergestellt: der heutige analog-hybride Ist-Zustand, die operative Übergangslösung und der langfristige Zielzustand. Die Gegenüberstellung erfolgt entlang der vier Bewertungskategorien aus Kapitel 5.3.2.

Die Einstufung folgt der qualitativen Skala niedrig / mittel / hoch. Sie fasst die in den vorhergehenden Kapiteln dokumentierten Ergebnisse zusammen und dient als Grundlage für die anschliessende Diskussion in Kapitel 10.

Tabelle 17, Vergleich von Ist-Zustand, Übergangslösung und Zielzustand

Bewertungskategorie	Ist-Zustand analog/hybrid	Übergangslösung dokumentenbasiert mit Modellverknüpfung	Zielzustand API-erweiterte P-Set-Lösung
Prozess-Effizienz und Latenz	niedrig	mittel	hoch
Datenintegrität und Medienbrüche	niedrig	mittel	hoch
Technische Machbarkeit / Integrationsaufwand	hoch	hoch	mittel
Vertragliche und organisatorische Akzeptanz	hoch	hoch	mittel bis hoch

Die Gegenüberstellung zeigt, dass die Übergangslösung gegenüber dem heutigen Ist-Zustand insbesondere bei Prozess-Effizienz, Latenz, Datenintegrität und Medienbrüchen eine Verbesserung darstellt, ohne die technische Machbarkeit oder die bestehende vertragliche Akzeptanz wesentlich zu reduzieren. Der Zielzustand erreicht in den ersten beiden Kategorien die höchste Einstufung, ist jedoch aufgrund der erforderlichen API-basierten Erweiterung mit höherem Integrationsaufwand verbunden.

Die vertragliche und organisatorische Akzeptanz des Zielzustands wird deshalb als mittel bis hoch eingestuft. Sie hängt davon ab, ob die digitale Freigabe- und Archivierungslogik formal in den Projektvorgaben anerkannt, technisch zuverlässig umgesetzt und von den beteiligten Parteien akzeptiert wird.

10 Diskussion

Dieses Kapitel ordnet die Ergebnisse der Arbeit in einen übergeordneten Zusammenhang ein und bewertet deren Reichweite kritisch. Zunächst werden die zentralen Befunde interpretiert, anschliessend die Forschungsfragen beantwortet sowie Grenzen und mögliche Weiterentwicklungen aufgezeigt.

10.1 Interpretation der Ergebnisse

Die Ergebnisse der Arbeit zeigen, dass die Digitalisierung der Qualitätskontrolle bei den Querverbindungen nicht primär an der Verfügbarkeit digitaler Werkzeuge scheitert. Plattformen wie Trimble Connect, IFC-Modelle, Property Sets, ToDo-/BCF-Funktionen und Schnittstellen bieten grundsätzlich geeignete Bausteine, um Qualitätsinformationen digital zu erfassen und bauteilbezogen zu strukturieren. Die zentrale Herausforderung liegt vielmehr darin, diese technischen Möglichkeiten sinnvoll mit den bestehenden Kontroll-, Freigabe- und Nachweisprozessen auf der Baustelle zu verbinden.

Die Analyse des Ist-Zustands hat gezeigt, dass der heutige Prozess fachlich grundsätzlich funktioniert, jedoch stark dokumenten- und personenabhängig ist. Prüfinformationen werden in Protokollen, PDFs, E-Mails, Ordnerstrukturen oder Papierdokumenten geführt. Dadurch entstehen Medienbrüche, Suchaufwand und Verzögerungen zwischen der Erfassung vor Ort und der Nutzung der Informationen im Büro. Besonders kritisch ist, dass Qualitätsdaten zwar dokumentiert werden, aber nur begrenzt maschinenlesbar und kaum direkt mit dem betroffenen Bauteil im Modell verknüpft sind.

Die Variantenstudie zeigt, dass eine rein dokumentenbasierte Digitalisierung zwar die Ablage verbessert, das strukturelle Problem aber nur teilweise löst. Variante 1 schafft eine bessere Auffindbarkeit und eine stärkere Verbindung zwischen Prüfnachweis und Bauteil, belässt die eigentlichen Prüfinformationen jedoch im PDF. Variante 2 geht einen wesentlichen Schritt weiter, indem qualitätsrelevante Informationen über Property Sets direkt am Modellobjekt geführt werden. Dadurch entsteht ein modellbezogener Qualitätsstatus, der für Transparenz, Nachvollziehbarkeit und spätere Auswertungen deutlich wertvoller ist. Variante 3 stellt den langfristig leistungsfähigsten Ansatz dar, setzt jedoch eine API-basierte Erweiterung sowie zusätzliche technische, organisatorische und vertragliche Voraussetzungen voraus.

Die Fallstudie bestätigt diese Einschätzung. Die Property-Set-Bibliothek „Abdichtung“ zeigt, dass sich ausgewählte Prüfanforderungen aus dem Kontrollplan in eine strukturierte, bauteilbezogene digitale Form überführen lassen. Damit wird der Kontrollplan nicht mehr nur als separates Dokument verstanden, sondern als Informationsgrundlage, die direkt mit dem Modell verbunden werden kann. Gleichzeitig zeigt die Validierung eine entscheidende Grenze: Property Sets allein erfüllen nicht die Anforderung an einen unveränderbaren, beidseitig freigegebenen Prüfnachweis. Damit reicht die modellbasierte Datenstruktur für sich allein nicht aus, um den heutigen papiergebundenen Freigabeprozess vollständig zu ersetzen.

Die wichtigste Erkenntnis der Arbeit liegt daher in der Unterscheidung zwischen Datenstruktur und Nachweissicherheit. Property Sets eignen sich, um Qualitätsinformationen strukturiert, bauteilbezogen und auswertbar zu führen. Für den produktiven Einsatz im vertraglichen Kontext braucht es jedoch ergänzend eine Freigabe-, Archivierungs- und Versionierungslogik. Kurzfristig kann diese Anforderung über die dokumentenbasierte Übergangslösung erfüllt werden. Langfristig ist eine API-basierte Erweiterung notwendig, um die Vorteile der modellgebundenen Datenstruktur mit der Nachweissicherheit des heutigen Papierprozesses zu verbinden.

Damit bestätigt die Arbeit den in der Literatur identifizierten Befund, dass der Mehrwert digitaler Qualitätskontrolle nicht allein durch neue Technologien entsteht. Entscheidend ist die prozessuale Einbettung: klare Rollen, eindeutige Datenstrukturen, definierte Freigabeschritte, nachvollziehbare Verantwortlichkeiten und Akzeptanz bei den Beteiligten. Die digitale Lösung muss den bestehenden Qualitätsprozess daher nicht abrupt ersetzen, sondern ihn schrittweise in eine konsistentere, transparentere und besser auswertbare Form überführen.

10.2 Beantwortung der Forschungsfragen

Die Hauptfragestellung der Arbeit lautete:

Wie kann die Qualitätskontrolle auf der Baustelle durch die Integration von Kontrollplänen in ein Common Data Environment (CDE) im Rahmen eines BIM2FIELD-Workflows effizienter, konsistenter und mit einer besseren Qualität umgesetzt werden?

Die Arbeit zeigt, dass dies durch eine stufenweise Integration des Kontrollplans in eine modell- und CDE-basierte Datenstruktur möglich ist. Der Kontrollplan muss dafür nicht als vollständiges Dokument digitalisiert werden. Entscheidend ist vielmehr, die relevanten Prüfpunkte bauteil- und phasenbezogen zu strukturieren und in eine Form zu überführen, die im Modell und im CDE nutzbar ist. Die Fallstudie zeigt dies exemplarisch anhand der Prüfstufen Untergrund und Abdichtungssystem der QV04.

Eine effizientere Qualitätskontrolle entsteht zunächst durch die zentrale Ablage und Verknüpfung der Prüfnachweise im CDE. Dadurch werden Suchaufwand, unklare Ablageorte und Medienbrüche reduziert. Eine konsistentere Qualitätskontrolle entsteht durch Property Sets, weil Prüfinformationen nicht mehr frei verteilt in einzelnen Dokumenten geführt werden, sondern am betroffenen Modellelement strukturiert vorliegen. Eine höhere Qualität der Nachweisführung entsteht schliesslich dann, wenn diese Datenstruktur mit einer Freigabe- und Archivierungslogik verbunden wird, welche validierte Datenstände nachvollziehbar sichert.

Die erste Teilfragestellung lautete:

Welche Informationen und Prüfanforderungen aus dem Kontrollplan sollen in digitaler Form erfasst werden, um eine vollständige und konsistente Qualitätskontrolle zu ermöglichen?

Die Arbeit zeigt, dass vor allem jene Prüfanforderungen digital erfasst werden sollten, die einen direkten Bauteilbezug aufweisen, im Bauablauf wiederkehrend auftreten und mit einfachen Datentypen abgebildet werden können. Dazu gehören Prüfstatus, Abnahmedatum, verantwortliche Person, Soll-/Ist-Angaben, Materialauswahl, binäre Prüfkriterien und Verweise auf ergänzende Nachweise. Nicht alle Inhalte des Kontrollplans eignen sich gleichermassen für eine strukturierte Erfassung im Modell. Vorversuche, Eignungsnachweise oder qualitative Sonderbeurteilungen können weiterhin als Dokumentverweise geführt werden. Entscheidend ist daher eine bewusste Trennung zwischen strukturiert erfassbaren Prüfpunkten und ergänzenden Nachweisen.

Die zweite Teilfragestellung lautete:

Wie kann der Datenfluss zwischen Unternehmer, Bauleitung und CDE so gestaltet werden, dass Unterbrüche vermieden und Validierungsprozesse beschleunigt werden?

Der Datenfluss sollte so gestaltet werden, dass die Qualitätsinformation möglichst nahe am Entstehungsort erfasst und direkt mit dem betroffenen Bauteil verbunden wird. Die Unternehmung trägt die Istwerte am Modellelement ein oder stellt den unterzeichneten Nachweis im CDE bereit. Die Bauleitung prüft die Informationen im Modellkontext, gibt sie frei oder löst über ToDo-/BCF-Funktionen eine Rückmeldung aus. Kurzfristig bleibt der unterzeichnete PDF-Nachweis der verbindliche Beleg, wird jedoch mit dem Bauteil verknüpft. Langfristig sollte ein API-basierter Freigabe- und Archivierungsprozess den validierten Datenstand sichern und für nachgelagerte Auswertungen verfügbar machen. Dadurch werden Medienbrüche reduziert, Zuständigkeiten klarer und Validierungsschritte besser nachvollziehbar.

Die dritte Teilfragestellung lautete:

Welchen Mehrwert bietet die digitale Methodik im Vergleich zu den bisherigen analogen beziehungsweise hybriden Vorgehensweisen hinsichtlich Transparenz, Nachvollziehbarkeit und Effizienz?

Der Mehrwert liegt vor allem in der besseren Auffindbarkeit, der bauteilbezogenen Verknüpfung und der strukturierten Erfassung der Qualitätsinformationen. Transparenz entsteht, weil Nachweise nicht mehr nur in individuellen Ablagestrukturen oder E-Mail-Verläufen liegen, sondern im CDE mit dem Modellobjekt verbunden sind. Nachvollziehbarkeit entsteht, weil Prüfstatus, Freigaben, Rückmeldungen und Nachweise in einer gemeinsamen digitalen Umgebung geführt werden können. Effizienz entsteht durch weniger Suchaufwand, weniger doppelte Eingaben und eine schnellere Verfügbarkeit der Informationen im Büro. Die vollständigen Effizienzgewinne werden jedoch erst mit einer weiterführenden API-basierten Freigabe-, Archivierungs- und Auswertungslogik erreicht.

Die vierte Teilfragestellung lautete:

Welche organisatorischen Prozessanpassungen und welche Massnahmen zur Förderung der Akzeptanz bei den Mitarbeitenden sind notwendig, um die digitale Qualitätskontrolle erfolgreich in den Baustellenalltag zu integrieren?

Notwendig sind klare Verantwortlichkeiten, eine verbindliche Ablagestruktur, eine gepflegte Property-Set-Bibliothek, eine formale Regelung der digitalen Nachweisführung und eine schrittweise Einführung entlang realer Bauabschnitte. Die Akzeptanz entsteht nicht durch die Einführung eines zusätzlichen digitalen Werkzeugs allein. Sie entsteht dann, wenn die Lösung den bestehenden Prozess verständlicher, schneller oder sicherer macht. Dafür braucht es kurze bauteilbezogene Schulungen, einfache Arbeitsanweisungen, iterative Einführung über die nächsten Querverbindungen und eine klare Rückendeckung durch Bauherrschaft und Projektleitung.

10.3 Grenzen der Arbeit

Die Arbeit untersucht die digitale Qualitätskontrolle exemplarisch anhand eines abgegrenzten Anwendungsfalls. Der Prototyp wurde am Innenausbau der QV04 und dort an zwei ausgewählten Prüfstufen getestet. Dadurch konnte die Grundlogik der modellbasierten Qualitätskontrolle konkret geprüft werden. Gleichzeitig bedeutet diese Eingrenzung, dass die Ergebnisse nicht ohne weitere Prüfung auf sämtliche Prüfstufen, Bauteile und Bauphasen des Projekts übertragen werden können.

Eine weitere Grenze liegt in der technischen Umgebung. Die Fallstudie wurde mit Trimble Connect Pro und den dort verfügbaren Funktionen durchgeführt. Die Erkenntnisse zur Property-Set-Bibliothek, zur ToDo-/BCF-Funktion und zur Checklist Extension sind deshalb stark von den Möglichkeiten und Einschränkungen dieser Plattform geprägt. Andere CDE- oder Field-Management-Systeme könnten einzelne Anforderungen anders lösen. Die grundsätzliche Unterscheidung zwischen strukturierter Datenhaltung und vertraglich belastbarer Nachweissicherung bleibt jedoch systemübergreifend relevant.

Die API-basierte Freigabe- und Archivierungslogik wurde in dieser Arbeit nicht technisch umgesetzt, sondern als Zielzustand abgeleitet. Damit zeigt die Arbeit den fachlichen Bedarf und das konzeptionelle Zielbild, prüft jedoch nicht die konkrete Programmierung, die technische Machbarkeit im Detail, IT-Sicherheitsanforderungen oder die vertragliche Anerkennung eines solchen Workflows.

Auch die empirische Validierung ist begrenzt. Die Fachgespräche und internen Validierungen decken zentrale Rollen aus Bauleitung, Ausführung, Planung, Digitalisierung und Bauherrschaft ab. Dennoch handelt es sich um eine qualitative Untersuchung im Kontext eines spezifischen Grossprojekts.

Eine produktive Langzeiterprobung über mehrere Querverbindungen sowie eine quantitative Messung von Effizienzgewinnen, Korrekturschleifen und Akzeptanz im Regelbetrieb bleiben Aufgabe der nächsten Umsetzungsschritte.

10.4 Ausblick

Für die weitere Entwicklung wird empfohlen, die definierte Übergangslösung kurzfristig im Projektprozess zu verankern. Das unterzeichnete Prüfprotokoll bleibt dabei der verbindliche Nachweis, wird jedoch konsequent im CDE abgelegt und mit dem zugehörigen Bauteil oder Bauabschnitt im Modell verknüpft. Dadurch kann bereits ohne zusätzliche Systementwicklung eine Verbesserung der Transparenz und Auffindbarkeit erreicht werden.

Parallel dazu sollte die Property-Set-Bibliothek weitergeführt und schrittweise ausgebaut werden. Die in der Fallstudie entwickelte Bibliothek „Abdichtung“ kann als Vorlage für weitere Themenbereiche dienen, beispielsweise Bewehrung, Werkleitungen, Betonarbeiten oder weitere Prüfstufen des Innenausbaus. Wichtig ist dabei, die Struktur einfach zu halten und eng an den realen Bauablauf zu binden.

Der nächste wesentliche Entwicklungsschritt liegt in der API-basierten Freigabe- und Archivierungslogik. Diese sollte zunächst an einem kleinen, klar abgegrenzten Anwendungsfall getestet werden. Ziel wäre es, den validierten Datenstand nach beidseitiger Freigabe automatisch zu sichern, spätere Änderungen nachvollziehbar zu versionieren und die Daten für Auswertungen verfügbar zu machen. Damit könnte die in dieser Arbeit identifizierte Lücke zwischen modellbasierter Datenstruktur und vertraglich belastbarem Prüfnachweis geschlossen werden.

Zusätzlich sollten die in Kapitel 8 vorgeschlagenen Kennzahlen im produktiven Einsatz erhoben werden. Besonders geeignet sind die Durchlaufzeit von der Prüfung bis zur Freigabe, die Anzahl Korrekturschleifen pro Prüfstufe und der Anteil vollständig im CDE dokumentierter Prüfnachweise. Diese Kennzahlen würden es ermöglichen, die beschriebenen Mehrwerte nicht nur qualitativ, sondern auch quantitativ zu überprüfen.

Langfristig kann der entwickelte Ansatz über die Querverbindungen hinaus auf weitere Bauabschnitte des Tunnelprojekts und vergleichbare Infrastrukturprojekte übertragen werden. Voraussetzung dafür ist jedoch, dass die digitale Qualitätskontrolle nicht als isolierte Softwarelösung verstanden wird. Sie muss als Teil eines durchgängigen Informationsmanagements betrachtet werden, das Kontrollplan, Modell, CDE, Freigabeprozess und spätere Nutzung der Qualitätsdaten miteinander verbindet.

10.5 Schlussbemerkung

Die Arbeit zeigt, dass die Digitalisierung der Qualitätskontrolle bei den Querverbindungen des zweiten Gotthard-Strassentunnels kein rein technisches Thema ist. Der eigentliche Mehrwert entsteht dort, wo bestehende Prüfprozesse, bauteilbezogene Modelldaten und digitale Nachweisführung zu einem konsistenten Informationsfluss verbunden werden.

Die entwickelte Lösung ersetzt den heutigen Prozess nicht abrupt, sondern zeigt einen realistischen Entwicklungspfad auf: kurzfristig über eine dokumentenbasierte Übergangslösung mit Modellverknüpfung, mittelfristig über den Ausbau der Property-Set-Struktur und langfristig über eine API-basierte Freigabe- und Archivierungslogik. Damit wird die Qualitätskontrolle nicht nur digitaler, sondern vor allem transparenter, nachvollziehbarer und besser in die Projektabwicklung integrierbar.

11 Quellenverzeichnis

Arge secondo tubo, VTM GmbH, 2026. *Segmentbericht*.

ASTRA, 2026a. Projektdetails, Ziel, Zweck [WWW Document]. A2 Zweite Röhre Gotthard. URL <https://gotthardtunnel.ch/die-zweite-roehre/projektdetails-ziel-zweck> (accessed 3.7.26).

ASTRA, 2026b. Baustelle [WWW Document]. A2 Zweite Röhre Gotthard. URL <https://gotthardtunnel.ch/die-zweite-roehre/bauarbeiten> (accessed 3.7.26).

ASTRA, 2026c. Umwelt [WWW Document]. A2 Zweite Röhre Gotthard. URL <https://gotthardtunnel.ch/die-zweite-roehre/umwelt-geologie> (accessed 3.7.26).

ASTRA, 2026d. A2 Zweite Röhre Gotthard [WWW Document]. A2 Zweite Röhre Gotthard. URL <https://gotthardtunnel.ch/die-zweite-roehre/vortriebsmethoden> (accessed 3.7.26).

ASTRA, 2025a. *DOKUMENTATION UMSETZUNG DER AKS-CH BSA*.

ASTRA, 2025b. *RICHTLINIE STRUKTUR UND KENNZEICHNUNG DER BETRIEBS- UND SICHERHEITSAUS- RÜSTUNGEN (AKS-CH)*.

ASTRA, IG 2G -BN, 2025. *A2 ZWEITE RÖHRE GOTTHARD PROJEKTPRÄSENTATION EINFÜHRUNG IN EIN GENERATIONENPROJEKT*.

Baukostenplan Tiefbau eBKP-T [WWW Document], 2026. . Home. URL <https://www.crb.ch/de/normen-standards/baukostenplane/baukostenplan-tiefbau-ebkp-t> (accessed 5.18.26).

Baumann, R., 2026. *Fachgespräch Nr. 7*.

Benghi, C., 2019. *Automated verification for collaborative workflows in a Digital Plan of Work*. Autom. Constr. 107, 102926. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.102926>

buildingSMART International, 2026. Information Delivery Specification - buildingSMART International [WWW Document]. URL <https://www.buildingsmart.org/standards/bsi-standards/information-delivery-specification-ids/> (accessed 5.18.26).

Cecchini, E., 2026. *Fachgespräch Nr. 12*.

Chedda, J., 2026. *Fachgespräch Nr. 18*.

Eleonor A. Heil, 2021. Methode der Systematischen Literaturrecherche.

Fernandes, J., 2026. *Fachgespräch Nr. 8*.

Garcia, C., 2025. *Fachgespräch Nr. 4*.

Herrenknecht AG, 2026. Herrenknecht AG – Pioneering Underground Together [WWW Document]. URL <https://www.herrenknecht.com/de/> (accessed 3.21.26).

IG Nuovo Gottardo, 2025. *BAP*.

IG-2G-BN, 2025. *Organigramm*.

Kiser, A., 2026. *Fachgespräch Nr. 9*.

Lesjak, A., 2025. *Fachgespräch Nr. 1*.

Leygonie, R., Motamedi, A., Iordanova, I., 2022. *Development of quality improvement procedures and tools for facility management BIM*. Dev. Built Environ. 11, 100075. <https://doi.org/10.1016/j.dibe.2022.100075>

Lora, R., 2026. *Fachgespräch Nr. 10*.

Martins, A.C.P., Castellano, I.R., Lenz César Júnior, K.M., Franco de Carvalho, J.M., Bellon, F.G., de Oliveira, D.S., Ribeiro, J.C.L., 2024. *BIM-based mixed reality application for bridge inspection*. Autom. Constr. 168, 105775. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2024.105775>

-
- Matarneh, S., Elghaish, F., Rahimian, F.P., Dawood, N., Edwards, D., 2022. *Automated and interconnected facility management system: An open IFC cloud-based BIM solution*. Autom. Constr. 143, 104569. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104569>
- Metelka, V., 2026. *Fachgespräch Nr. 17*.
- Milojevic, N., 2026. *Fachgespräch Nr. 16*.
- Neininger, L., 2026. *Fachgespräch Nr. 6*.
- NFF, 2019. *Digitalisation in Norwegian Tunnelling*, Norsk Forening for Fjellsprengningsteknikk.
- PRISMA, 2020. PRISMA statement [WWW Document]. PRISMA Statement. URL <https://www.prisma-statement.org> (accessed 3.21.26).
- R.Baumann, 2024. *Bauleitung Handbuch*.
- Rizzo, L.M., 2026. *Fachgespräch Nr. 5*.
- Rossi, M., 2026. *Fachgespräch Nr. 3*.
- Sanfilippo, R., 2026. *Fachgespräch Nr. 15*.
- SN EN ISO 19650-1, 2018.
- SN EN ISO 19650-2, 2018.
- SN EN ISO 19650-4, 2022.
- Sudakova, K., Remeš, J., Tichá, A., 2024. *Building Execution Plan as an effective document for Building Information Modelling*. CENTERIS – Int. Conf. Enterp. Inf. Syst. ProjMAN - Int. Conf. Proj. Manag. HCist - Int. Conf. Health Soc. Care Inf. Syst. Technol. 2023 239, 556–562. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2024.06.207>
- T. Fries, S. Böheim, 2024. *Kontrollplan*.
- Timic, M., 2026. *Fachgespräch Nr. 13*.
- TPC Tunnelsoft, 2026. Tunnelsoft - Special software for tunneling - TBM engineering [WWW Document]. Tunnelsoft - Spec. Softw. Tunneling - TBM Eng. Experts. URL <https://tunnelsoft.com/> (accessed 3.7.26).
- Trimble Connect, 2026a. Introduction [WWW Document]. Trimble Connect. URL <https://developer.trimble.com/docs/connect/> (accessed 5.18.26).
- Trimble Connect, 2026b. Core [WWW Document]. Trimble Connect. URL <https://developer.trimble.com/docs/connect/tools/api/core/> (accessed 5.18.26).
- V. E. Gall, W. Mieczko, F. Robert, W. Angerer, J. Salmi, Z. Ye, J. Grasmick, M. Rives, W. Aldrian, P. Dohmen, A. Jacobs, J. Ninic, J. Karlovsek, 2025. *ITA-AITES . BIM in tunnelling – Guideline for mechanised and conventional tunnels*.
- Verde, L., 2026. *Fachgespräch Nr. 14*.
- VMT GmbH, 2026. *VMT GmbH | Systeme für Tunnelbau und Industrievermessung*. URL <https://vmt.global/> (accessed 3.30.26).
- Von Mandach, X., 2026. *Fachgespräch Nr. 19*.
- Yoon, S., Zhu, H., Hwang, B.-G., Min, O.S., 2025. *Accelerating digital transformation in construction: Best practices for the successful implementation of integrated digital delivery*. Autom. Constr. 178, 106417. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2025.106417>
-

12 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1, Ansicht Ausbruchsicherung DBM in Trimble, eigene Abbildung	1
Abbildung 2, Vereinfachte Karte mit den Transitwegen des Gotthard (ASTRA, 2026a; ASTRA & IG 2G -BN, 2025).....	5
Abbildung 3, Timeline von der Idee bis zur vollständigen Inbetriebnahme (ASTRA & IG 2G -BN, 2025)	6
Abbildung 4, Axonometrische Darstellung von zwei Tunneln (ASTRA, 2026b; ASTRA & IG 2G -BN, 2025).....	7
Abbildung 5, Schnitt des zweiten Röhre (ASTRA, 2026b; ASTRA & IG 2G -BN, 2025).....	8
Abbildung 6, geologisches Schema (ASTRA, 2026c; ASTRA & IG 2G -BN, 2025).....	9
Abbildung 7, Schema des TBM-Kopf (ASTRA, 2026d).....	10
Abbildung 8, WELK-Parameter.....	11
Abbildung 9, WELK-Ereignisse	12
Abbildung 10, Schema der Wiederverwendungs- und Deponieziele (ASTRA, 2026c; ASTRA & IG 2G -BN, 2025).....	13
Abbildung 11, Organigramm 2025 des öBL (IG-2G-BN, 2025).....	15
Abbildung 12, Forschungsdesign	27
Abbildung 13, Ist-Zustand, Screenshot von Anhang C – Hauptprozess.....	32
Abbildung 14, Ist-Zustand, Screenshot von Anhang C – Teilprozesse	33
Abbildung 15, Ausführungsmodell der Querverbindung als Grundlage der Variantenbildung. Eigene Darstellung in Trimble Connect.	46
Abbildung 16, Vereinfachter Prozess der drei Varianten	47
Abbildung 17, Einordnung der Varianten nach funktionalem Schwerpunkt und Implementierungsaufwand	47
Abbildung 18, Systemarchitektur der Variante 1, Siehe im grossen Anhang F	48
Abbildung 19, Systemarchitektur der Variante 2, Siehe im grossen Anhang F	50
Abbildung 20, Systemarchitektur der Variante 2, Siehe im grossen Anhang F	52
Abbildung 21, Axonometrische Übersicht des Innenausbau-Modells der QV04 im Test-Projekt; sichtbar sind die Anschlüsse an die zweite Tunnelröhre und der Lagebezug nach Göschenen (Screenshot des Testprojekts).....	57
Abbildung 22, Detailansicht der Abdichtung (Screenshot des Testprojekts).	57
Abbildung 23, Menü „Bibliotheken für Eigenschaftengruppen" im Test-Projekt mit der eigens angelegten Bibliothek „Abdichtung – Qualitätskontrolle der Abdichtung in QV" (Screenshot des Testprojekts).	58
Abbildung 24, Eigenschaftengruppe „Prüfstufe 1: Untergrund" mit den im Prototyp definierten Prüfkriterien.....	59
Abbildung 25, Eigenschaftengruppe „Prüfstufe 2: Verlegen Abdichtungssystem" mit den Prüfkriterien für das Aufbringen der Abdichtung	59
Abbildung 26, Zuweisung der neuen Properties an die Elemente des Modells (Screenshot des Testprojekts).	60
Abbildung 27, Beispielhafter ToDo-Eintrag „Korrektur dem Fugenband" als Rückkanal von der Bauleitung an den Unternehmer; sichtbar sind Beschreibung, Zuweisung und beigefügte Modellausschnitte (Screenshot des Testprojekts).....	61
Abbildung 28, Soll Prozesse, Screenshot von Anhang G	69

13 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1, Suchkomponenten der Datenerhebung 1	19
Tabelle 2, Kombination der Suchkomponenten der Datenerhebung 1.....	20
Tabelle 3, Filtereinstellungen der Datenerhebung 1	20
Tabelle 4, thematischen Clustern der Datenerhebung 1.....	21
Tabelle 5, Suchkomponenten der Datenerhebung 2 und entsprechende Ergebnisse basierend auf den Filtern.....	23
Tabelle 6, Befragte Akteure zur Entwicklung der Varianten und zur Auswahl der zu testende Varianten	39
Tabelle 7, Übersicht über die Varianten	54
Tabelle 8, Bewertung der Varianten	55
Tabelle 9, Formale Validierung des Prototyps anhand der Evaluierungskriterien	62
Tabelle 10, Gegenüberstellung der vier Massnahmen-Optionen aus der internen Validierung.....	64
Tabelle 11, Verteilung der 17 Befragten nach Funktion und Erhebungsphase	75
Tabelle 12, Anzahl der aus den Fachgesprächen abgeleiteten Anforderungen pro Modul	76
Tabelle 13, Übersicht der Gesamtbewertungen der drei Lösungsvarianten.....	76
Tabelle 14, Kennzahlen der prototypischen Konfiguration im Testprojekt.....	77
Tabelle 15, Ergebnis der formalen Validierung des Prototyps gegenüber den Anforderungen	78
Tabelle 16, Status der vier Massnahmen nach Abschluss der Verbesserungsphase	78
Tabelle 17, Vergleich von Ist-Zustand, Übergangslösung und Zielzustand.....	79

14 Anhang

Anhang A: Auszug aus dem WELK-Bericht

Anhang B: Übersichtstabelle zur Datenerhebung 1

Anhang C: Ist-Zustand Prozesse

Anhang D: Überarbeitung des Kontrollplans

Anhang E: Fragenkatalog

Anhang F: Systemarchitektur der Varianten

Anhang G: Soll Prozesse

Anhang H: Angaben zu den verwendeten Tools

Master of Science FHNW in Virtual Design and Construction

Anhang A

Auszug aus dem WELK Bericht



Alice Panciera

Zugehöriger Abschnitt der Arbeit

Quelldokument

Kapitel 2.1.3 – Informationen über das Projekt

WELK Bericht

Segmenteigenschaften		Segmentstatus am 06.03.2026	
Ringtyp	WELK	Alter in Tagen	5
Bewehrungskorbsondertyp	Typ 1 ✓	Status	Fertiggestellt
Baurichtung	U	Freigegeben	Nein
Bewehrungskorb	WB001671 (W-Typ 1) ✓	Gesperrt	Nein
Betonierzeitstempel	06.03.2026 21:19	Ausschuss	Nein
Schalung	WELK-3 ✓		

Parameter		
Zeile	Name	Value
1	Referenz Härtezeit time [h]	0.01
2	Referenz Reifezeit [h]	0
3	Referenz Lagerzeit [d]	14
4	Referenzgewicht [kg]	20000
5	Referenzvolumen [m3]	8.000 ✓
6	Betonchargen-Nr.	23342 ✓
7	Produktionsanlage	Segment production (Stationary 1)
8	Ausschalungszeitpunkt	2026-03-09 05:47:36
9	Nachbearbeitungszeitpunkt	2026-03-11 09:14:55

Attribute		
Zeile	Name	Wert
1	Schalung dicht geschlossen?	Ja
2	Alle Einlagen befestigt?	Ja
3	Betonüberdeckung eingehalten?	Ja
4	Auftriebssicherung Rohre vorhanden? (Typ 2/4)	Ja
5	Schalung sauber und eingeölt?	Ja
6	Bewehrung in Ordnung?	Ja
7	Halfenschienen in Ordnung?	Ja
8	Erdungseinlagen in Ordnung?	Ja
9	Erdungsmessung in Ordnung?	Ja
10	KSR-Einlagen in Ordnung? (Typ 1/2/4)	Ja
11	Schadensprüfung durchgeführt	Ja
12	Schaumstoff aus Halfenschienen entfernt?	Ja
13	Kalibrierung KSR in Ordnung? (Typ 2/4)	Ja
14	Erdungsmessung eingetragen	Ja

Dokumente				
Zeile	Typ	Name	Gespeichert	Kommentar

Schäden						
Zeile	Klasse	Unterklasse	Position	Festgestellt	Status	Kommentar

Schadensbilder		
Zeile	Details	Bild

Betonchargen							
	Name			Wert			
Beton-Lieferschein- daten	Lieferscheinnummer						
	Betonchargen-ID			23342 ✓			
	Anlage						
	Betontyp			Default			
	Rezept-ID						
	Rezeptbeschreibung						
	Produktionsdatum			06.03.2026 21:19:45			
	Daten empfangen am			06.03.2026 21:19:45			
	Menge [cyd.]						
	Slump						
	Temperatur [°C]						
	Vibrationsdauer [s]						
	Prüfer						
	Fahrer						
	Transportmittel						
Material	Zeile	Name	Beschreibung	Soll-Menge	Ist-Menge	Einheit	Materialtyp

Ereignisse			
Zeile	Zeitstempel	Text	Beschreibung
1	05.03.2026 02:16	Bewehrungskorb erzeugt	Reinforcement created with Barcode <B79012983> (Ins_Id:203)
2	05.03.2026 02:16	Bewehrungsetikett gedruckt	Reinforcement label printed (Ins_Id:203)
3	05.03.2026 02:16	Bewehrungsetikett nachgedruckt	Reinforcement - Label reprinted. (Ins_Id:203)
4	05.03.2026 02:16	Bewehrungsetikett gedruckt	Reinforcement label printed (Ins_Id:203)
5	06.03.2026 08:15	Bewehrungskorb wurde produziert	(Ins_Id:108)
6	06.03.2026 19:24	Bewehrungskorb begutachtet	Reinforcement examination passed (Ins_Id:109) 
7	06.03.2026 19:25	Segment erstellt	Segment created with Barcode <W79011779> (Ins_Id:108)
8	06.03.2026 19:25	Segment eingeschalt	(Ins_Id:108)
9	06.03.2026 21:19	Betonmischungs-ID eingetragen	Batch Identifier <23342> (Ins_Id:108)
10	06.03.2026 21:19	Betonierzeitpunkt gesetzt	Segment concreted (Ins_Id:108)
11	06.03.2026 21:19	Bewehrung betoniert	(Ins_Id:108)
12	06.03.2026 23:27	Segmentetikett gedruckt	Segment - Label printed. (Ins_Id:203)
13	09.03.2026 05:47	Segment ausgeschalt	Demoulding done (Ins_Id:108)
14	09.03.2026 05:47	Segment produziert	Produced (Ins_Id:108)
15	09.03.2026 05:47	Segmentetikett nachgedruckt	Segment - Label reprinted. (Ins_Id:601)
16	11.03.2026 09:14	Segment fertiggestellt	Segment Finished (Ins_Id:110)
17	11.03.2026 09:14	Segment im Übergabebereich	(Ins_Id:110)

Kommentar

Lieferant			
	Datum	Name	Unterschrift

Kunde			
	Datum	Name	Unterschrift

Master of Science FHNW in Virtual Design and Construction

Anhang B

Literaturrecherche – Screening 1



Alice Panciera

Zugehöriger Abschnitt der Arbeit

Kapitel 2.2.2 – Datenerhebung 1

ID	Authors	Year	Title	Journal/Source	Screening_1	Screening_2	Cluster	Score
1	Abdullah Alsehami, Abdullah O. Baarimah, Mad	2025	Integration of BIM in project management phases for achieving sustainable success in small construction projects: A SEM-based approach	Ain Shams Engineering Journal	exclude	-	C3	0
2	Joshua Amo Larbi, Llewellyn C.M. Tang, Richard	2024	Developing an integrated digital delivery framework and workflow guideline for construction safety management in a project delivery system, Safety Science	Volume 175	review	exclude	C1	2
3	Antonia Pacios Álvarez, Joaquín Ordieres-Meré,	2021	Opportunities in airport pavement management: Integration of BIM, the IoT and DLT	Journal of Air Transport Management	exclude	-	C2	0
4	Editor(s): Martin A. Abraham	2024	Encyclopedia of Sustainable Technologies (Second Edition), Elsevier, 2024, Pages 885-930, ISBN 9780443222870	(https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0926641024000091)	exclude	-	C4	0
5	Brandon S. Byers, Deepika Raghu, Adama Olum	2024	From research to practice: A review on technologies for addressing the information gap for building material reuse in circular construction, Sustainable Production and Consumption	Volume 45	review	exclude	C4	2
6	Jeroen van der Heijden	2023	Construction 4.0 in a narrow and broad sense: A systematic and comprehensive literature review, Building and Environment	Volume 244	exclude	-	C4	0
7	May Winfield	2020	Construction 4.0 and ISO 19650: a panacea for the digital revolution?	Proceedings of the Institution of Civil Engineers	exclude	-	C4	1
8	Yuhan Liu, Xingyu Tao, Moumita Das, Xingbo Go	2024	Blockchain-enabled platform-as-a-service for production management in off-site construction design using openBIM standards	Automation in Construction	exclude	-	C2	0
9	Ahmed Alnaggar, Michael Pitt	2019	Lifecycle Exchange for Asset Data (LEAD)	Journal of Facilities Management	exclude	-	C4	0
10	Rolando Chacón, Hector Posada, Carlos Ramone	2024	Digital twinning of building construction processes. Case study: A reinforced concrete cast-in structure	Journal of Building Engineering	exclude	-	C3	1
11	Claudio Benghi	2019	Automated verification for collaborative workflows in a Digital Plan of Work	Automation in Construction	review	include	C1	4
12	David F. Bucher, Jens J. Hunhevicz, Ranjith K. Sor	2024	From BIM to Web3: A critical interpretive synthesis of present and emerging data management approaches in construction informatics	Advanced Engineering Informatics	exclude	-	C2	1
13	M.Q. Huang, J. Ninić, Q.B. Zhang, BIM	2021	machine learning and computer vision techniques in underground construction: Current status and future perspectives, Tunnelling and Underground Space Technology	Volume 108	review	exclude	C3	2
14	Ranjith K. Soman, Karim Farghaly, Grant Mills, Je	2025	Digital twin construction with a focus on human twin interfaces	Automation in Construction	exclude	-	C2	0
15	Ana Carolina Pereira Martins, Isabele Rocha Cas	2024	BIM-based mixed reality application for bridge inspection	Automation in Construction	exclude	-	C3	1
16	Roberto Brandín, Sepehr Abrishami	2024	IoT-BIM and blockchain integration for enhanced data traceability in offsite manufacturing	Automation in Construction	exclude	-	C2	1
17	Katsiaryna Sudakova, Josef Remeš, Alena Tichá	2024	Building Execution Plan as an effective document for Building Information Modelling	Procedia Computer Science	review	include	C4	2
18	Ruoyu Jin, Chapter 2 - Current Management Appro	2019	(https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B978012811749100002X) Abstract: This chapter focuses on the sustainability from the construction management perspective	digital technology in terms of Building Information Modelling	exclude	-	C4	0
19	Will Serrano	2022	Verification and Validation for data marketplaces via a blockchain and smart contracts, Blockchain: Research and Applications	Volume 3	exclude	-	C2	0
20	Pablo Araya-Santelices, Zacarías Grande, Edison	2025	particularly through machine learning and deep learning techniques. In bridge management	combining AI with Building Information Modelling	exclude	-	C3	1
21	Bogdan Chelaru, Cătălin Onuțu, Gabriela Ungure	2025	BIM and cloud-based tools integration for BREEAM in energy-efficient building design: A case study	Results in Engineering	exclude	-	C3	0
22	Mengtian Yin, Varun Kumar Reja, Ran Wei, Ioan	2025	Exploring the value of digital twins for information management in highway asset maintenance	Developments in the Built Environment	exclude	-	C3	0
23	Douglas Aghimien, Clinton Ohi Aigbavboa, Ay	2021	Dynamic capabilities for digitalisation in the AECO sector – a scientometric review	Engineering	review	exclude	C4	2
24	Younesse Haddaji, Hicham Majdoubi, Amine el H	2025	14 - Circular economy in the construction sector: current trends and future outlook, Editor(s): Afzal Husain Khan, Mohammad Nadeem Akhtar, Khaldoon A. B	In Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering	review	exclude	C4	2
25	Syafizal Shahrudin, Mohd Zairul, Ahmad Tarmiz	2022	Performance-based identity in a BIM environment: an architect's perceptions and experiences, Open House International	Volume 47	exclude	-	C4	0
26	Abstracts, Fuel and Energy Abstracts, Volume 60	2019	Issue 5, 2019, Pages 406-510	ISSN 0140-6701	exclude	-	C4	0
27	Xiaoxiao Xu, Tim Mumford, Patrick X.W. Zou	2021	Life-cycle building information modelling (BIM) engaged framework for improving building energy performance	Energy and Buildings	exclude	-	C4	1
28	Sihoon Yoon, Hanjing Zhu, Bon-Gang Hwang, Ong	2025	Accelerating digital transformation in construction: Best practices for the successful implementation of integrated digital delivery	Automation in Construction	review	include	C2	3
29	Walaah Hamed, Ahmed El Antably	2023	Knowledge-based HBIM for conservation: The case of Yahya al-Shabih mausoleum, Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage	Volume 30	exclude	-	C4	0
30	Amos Darko, Albert P.C. Chan, Yang Yang, Mers	2020	Building information modeling (BIM)-based modular integrated construction risk management – Critical survey and future needs	Computers in Industry	exclude	-	C3	0
31	Murali Krishna Chenchu, Kirti Ruikar, Kumar Nee	2025	Structural equation modeling of data usage factors in the construction sector: A comprehensive validation of micro level data usage factors	Journal of Industrial Information Integration	exclude	-	C3	0
32	Marco Casini, Chapter 4 - Building information m	2022	In Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering	Construction 4.0	review	exclude	C2	2
33	M.F. Antwi-Afari, H. Li, E.A. Pärn, D.J. Edwards	2018	Critical success factors for implementing building information modelling (BIM): A longitudinal review	Automation in Construction	exclude	-	C4	0
34	Gokcen Yilmaz, Asli Akcamete, Onur Demirors	2023	BIM-CAREM: Assessing the BIM capabilities of design, construction and facilities management processes in the construction industry	Computers in Industry	exclude	-	C4	0
35	Nicoleta Panagiotidou, Michael Pitt, Qiuchen Lu	2023	Building information modelling execution plans: a global review	Proceedings of the Institution of Civil Engineers	exclude	-	C4	1
36	Jennifer Li, Mohamad Kassem	2021	Applications of distributed ledger technology (DLT) and Blockchain-enabled smart contracts in construction	Automation in Construction	exclude	-	C2	1
37	Karen Castañeda, Omar Sánchez, Carlos A. Peña,	2025	BIM-lean integration for construction scheduling of road intersections	Automation in Construction	exclude	-	C3	0
38		2021	Appendix 5 - Abbreviations and acronyms, Editor(s): Albert Lester	Project Management	review	exclude	C4	2
39	Sajjad Bakhshi, Mohammad Reza Chenaghloou, F	2022	Integrated BIM and DfMA parametric and algorithmic design based collaboration for supporting client engagement within offsite construction	Automation in Construction	exclude	-	C3	0
40	M. Mueller, B.F. Walter, R.J. Giebel, A. Beranoag	2024	Towards a better understanding of the geochemical proxy record of complex carbonate archives, Geochimica et Cosmochimica Acta	Volume 376	exclude	-	C4	0
41	Pieter Pauwels, Ellen van den Bersselaar, Lucas	2024	Validation of technical requirements for a BIM model using semantic web technologies	Advanced Engineering Informatics	exclude	-	C4	0
42	Saeed Akbari, Moslem Sheikhkhoshkar, Farzad P	2024	Sustainability and building information modelling: Integration, research gaps, and future directions	Automation in Construction	review	exclude	C3	2
43	Muhammad Saleem Raza, Bassam A. Tayeh, Yaz	2023	Potential features of building information modeling (BIM) for application of project management knowledge areas in the construction industry, Heliyon	Volume 9	exclude	-	C3	1
44	Romain Leygonie, Ali Motamedi, Ivanka Iordano	2022	Development of quality improvement procedures and tools for facility management BIM	Developments in the Built Environment	review	include	C1	3
45	Faris Elghaish, M. Reza Hosseini, Sandra Matarn	2021	Blockchain and the 'Internet of Things' for the construction industry: research trends and opportunities	Automation in Construction	exclude	-	C2	1
46	Vito Getuli, Alessandro Bruttini, Farzad Rahimi	2025	Parametric design methodology for developing BIM object libraries in construction site modeling	Automation in Construction	review	include	C3	3
47	Omar S. Taha, Adel Alshibani, Ahmed S. AlTuraik	2025	Digital technologies and sustainability barriers in heavy construction: A structural equation modeling study on triple-bottom-line outcomes	Results in Engineering	exclude	-	C3	0
48	Juan Manuel Davila Delgado, Lukumon Oyede	2021	Digital Twins for the built environment: learning from conceptual and process models in manufacturing	Advanced Engineering Informatics	exclude	-	C3	0
49	Marco Casini	2022	Chapter 9 - Advanced site management tools and methods, Editor(s): Marco Casini	In Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering	exclude	-	C2	0
50	Achini Peiris, Felix Kin Peng Hui, Colin Duffield, J	2023	Digitalising modular construction: Enhancement of off-site manufacturing productivity via a manufacturing execution & control (MEC) system	Computers & Industrial Engineering	exclude	-	C4	0
51	Ozan Önder Özener	2023	Context-based learning for BIM: simulative role-playing games for strategic business implementations	Smart and Sustainable Built Environment	exclude	-	C4	1
52	Omimah Alsaadi, Lutfihak Alpkhan, Bora Yildiz	2025	Business model innovation as a mediator between construction 4.0 and firm performance: Evidence from Turkish construction companies	International Journal of Innovation Studies	review	exclude	C4	2
53	Sofiat O. Abioye, Lukumon O. Oyede, Lukman	2021	Artificial intelligence in the construction industry: A review of present status, opportunities and future challenges	Journal of Building Engineering	review	exclude	C4	2
54	Ahsan Waqar, Nasir Shafiq, Idris Othman, Fahad	2024	Examining the impact of BIM implementation on external environment of AEC industry: A PEST analysis perspective	Developments in the Built Environment	exclude	-	C4	0
55	Basak Keskin, Baris Salman, Beliz Ozorhon, Airp	2020	(https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0969998820000764) Abstract: Purpose The purpose of this paper is to systematically analyse how building information modelling can be used to improve the efficiency of the construction process	thematic analysis and an explanatory case study	exclude	-	C4	0
56	Marco Casini	2022	Chapter 1 - Toward a new building era, Editor(s): Marco Casini	In Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering	exclude	-	C4	0
57	Taqiadden Almutaser, Muizz O. Sanni-Anibire, I	2018	Adoption and implementation of BIM – case study of a Saudi Arabian AEC firm	International Journal of Managing Projects in Business	exclude	-	C4	1
58	Manuel Capogna, Walter Salvatore, Emanuele R	2023	"Guidelines for the classification and management of risk, for the evaluation of safety and for the monitoring of existing bridges". An automatic calculation method	Procedia Structural Integrity	exclude	-	C4	1
59	Jonatan Lindholm, Peter Johansson, Ibrahim Yitr	2025	Toward a BIM information delivery framework based on common data environment	Construction Innovation: Information and Technology	exclude	-	C4	0
60	Luís Sanhudo, João Poças Martins, Nuno M.M. R	2021	BIM framework for the specification of information requirements in energy-related projects	Engineering	review	exclude	C4	2
61	Index, Editor(s): Ehsan Noroozinejad Farsangi, M	2025	In Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering	Digital Transformation in the Construction Industry	exclude	-	C4	0
62	Xiaofeng Zhu, Haijiang Li, Tengxiang Su	2023	Autonomous complex knowledge mining and graph representation through natural language processing and transfer learning	Automation in Construction	review	exclude	C4	2
63	Philipp Hagedorn, Pieter Pauwels, Markus König	2023	Semantic rule checking of cross-domain building data in information containers for linked document delivery using the shapes constraint language	Automation in Construction	exclude	-	C4	0
64	James Heaton, Ajith Kumar Parlikad, Jennifer Sci	2019	A Building Information Modelling approach to the alignment of organisational objectives to Asset Information Requirements	Automation in Construction	exclude	-	C4	0
65	Janet Chang, Xiang Xie, Ajith Kumar Parlikad, Clc	2024	Built Environment Project and Asset Management	Volume 15	exclude	-	C4	0
66	Apeesada Sompolgrunk, Saeed Banihashemi, Ha	2024	Strategic alignment of BIM and big data through systematic analysis and model development	Automation in Construction	review	exclude	C3	2
67	Yang Yang, Junfeng Guan, Janet M. Nwaogu, Alb	2022	Attaining higher levels of circularity in construction: Scientometric review and cross-industry exploration	Journal of Cleaner Production	exclude	-	C4	0
68	Rita Sanfilippo, Masoud Esfandiari, Federico Fori	2025	ITA – AITES tunnelling information modelling – A BIM approach for a sustainable life cycle management, Tunnelling and Underground Space Technology	Volume 165	review	exclude	C3	3
69	Ana Pérez-García, Norena Martín-Dorta, José Án	2024	Enhancing BIM implementation in Spanish public procurement: A framework approach, Heliyon	Volume 10	review	include	C2	3
70	Ziwen Liu, Yujie Lu, Meng Shen, Lu Chang Peh	2021	Transition from building information modeling (BIM) to integrated digital delivery (IDD) in sustainable building management: A knowledge discovery approach	Journal of Cleaner Production	exclude	-	C4	1

ID	Authors	Year	Title	Journal/Source	Screening_1	Screening_2	Cluster	Score
71	Tomas Hanak, Michal Mikulik, Marcin Soniewick	2025	Impact of the quality of technical specifications of the tender documentation on the construction projects' success	International Journal of Managing Proje	exclude	-	C4	0
72	Humayun Kabir Biswas, Tze Ying Sim, Sian Lun L	2024	Impact of Building Information Modelling and Advanced Technologies in the AEC Industry: A Contemporary Review and Future Directions	Journal of Building Engineering	exclude	-	C3	1
73	Zulay Giménez, Héctor Hernández, Juan P. Leyva	2025	Analyzing the relationship between the level of BIM maturity and the value generated in construction projects in Colombia	Ain Shams Engineering Journal	review	include	C4	2
74	Rongrong Yu, Ning Gu, Tingting Liu, Hong Guan,	2024	AEC perceptions on DFMA collaboration and supporting technologies for prefabricated housing in Australia and New Zealand, Advanced Design Research	Volume 2	review	exclude	C3	2
75	Dian Liu, Hongwei Wang, Botao Zhong, Lieyun D	2022	Servitization in Construction and its Transformation Pathway: A Value-Adding Perspective	Engineering	exclude	-	C4	1
76	Anderson Akponeware, Nashwan Dawood, Sergi	2022	An integrated empirical analysis of UK rail industry's carbon assessment: An industry perspective, Case Studies on Transport Policy	Volume 10	exclude	-	C3	0
77	Nicolò Maria Bressan, Massimiliano Scarpa, Fabi	2024	Case studies of eXtended reality combined with Building Information Modeling: A literature review	Journal of Building Engineering	exclude	-	C3	0
78	Sulakshya Gaur, Abhay Tawalare	2024	Assessing the implications of BIM on sustainability of construction projects through design risk management	Built Environment Project and Asset Ma	exclude	-	C4	0
79	Moumita Das, Xingyu Tao, Yuhan Liu, Jack C.P. C	2022	A blockchain-based integrated document management framework for construction applications	Automation in Construction	review	exclude	C2	2
80	Aurora Abruzzini, Sepehr Abrishami	2021	Integration of BIM and advanced digital technologies to the end of life decision-making process: a paradigm of future opportunities	Journal of Engineering	exclude	-	C3	1
81	Mohammadhossein Heydari, Alireza Shojaei	2025	Blockchain applications in the construction supply chain	Automation in Construction	exclude	-	C2	0
82	Amin Khoshkenar, Makram Bou Hatoum, Nisa Zi	2025	Chapter 1 - Introduction to digital transformation in the construction industry, Editor(s): Ehsan Noroozinejad Farsangi, Mohammad Noori, T.Y Yang, Vasilis Sa	In Woodhead Publishing Series in Civil a	exclude	-	C4	1
83	Sajith Wettewa, Ping Chai, Nilmini Weerasinghe,	2025	Iterative building condition assessment and prediction using unified 3D point clouds and a BIM model: A case study	Journal of Infrastructure Intelligence and	exclude	-	C2	0
84	Adrian Gerard Saldanha	2017	Applications of building information modelling for planning and delivery of rapid transit	Proceedings of the Institution of Civil En	exclude	-	C3	0
85	Katja Malovrh Rebec, Boris Deanovič, Laurens O	2022	Old buildings need new ideas: Holistic integration of conservation-restoration process data using Heritage Building Information Modelling	Journal of Cultural Heritage	exclude	-	C2	1
86	Taofeeq D. Moshood, James OB. Rotimi, Wajiha	2024	Infrastructure digital twin technology: A new paradigm for future construction industry, Technology in Society	Volume 77	review	exclude	C3	2
87	Sandra Matarneh, Faris Elghaish, Farzad Pour Ra	2022	Automated and interconnected facility management system: An open IFC cloud-based BIM solution	Automation in Construction	review	include	C3	2
88	Juan Moyano, Eva Martínez, Juan E. Nieto-Julían	2025	(https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0926580525002535) Abstract: In the study and conservation of Cultural Heritage, various disciplines cor	an Entity Information Matrix (EIM) is int	exclude	-	C2	1
89	Chengliang Zheng, Xingyu Tao, Liang Dong, Ume	2024	Decentralized artificial intelligence in construction using blockchain	Automation in Construction	exclude	-	C2	0
90	Mohammad Basheer, Faris Elghaish, Tara Brook	2024	Blockchain-based decentralised material management system for construction projects	Journal of Building Engineering	exclude	-	C2	1
91	Benjamin Jowett, David John Edwards, Mohama	2023	Field BIM and mobile BIM technologies: a requirements taxonomy and its interactions with construction management functions	Construction Innovation: Information	exclude	-	C3	0
92	Rabia Charef, Weisheng Lu	2021	Factor dynamics to facilitate circular economy adoption in construction	Journal of Cleaner Production	review	exclude	C4	2
93	L. Joblot, T. Paviot, D. Deneux, S. Lamouri	2019	Building Information Maturity Model specific to the renovation sector	Automation in Construction	exclude	-	C4	1
94	Llewellyn Tang, Zhuoqian Wu, Ya Wen, Chao Ch	2024	Building Information Modeling and Building Performance Optimization, Editor(s): Martin A. Abraham, Encyclopedia of Sustainable Technologies (Second Editi	operation and maintenance methods ba	exclude	-	C4	0
95	Malcolm Taylor	2017	Crossrail project: building a virtual version of Londons Elizabeth line	Proceedings of the Institution of Civil En	exclude	-	C4	1
96	Liu Liu, Ningshuang Zeng, Yan Liu, Daguang Han,	2024	Multi-domain data integration and management for enhancing service-oriented digital twin for infrastructure operation and maintenance	Developments in the Built Environment	exclude	-	C3	0

Master of Science FHNW in Virtual Design and Construction

Anhang C

Ist Zustand Prozesse



Alice Panciera

Zugehöriger Abschnitt der Arbeit

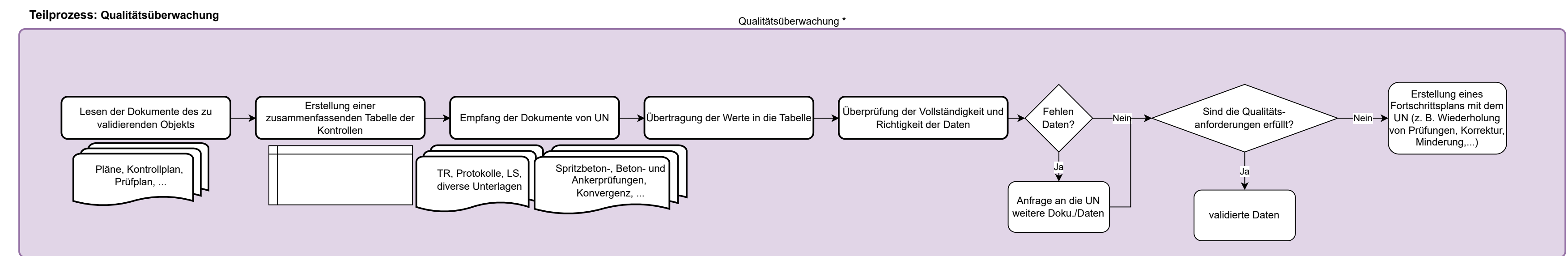
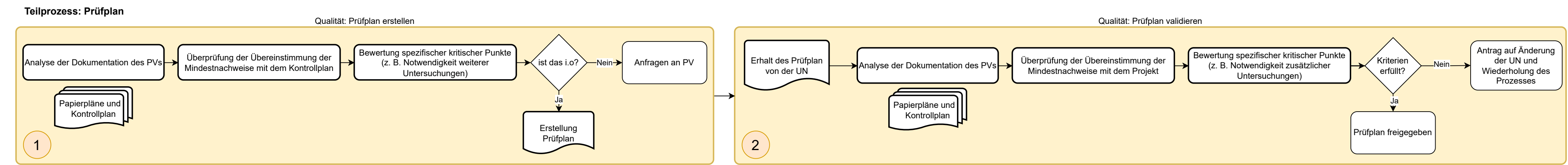
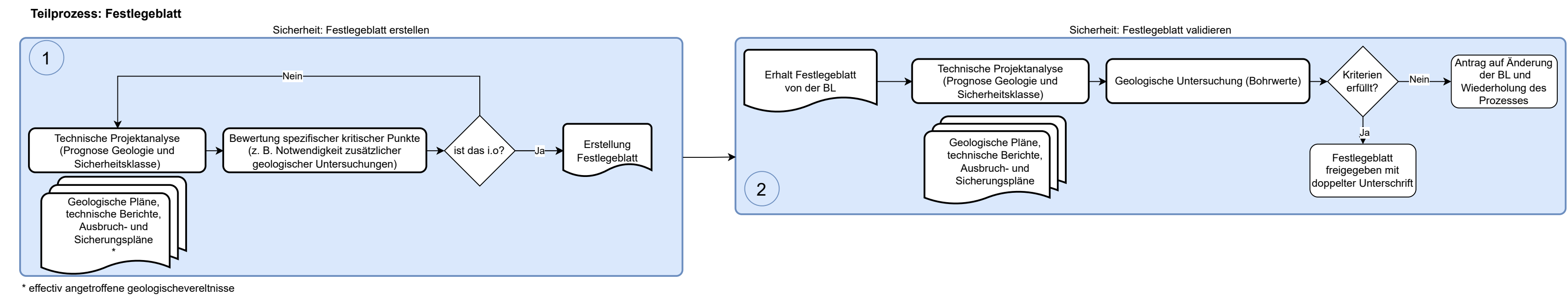
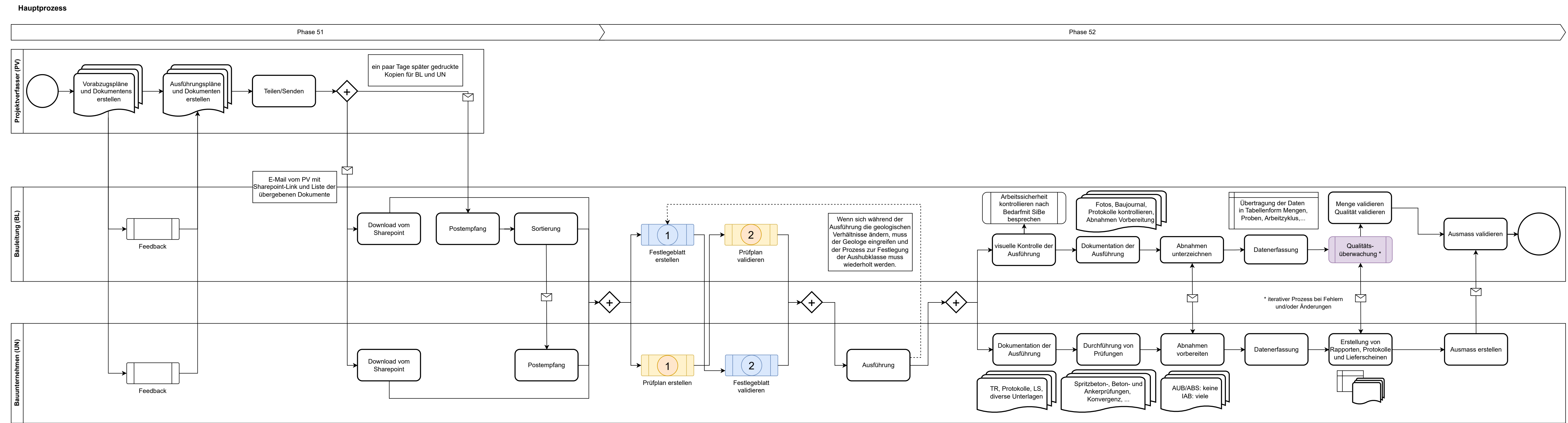
Quelldokument

Kapitel 4.2 – Ist-Zustand Analyse: Ausführungsprozess und Qualitätskontrolle

keine

Anhang C: Ist-Zustand Prozesse

Legende:
PV: Projektverfasser
BL: Bauleitung
UN: Bauunternehmen
SiBe: Sicherheitsbeauftragte
TR: Tagesrapport
LS: Lieferschein
AUB: Ausbruch
ABS: Ausbruchssicherung
IAB: Innenausbau



Master of Science FHNW in Virtual Design and Construction

Anhang D

Überarbeitung des Kontrollplans



Alice Panciera

Zugehöriger Abschnitt der Arbeit

Quelldokument

Kapitel 4.2.5 – Der Nutzen des Kontrollplans
in VDC

120043_UA_241_1400_D0001 F3 – Kon-
trollplan, Anhang A, Stand 08.07.2024

Prüfgegenstand / Zu prüfende Eigenschaft / Zu überwachendes Bauteil	Art der Prüfung	Prüfungszeitpunkt	Häufigkeit / Anzahl	Veranlassung	Durchführung	Interpretation	Qualitätsanforderung	Massnahmen bei ungenügendem Resultat	Vergütung NPK	Art der Protokollierung	Original-Zeile
A — AUSBRUCH (Sprengvortrieb SPV)											
A.1 · Fels / Geologie / Ausbruchmaterial											
Fels									NPK112.222		46
Geologie (Geologische Einheit, Gebirgseigenschaften/Trennflächengefüge, Störzonen, Ablösungen / Niederbrüche, spannungsbedingte Ausbrüche, Geologisches Überprofil, Gebirgsparameter Bohrklasse, Materialtyp (Eignung), Bergwasserchemie, Felstemperatur, Wasseranfall), geogene Asbest	Ortsbrustkartierung	während Vortrieb	Sporadisch	UN / öBL	GeoBL	GeoBL	gem. Geologischer Prognose	Anpassung Bohrklasse	Buch 4, NPK 276 (siehe weiter unten)	Geo-Baujournal	52
	Ausbruchmaterialbilanzierung (Gewicht Maschinenband, Vortriebsgeschw.)	während Vortrieb	laufend	UN / öBL	UN	GeoBL	gem. Geologischer Prognose und Plan	Vorbeugemassnahmen Ausbruchsicherung, Bei Unsicherheit Beizug	---		53
	Stabilität (Bruchkörper), Visuell oder indirekt (Maschinenparameter)	während Vortrieb	laufend	UN / öBL	UN	GeoBL	gem. Geologischer Prognose		---	Geo-Baujournal	54
Sickerwasserzutritt: Ort	Ortsbrustkartierung	während Vortrieb	1x	öBL	GeoBL	GeoBL	gem. Geologischer Prognose	Bei Unsicherheit Beizug PV		Geo-Baujournal	238
Bergwasser: Zutrittsort	Ortsbrustkartierung	während Vortrieb	1x	öBL	GeoBL	GeoBL	gem. Geologischer Prognose	Bei Unsicherheit Beizug PV	---	Geo-Baujournal	603
A.2 · Vermessungsfixpunktnetz, Absteckung, Kontrollmessungen											
Weitere Prüfungen am Bauwerk									NPK112.285		143
ALLE: Vermessungsfixpunktnetz / Absteckung / Kontrollmessungen									---		144
Fixpunktnetz übertag (beim Portal): Absteckung (Koordinaten)	Geodätische Vermessung	Vor Ausführung	stichprobenartige Kontrollmessungen	SPE-VER	SPE-VER	SPE-VER	gem. Vermessungskonzept Beilage 7.04, Kap. 4.1.2	Korrektur und Umgehende Übergabe an UN	Beilage 7.04, Kap. 4.1.2		145
Fixpunktnetz übertag: Unterhalt	Visuell, bei Zweifel Neuvermessung	Während Ausführung	periodisch, bei Zweifel	SPE-VER	SPE-VER	SPE-VER	Unversehrtheit, freie Visur, unveränderte Lage/Höhe	Wiederherstellung, Neuvermessung	Beilage 7.04, Kap. 4.1.2		146
Fixpunktnetz untertag (Tunnelachse): Einrichtung und Vermessung	Geodätische Vermessung	Während Ausführung	Fixpunkt neu: MUL/MUF/SPV: alle 20 m; TBM: alle 50 m; Innengewölbe: alle 50 m	UN	UN	öBL	Messgenauigkeit mittlerer Fehler gem. Beilage 7.04, Tab. 2	Neuvermessung	Buch 01, NPK 113.R991.002	UN	147
Fixpunktnetz untertag / dem UN übergebenes Fixpunktfeld: Sicherung, Erhaltung, Freihalten der Sichten	Visuell, bei Zweifel Neuvermessung	Während Ausführung	Min. alle 2 Wochen / vor Vermessungsarbeiten	UN	UN	öBL	Unversehrtheit, freie Visur, unveränderte Lage/Höhe (Beilage 7.04, Kap. 4.1.1 / 4.2.1)	Wiederherstellung, Neuvermessung	Buch 01, NPK 113.R991.006		148
Fixpunktnetz untertag (Tunnelachse): Kontrollmessung	Geodätische Vermessung	Während Vortrieb	Kontrollmessung aller Hauptfixpunkte: - alle 1000 m Vortrieb; - 1x vor Durchschub TBM durch SZN - 500 m vor	SPE-VER	SPE-VER	öBL	Kontrolle Absteckung Tunnelachse	Information UN, Korrektur	Beilage 7.04, Kap. 4.4.2; Buch 01, NPK 113.R991.005	UN	149
Hilfspunkte für Vortriebskontrolle	Geodätische Vermessung	Während Vortrieb	Hilfspunkte min. alle 25 m	UN	UN	öBL	Maximaler Fehler Tunnelausbruch ≤ 3 cm	Nachprofilierung	---		150
Absteckung & Einmessungen Bauwerkselemente: Konzept in Abstimmung mit Fixpunktnetz	Prüfung und Genehmigung Vermessungs- und Absteckungskonzept	Vor Ausführung	nach jeder Nachführung	UN	öBL	öBL	gem. Vermessungskonzept Beilage 7.04, Kap. 4.3.1	Korrektur und Neueinreichung	Buch 01, NPK 113.R991.001		151
Absteckung & Einmessungen Bauwerkselemente: Lage und Höhe	Geodätische Vermessung	Vor Ausführung	1x	UN	UN	UN	gem. Absteckungsliste und Pläne PV; Messgenauigkeit mittlerer Fehler gem. Beilage 7.04, Tab. 2, Spalte 2 (Lage 5mm, Höhe 3mm)	Korrektur und Neueinmessung	---		152
Durchschlag 2. Röhre bzw. Anschluss LZ und QV an SISTo: Achsabweichung / Durchschlagsgenauigkeit	Geodätische Vermessung	Während Vortrieb	laufend	UN	UN	öBL	gem. Vermessungskonzept Beilage 7.04, Tab. 3.4 (Vermessungsfehler)	Korrektur, Wertminderung	---	Profilaufnahmen	153
Absteckung: Kontrollmessungen	Geodätische Vermessung	vor Ausführung	bei Zweifel, stichprobenmässig	UN	UN	UN	gem. Vermessungskonzept Beilage 7.04, Tab. 3.4 (Vermessungsfehler)	Korrektur, Information öBL/SPE-VER	---		154
Absteckung: Kontrollmessungen	Geodätische Vermessung	nach Absteckung wichtiger Bauwerks-elemente nach Aufforderung UN oder öBL	1x pro gewählter Absteckung	UN	SPE-VER	SPE-VER	gem. Vermessungskonzept Beilage 7.04, Tab. 3.4 (Vermessungsfehler)	Korrektur	Beilage 7.04, Kap. 4.4.2 Buch 1, NPK 113.R991.005		155
ausgeführte Bauwerke: Kontrollmessung	Geodätische Vermessung	nach Aufforderung UN	1x	öBL	SPE-VER	öBL	gem. Plan, innerhalb Toleranzanforderungen	Korrektur, Minderwert	Beilage 7.04, Kap. 4.4.2 Buch 1, NPK 113.R991.005		156

Prüfgegenstand / Zu prüfende Eigenschaft / Zu überwachendes Bauteil	Art der Prüfung	Prüfungszeitpunkt	Häufigkeit / Anzahl	Veranlassung	Durchführung	Interpretation	Qualitätsanforderung	Massnahmen bei ungenügendem Resultat	Vergütung NPK	Art der Protokollierung	Original-Zeile
A.3 · MUL/MUF/SPV: Profilvermessungen im Untertagbau											
MUL/MUF/SPV: Profilvermessungen im Untertagbau								NPK112.285.100			158
MUK/MUF/SPV: Profilgenauigkeit	Profilaufnahme	Während Vortrieb	Min. alle 10 m	UN	UN	öBL	Kein Unterprofil	Nachprofilierung	---	Profilaufnahmen	159
MUL/MUF/SPV: Profilgenauigkeit	Profilaufnahme	Während Vortrieb	Ca. alle 50 m	VermU	VermU	öBL	Kontrolle Ausbruchprofil	Nachprofilierung	---		160
MUL/MUF/SPV: Profilgenauigkeit	Visuell, Messung	Während Vortrieb	Nach jedem Abschlag	UN	UN	UN	Minimierung Überprofil und Auflockerung	Anpassung Abschlagslänge, Sprengschema, Lademenge	---		161
MUL/MUF/SPV: Geologisches Überprofil	Profilaufnahme	Während Vortrieb	Nach jedem Abschlag	UN	UN	öBL	Unverzögliche Aufnahme (Ausmass)	Verfüllen mit Spritzbeton und Verkleidungsbeton (Einhaltung Anforderung Abdichtung)	---		162
MUL/MUF/SPV: Geologisches Überprofil	Profilaufnahme	Während Vortrieb	Nach jedem Abschlag	UN	UN	öBL	Unverzögliche Aufnahme (Ausmass)	Verfüllen mit Spritzbeton und Verkleidungsbeton (Einhaltung Anforderung Abdichtung)	---		163
A.4 · MUL/MUF/SPV: Ausbruchsicherungstyp + Sprengkonzept											
Hinweis: im Kontrollplan AnhA gibt es keinen eigenständigen Abschnitt "Ausbaubögen". Ausbaubögen werden über R164–R168 (Wahl Ausbruchsicherungstyp, Teilausbruchgeometrie) implizit abgedeckt. NPK 112.600 (Stahlbau, R562–R569) enthält nur generische Stahlbau-Kontrollen ohne Bezug auf Ausbaubögen.											
MUL/MUF/SPV: Ausbruchsicherungstyp								NPK112.285.100			164
MUL/MUF/SPV: Abschlagslänge	Visuell, Metermass	während Vortrieb	laufend	UN	UN	öBL	gem. Sicherungsplan und Festlegeblatt	Korrektur	---	Festlegeblatt	165
MUL/MUF/SPV: Neigung Ortsbrust	Visuell, Metermass	während Vortrieb	laufend	UN	UN	öBL	gem. Sicherungsplan und Festlegeblatt	Korrektur	---		166
MUL/MUF/SPV: Wahl Ausbruchsicherungstyp	Auswertung Beobachtungen und Prognose (Visuell, Beobachtung Deformationsmessungen, Geologische Prognose)	im Vortrieb	vor jedem Abschlag	öBL	UN / öBL / GeolB	öBL	gem. Ausbruchsicherungsplänen; gem. Festlegeblatt	Korrektur, Festlegblatt, Sonderfreigabe PV	---		167
MUL/MUF/SPV: Teilfenster, -ausbruchgeometrie	Visuell, Metermass	während Vortrieb	laufend	UN	UN	öBL	gem. Sicherungsplan und Festlegeblatt	Korrektur	---		168
SPV: Sprengkonzept	Visuell (Bohr-, Lade-, Zündschema) , Kontrolle Sprengprotokoll	während Vortrieb	vor jedem Abschlag	öBL	öBL	öBL	Konfomrität mit genehmigtem Sprengkonzept	Korrektur	---	UN	169
B — SICHERUNG DES AUSBRUCHS											
B.1 · Anker / Nägel / Felsanker											
VEG-Permanentanker (NPK 164, R105–R112, R118–R120, R122) hier ausgeschlossen – sie betreffen Baugrubenabschlüsse am Portal, nicht die QV-Sicherung im Gebirge. R116 (Stapelbecken Nord) objektbezogen ausgeschlossen.											
Anker / Versuchsanker									NPK 112.283 / NPK 164 / NPK 276		102
Eignungsnachweis	Zertifikat, Langzeiterfahrungen	Min. 4 Wochen vor Vortrieb	1x pro Ankertyp	UN	UN	öBL	gem. Plan	Produkt wechseln	---	visuell Möglichkeit, Pset der durchgeführten Sichtprüfung hinzuzufügen	103
Chargenkontrolle	Visuell, Lieferschein	im Vortrieb	laufend	UN	UN	UN	gem. Plan	Korrektur	---		104
Toleranzen (Lage und Geometrie)	Visuell, Messung Ankerabstand	im Vortrieb	laufend	öBL	UN / öBL	öBL	gem. Plan	Korrektur	---		124
Anker, Position	Visuell der Lage und Neigung, Messen der Länge und Durchmesser des Bohrlochs. Ankerabstand, Ankerzahl	Während Baugrubenaushub / im Vortrieb	jeder Anker	UN	UN	UN	gem. Plan	Korrektur	---		125
B.2 · Einbau von Bewehrungsmatten Spritzbetonsicherung											
Einbau von Bewehrungsmatten Spritzbetonsicherung											395
Einbauzeitpunkt	Visuell	Während Vortrieb	Jede Montage	UN	UN	UN	gem. Plan	Korrektur	---		396
Befestigung	Visuell	Während Vortrieb	Jede Montage	UN	UN	UN	Min. 4 Befestigungspunkte pro m2	Korrektur	---		397
Überlappung	Visuell, Messung	Während Vortrieb	Jede Montage	UN	UN	UN	gem. Plan, min. 25 cm	Korrektur	---		398
Abstand zum Untergrund	Visuell, Messung	Während Vortrieb	Jede Montage	UN	UN	UN	gem. Plan, keine grösseren zu überspannenden Löcher	Korrektur	---		399
Spritzbetonüberdeckung	Visuell, Messung	Während Vortrieb	Jede Montage	UN	UN	UN	gem. Plan, min. 3 cm	Korrektur	---		400

Prüfgegenstand / Zu prüfende Eigenschaft / Zu überwachendes Bauteil	Art der Prüfung	Prüfungszeitpunkt	Häufigkeit / Anzahl	Veranlassung	Durchführung	Interpretation	Qualitätsanforderung	Massnahmen bei ungenügendem Resultat	Vergütung NPK	Art der Protokollierung	Original-Zeile
B.3 · Verarbeitung Spritzbetonsicherungen											
Verarbeitung Spritzbetonsicherungen											460
Spritzbeton, Beschleuniger	Aufzeichnung der beigefügten Menge	während der Arbeiten	täglich	UN	UN	öBL	gem. Vorversuche	Korrektur	---		461
Einbauzeitpunkt	Visuell	während der Arbeiten	jede Applikation	UN	UN	UN	gem. Plan, gem. Festlegeblatt	Korrektur			462
Spritzbeton, Frühfestigkeit	EN 14488-2	während der Arbeiten	1 mal alle 250m2 oder 2x pro Monat	UN	UN	öBL	gem. SIA 198 / SN 206	Anpassen der Rezeptur	Buch 1, NPK 112.482.102	UN Protokoll	463
Hohlstellen	Visuell, Abklopfen	während der Arbeiten	jede Applikation	UN	UN	UN	Hohlraumfreier Verbund zu Untergrund	Korrektur, Nachsicherung			464
Spritzschatten	Visuell	während der Arbeiten	jede Applikation	UN	UN	UN	Verbund Stahleinbau zu Untergrund	Korrektur			465
Rückprall	Visuell	während der Arbeiten	jede Applikation	UN	UN	UN	Kein Einspritzen von Rückprall	Korrektur, Minderwert			466
Soll-Stärke Spritzbetonsicherung	Visuell, Metermass	während der Arbeiten	alle 10 m	UN	UN	öBL	Zulässige Abweichung gem. AQV	Korrektur, Minderwert			467
Soll-Stärke Spritzbetonsicherung	Bohrkernentnahme	während der Arbeiten	1x mindestens alle 100 m2	UN	UN	öBL	gem. Plan. Toleranz +- 2cm	Korrektur, Minderwert	Buch 1, NPK 112.486.001	UN Protokoll	468
Spritzbetonlagen	Haftverbund (Visuell)	im Vortrieb	laufend	UN	UN	öBL	Vornässen bzw. Reinigen des Untergrundes	Nacharbeiten	---		469
Spritzbetonrückprall, Entsorgung	Visuell	während der Arbeiten	laufend	UN	UN	UN	vom Aushub getrennt entsorgen	Korrektur	---		470
B.4 · Material-Vorversuche und Eignungsnachweise (Sicherungssysteme)											
Auswahl aus NPK 112.420 (Beton-Eignungsnachweise), 112.450 (Ausgangsstoffe), 112.460 (Bewehrungen). Ausgeschlossen: Tübbingelemente, WELK-Fertigteile, Ortbeton-Festbetonkontrollen (→ Phase IAB).											
Eignungsnachweise und Vorversuche											342
Erstprüfung oder dokumentierte Langzeiterfahrungen	Dokumentation	Min. 4 Wochen vor dem 1. Betonieren		UN	UN	UN	Verwendung von Tiefbaubetonen	Betonwerk wechseln	---		343
Vorversuche Spritzbeton zur Bestimmung der Mischung (Siebkurve GFB, Zementmenge, Zusatzmittel);	Prüfungen für die Vorversuche gem. Tabelle 3 (Frischbetonprüfungen und Festbetonprüfungen)	Min. 4 Wochen vor dem 1. Betonieren	1x, bei Zweifel	UN	UN	öBL	gem. Betonsortentabelle Anhang B, Beilage 4.08 AQV	Korrektur	Buch 1, NPK112.487		345
Stahlfasergehalt Ausbruchsicherung	Laborprüfung	im Vortrieb	Stichproben, bei Zweifel	öBL	UN	öBL	gem. Energieabsorptionsklasse	Anpassung der Betonrezeptur	Buch 1, NPK 112.420.201		355
Prüfungen an Ausgangsstoffen									NPK112.450		372
Werkseigene Produktionskontrolle für GFB (Transportbeton)	Konformitätserklärung des Betonherstellers sowie Zertifikat einer CH-Konformitätsbewertungsstelle	Min. 4 Wochen vor dem 1. Betonieren	1x, bei Wechsel Lieferant	UN	UN	UN		Betonwerk wechseln	---		373
Betonausgangsstoffe	Zertifikat	Min. 4 Wochen vor dem 1. Betonieren		UN	UN	UN	Sämtliche Betonausgangsstoffe müssen den gültigen Normen entsprechen	Lieferant, Hersteller des betreffenden Ausgangsstoffes wechseln	---		374
GFB von Los 111: Übereinstimmung mit Festlegung	Lieferschein	Bei Lieferung	Jede Lieferung	UN	UN	UN	gem. Festlegung AQV	Rückweisung	---		375
Prüfung Plattigkeitskennzahl	Laborprüfung	mit Vorversuch	1x monatlich (Stichprobe), bei Zweifel	UN	UN	UN	gem. Festlegung AQV	Rückweisung	Buch 1, NPK 112.482.101		376
Korngrössenverteilung	Laborprüfung	mit Vorversuch	1x monatlich (Stichprobe), bei Zweifel	UN	UN	UN	gem. Festlegung AQV	Rückweisung	Buch 1, NPK 112.482.201		377
Wasserlösliche Chloride	Laborprüfung	mit Vorversuch	1x monatlich (Stichprobe), bei Zweifel	UN	UN	UN	gem. Festlegung AQV	Rückweisung	Buch 1, NPK 112.482.301		378
Gesamt-Schwefelgehalt	Laborprüfung	mit Vorversuch	1x monatlich (Stichprobe), bei Zweifel	UN	UN	UN	gem. Festlegung AQV	Rückweisung	Buch 1, NPK 112.482.302		379
AAR-Beständigkeit mit Microbar-Prüfung	Laborprüfung	mit Vorversuch	1x monatlich (Stichprobe), bei Zweifel	UN	UN	UN	gem. Festlegung AQV	Rückweisung	Buch 1, NPK 112.482.401		380
Betonstahl und nicht rostende Stähle											382

Prüfgegenstand / Zu prüfende Eigenschaft / Zu überwachendes Bauteil	Art der Prüfung	Prüfungszeitpunkt	Häufigkeit / Anzahl	Veranlassung	Durchführung	Interpretation	Qualitätsanforderung	Massnahmen bei ungenügendem Resultat	Vergütung NPK	Art der Protokollierung	Original-Zelle
Stahlqualität	Visuell, Lieferantenattest	Bei Lieferung	Jede Lieferung	UN	UN	UN	Listung im „Register normkonformer Betonstähle“; Duktilitätsklasse B	Rückweisung	---		383
Biegeform, Masstoleranzen	Visuell, Metermass	Bei Lieferung	Jede Lieferung	UN	UN	UN	gem. Plan	Rückweisung	---		384
C — INNENAUSBAU (IAB)											
C.1 · Eignungsnachweise & Vorversuche Ortbeton (Ergänzung zu B.4)											
Vorversuch Ortbeton-Mischung – Ergänzung zu den bereits in B.4 enthaltenen Eignungsnachweisen (R343, R372–R380, R382–R384). Ausgeschlossen: Tübbingelemente, WELK-Fertigteile (R346–R348).											
Vorversuche Beton zur Bestimmung der Mischung (Siebkurve GFB, Zementmenge, Zusatzmittel);	Prüfungen für die Vorversuche gem. Tabelle 2 (Frischbetonprüfungen und Festbetonprüfungen)	Min. 4 Wochen vor dem 1. Betonieren	1x, bei Zweifel	UN	UN	öBL	gem. Betonsortentabelle Anhang B, Beilage 4.08 AQV	Korrektur	Buch 1, NPK112.487		344
C.2 · Frischbetonkontrollen bei Anlieferung											
Frischbetonkontrollen bei Anlieferung (Erstherstellung und stetige Herstellung)											403
Frischbeton	Visuell, Lieferschein	Bei Lieferung	Jede Lieferung	UN	UN	UN	gem. Plan	Rückweisung	---	Die Bauleitung erhält Lieferscheine und Protokolle	404
Probenentnahme	Visuell	Bei Lieferung	Jede Probenentnahme	UN	UN	UN	Probenentnahme: Bei Pumpbeton möglichst nahe am Ende Pumpenleitung	Rückweisung	---		405
Temperatur Frischbeton	Thermometer mit einer Ablesepräzision von 1°C, Kalibrierung alle 2 Jahre	Bei Lieferung	Ortbeton: Volumen > 100 m3: Alle 100 - 200 m3 oder 1x pro Woche; Spritzbeton: 1 mal alle 250m2 oder 2x pro Monat Zeitgleich: Herstellung der für die Festbetonprüfungen benötigten Probekörper	UN	UN	UN	gem. SIA 262 und SN EN 206-1 ≥ 5 °C und ≤ 30 °C	Korrektur, Rückweisung	Buch 1, NPK112.481.300ff		406
Konsistenz	Verdichtungsmass (Walz) nach SN EN 12350-4	Bei Lieferung		UN	UN	UN	Gem. SN EN 206, Tab NA.13	Korrektur, Rückweisung	Buch 1, NPK112.481.300ff		407
Frischbetonrohddichte	Versuch	Bei Lieferung		UN	UN	UN	± 3%	Korrektur, Rückweisung	Buch 1, NPK112.481.300ff		408
w/z-Wert	Lieferschein, Prüfverfahren nach SIA 262/1, Anhang H	Bei Lieferung		UN	UN	UN	gem. SIA 262 und SN EN 206-1 Festgelegter Wert +0.02	Korrektur, Rückweisung	Buch 1, NPK112.481.300ff		409
C.3 · Schalung											
Schalung											410
Schalungstyp, Ausbildung	Visuell	Vor Schalbeginn	Laufend	UN	UN	UN	gem. Plan	Korrektur	---	Abnahmeprotokoll	411
Schalungstrennmittel	Visuell, Hinweise Trennmittelhersteller	Vor Betonieren	Laufend	UN	UN	UN	Einhaltung der Hinweise des Trennmittelherstellers zur Verarbeitung seines Produktes	Korrektur	---		412
Aussparungen	Visuell, Metermass	Vor Betonieren	Jede Aussparung	UN	UN	UN	gem. Plan	Korrektur	---		413
Vollständigkeit Einbau- und Ausrüstungsteile	Visuell	Vor Betonieren	Laufend	UN	UN	UN	gem. Plan	Korrektur	---		414
Funktionstüchtigkeit: Höhe, Lage, Verankerung, Sicherung gegen Aufschwimmen, Belüftung, Entwässerung	Visuell	Vor Betonieren	Laufend	UN	UN	UN	gem. Plan	Korrektur	---		415
Stösse und Fugen	Visuell	Vor Betonieren	Jeder Stoss/Fuge	UN	UN	UN	Kein Auslaufen von Zementmilch möglich	Korrektur	---		416
Dreikantleisten	Visuell, Metermass	Vor Betonieren	Laufend	UN	UN	UN	Kanten mit gehobelten Dreikantleisten gebrochen, gem. Plan	Korrektur	---		417
Sauberkeit der Schalung vor Betonierbeginn	Visuell	Vor Betonieren	Laufend	UN	UN	UN	Saubere Schalung (keine gebrochenen Bindedrähte, etc.)	Reinigung	---		418
Masstoleranzen	Visuell, Metermass	Vor Betonieren	Laufend	UN	UN	UN	gem. Plan	Korrektur	---		419

Prüfgegenstand / Zu prüfende Eigenschaft / Zu überwachendes Bauteil	Art der Prüfung	Prüfungszeitpunkt	Häufigkeit / Anzahl	Veranlassung	Durchführung	Interpretation	Qualitätsanforderung	Massnahmen bei ungenügendem Resultat	Vergütung NPK	Art der Protokollierung	Original-Zelle
C.4 · Verarbeitung von Ortbeton											
Verarbeitung von Ortbeton											420
Transport, Einbringen und Verdichten von Beton											421
Bekanntgabe Ersatzmischwerk	Visuell	Vor Betonierbeginn		UN	UN	UN	Ersatzmischwerk, welches sämtliche Anforderungen erfüllt	Anderes geeignetes Mischwerk	---		422
Transport Frischbeton	Visuell	Bei Lieferung	Jede Lieferung	UN	UN	UN	Zugelassene Fahrmascher / Rührwerk	Rückweisung	---		423
Fallhöhe Beton	Visuell, Metermass	Bei Betonieren	Laufend	UN	UN	UN	< 2.00 m bzw. bei Fallhöhen ≥ 2.00 m Fallrohr bzw. Schlauch verwenden	Korrektur	---		424
Einbringdicke	Visuell, Metermass	Bei Betonieren	Laufend	UN	UN	UN	Waagrechte Schichten von ≤ 0.50 m Dicke, keine Abweichung	Korrektur	---		425
Rüttelflasche	Visuell	Bei Betonieren	Laufend	UN	UN	UN	Verwendung von Innenrüttlern, Abstand Eindringpunkte max. 8x ØRüttelflasche Eindringen in jeweils verdichtete Schicht	Korrektur	---		426
Schalung	Visuell	Bei Betonieren	Jede Betonieretappe	UN	UN	UN	Verformung ≤ H/700 bzw. L/700	Betonierstopp	---		427
Kommunikationsmöglichkeit zwischen Baustelle, Mischwerk und Transportfahrzeug	Visuell	Bei Betonieren	Laufend	UN	UN	UN	Vorhandensein	Korrektur	---		428
Sommer-/Wintermassnahmen	Lufttemperatur		Gemessen um 07:00 Uhr am Betoniertag	UN	UN	öBL	Temperatur 5° ≤ T ≤ 25°C	Gem. BB Pos. 821.220	---		429
Nichtgeschalte Oberflächen	Visuell	Vor Nachbehandlung	Jede Betonieretappe	UN	UN	UN	Genau im Profil abziehen und abtalschieren	Korrektur	---		430
Ausschalen von Beton und Entfernen von Gerüsten											431
Ausschalfrist	Visuell		Jedes Bauteil	UN	UN	UN	Mindestens 5 Tage falls nichts Anderes vorgegeben	Korrektur	---		432
Bindelöcher	Visuell		Jedes Bauteil	UN	UN	UN	Verschliessen mit Kunststoffzapfen	Korrektur	---		433
Nachbehandlung von Beton											434
Eignungsnachweis	Konzept, Dokumentation	Min. 4 Wochen vor Ausführung		UN	UN	UN	Normen-/gem. Plan	Überarbeitung	---		435
Beginn	Visuell	Nach dem Ausschalen	Jedes Bauteil	UN	UN	UN	Unmittelbar nach dem Ausschalen bzw. nach dem Abtalschieren	Korrektur	---		436
Minstdauer	Visuell, Messung	Nach dem Ausschalen	Jedes Bauteil	UN	UN	UN	Mindestens 7 Tage falls nichts Anderes vorgegeben	Korrektur / Rückweisung, evtl. zusätzliche Prüfungen (Karbonatisierungswiderstand)	---		437
Art	Visuell	Nach dem Ausschalen	Jedes Bauteil	UN	UN	UN	Feuchthalten aller Oberflächen: - Abdecken mit feuchten Jutematten oder Folien - evtl. Wassernebel - nicht mit Wasser spritzen Schutz vor Austrocknung, Auskühlung oder zu starker Erwärmung	Korrektur / Rückweisung, evtl. zusätzliche Prüfungen (Karbonatisierungswiderstand)	---		438
Nachbehandlungsmittel	Visuell/ Attest	Nach dem Ausschalen	Jedes Bauteil	UN	UN	UN	Nachweisliche Eignung für die vorgesehene Anwendung Sperrkoeffizient nach 72 h ≥ 75%, Prüfung gem. CEN/TS 14754-1	Korrektur / Rückweisung, evtl. zusätzliche Prüfungen	---		439
Fertige Betonoberflächen											440
Betonierte Oberfläche	Visuell	Nach dem Ausschalen	Jedes Bauteil	UN	UN	UN	Keine Verschmutzung, insbesondere keine Rostfahnen	Korrektur	---	Endabnahme	441
Lunker	Augenschein mittels 5 Rp-Münze	Nach dem Ausschalen	Jedes Bauteil	UN	UN	UN	Lunker-Ø < Ø 5 Rp-Münze	Ausbesserung mittels Reprofilierungsmörtel, Minderwert	---		442
Bewehrungsüberdeckung am fertigen Bauwerk	Profometer / lokal, entlang von Linien (Profilen) oder flächig	Nach dem Ausschalen	Jedes Bauteil / 1x pro Bauteil	UN	UN	UN	gem. Plan;	Evtl.: ≥ 1 Lage(n) Zusatzanstrich (Hydrophobierung oder Beschichtung) oder Wertminderung, Abbruch	---		443

Prüfgegenstand / Zu prüfende Eigenschaft / Zu überwachendes Bauteil	Art der Prüfung	Prüfungszeitpunkt	Häufigkeit / Anzahl	Veranlassung	Durchführung	Interpretation	Qualitätsanforderung	Massnahmen bei ungenügendem Resultat	Vergütung NPK	Art der Protokollierung	Original-Zeile
C.5 · Festbetonkontrollen (Ortbeton)											
Ausgeschlossen: R353 (Druckfestigkeit 9h WELK/Tübbing), R354 (E-Modul WELK), R355 bereits in B.4, R357–R361 (residuale Biegezugfestigkeit / Stahlfasergehalt Tübbingelemente).											
Festbetonkontrollen (Erstherstellung und stetige Herstellung)											349
Druckfestigkeit 7, 28 und 90 Tage; Alle Betontragwerke	Prüfung mit Rückprallhammer	Nach Einbau	Stichproben	öBL	öBL	öBL	Geforderte Festigkeitsklasse / SN EN 206, Ziffer 8.2.1.3, Tab. 12	Kontrollprüfung an Bohrkern anordnen	---	Protokoll	350
Druckfestigkeit 7, 28 und 90 Tage an Würfel 15/15/15 cm; Alle Betontragwerke	Laborprüfung gemäss SN EN 12390-3	Nach Lieferung	Ortbeton: 28d: 1 Serie pro 600 m3 oder 1 Serie / Woche Spritzbeton: 28d: 1 Serie pro 250 m3; pro Sorte: 7d, 90d, 365: 3x/Jahr	UN	UN	UN	Geforderte Festigkeitsklasse / SN EN 206, Ziffer 8.2.1.3, Tab. 12	Massnahmen bei Nichtkonformität des Produktes gemäss Kap. 8.4, SN EN 206-1 Wertminderung, Abbruch	Buch 1, NPK112.421.110ff		351
Druckfestigkeit 90 und 365 Tage an Bohrkern 50 mm; Alle permanenten Betontragwerke	Laborprüfung gemäss SN EN 12390-1	Nach Einbau	Ortbeton: 1 Serie pro 600 m3 oder min. 1 Serie / Woche bzw. 1 Serie pro Bauteiltyp und 50 m Tunnel	UN	UN	UN	Geforderte Festigkeitsklasse / SN EN 206, Ziffer 8.2.1.3, Tab. 12	Massnahmen bei Nichtkonformität des Produktes gemäss Kap. 8.4, SN EN 206-1 Wertminderung, Abbruch	Buch 1, NPK112.421.120ff		352
Maximale Bauteiltemperatur, alle perman. Betontragwerke	Thermometer mit einer Ablesepräzision von 1°C, Kalibrierung alle 2 Jahre	Während Abbinden	Jedes Verkleidungs-, Zwischendeckenelement und Ortbeton-WELK Element	UN	UN	UN			--		356
C.6 · Prüfungen an Beton (2) – Durabilität nach Expositionsklassen											
Prüfungen an Beton (2)									NPK112.430		362
Wasserleitfähigkeit; für Beton mit Expositionsklasse XC3	Laborprüfung SIA 262/1, Anhang A	Nach Lieferung	min. 2 Serien/Jahr o. alle 1000 m3, ab 4000 m3 alle 2000 m3 ab 30'000 m3 alle 3000 m3 Nicht erforderlich, wenn gleichzeitig Chloridwiderstandsprüfungen durchgeführt werden gemäss [1] Ziff. 8.2.3.3.4	öBL	UN	öBL	qw ≤ 10 g/m2h	Massnahmen bei Nichtkonformität des Produktes gemäss Kap. 8.4, SN EN 206-1 Wertminderung, Abbruch	Buch 1, NPK112.431.110	Protokoll	363
Chloridwiderstand für Beton mit Expositionsklasse XD2b, XD3	Laborprüfung SIA 262/1, Anhang B	Nach Lieferung	gemäss Tabelle NA.9 [1] mind. 4 pro Jahr oder alle 125 m3 ab 1000 m3 alle 250 m3	öBL	UN	öBL	Chloridmigrationskoeffizient: DCI ≤ 10 · 10-12 m2/s		Buch 1, NPK112.431.120		364
Frost-Tausalzwiderstand für Beton mit Expositionsklasse XF2, XF3 und XF4	Laborprüfung SIA 262/1, Anhang C	Nach Lieferung		öBL	UN	öBL	gem. Beilage 4.08, Anhang B		Buch 1, NPK112.432.101		365

Prüfgegenstand / Zu prüfende Eigenschaft / Zu überwachendes Bauteil	Art der Prüfung	Prüfungszeitpunkt	Häufigkeit / Anzahl	Veranlassung	Durchführung	Interpretation	Qualitätsanforderung	Massnahmen bei ungenügendem Resultat	Vergütung NPK	Art der Protokollierung	Original-Zeile
Karbonatisierungswiderstand für Beton mit Expositionsklasse XC3, XC4 und XD1, XD2a, XF1	Laborprüfung SIA 262/1, Anhang I	Nach Lieferung	gemäss Tabelle NA.9 [1] mind. 4 pro Jahr oder alle 125 m3 ab 1000 m3 alle 250 m3 ab 2000 m3 alle 500	öBL	UN	öBL	Karbonatisierungskoeffizient ≤ 5 mm/Jahr1/2		Buch 1, NPK112.432.303		366
Sulfatwiderstand für Beton mit Expositionsklasse XA	Kontrolle Zementart gemäss Tabelle NA.11;	vor Herstellung	jede Mischung	öBL	UN	öBL	Gemäss [2], Ziff. NA.5.3.4.9 (gültig ab 1.5.2022) sind Zemente mit hohem Sulfatwiderstand gemäss SN EN 197-1 oder SN EN 206:2013+A2:2021, Tabelle NA.11 zu verwenden.				367
Sulfatwiderstand für Beton mit Expositionsklasse XA Für Betonsorten C, D und F eigentlich nicht erforderlich, sofern Zemente gemäss [3], Tabelle NA.11 verwendet werden. Es wird trotzdem eine Serie pro Produktionsjahr verlangt.	Laborprüfung SIA 262/1, Anhang D	Nach Herstellung	In Anlehnung an Tabelle NA.9 [1]: min. 2 Serien/Jahr o. alle 1000 m3, ab 4000 m3 alle 2000 m3 ab 30'000 m3 alle 3000 m3 Für Betonsorten C, D und F: 1 Serie pro Produktionsjahr;	öBL	UN	öBL	Sulfatdehnung unter Sulfateinwirkung DIS≤0.1%		Buch 1, NPK112.433.101		368
Schwinden / Kriechen	Laborprüfung	Nach Lieferung	Auf Anordnung BL	öBL	UN	öBL	gem. SIA 261/1		Buch 1, NPK112.434.101		369
AAR – Beständigkeit: Beton-Performance Test	Laborprüfung	Ergebnisse min. 4 Wochen vor dem 1. Betonieren	1x pro Jahr und Referenzmischung	UN	UN	UN	Zertifizierung Gesteinskörnung Zertifizierung Beton	Wertminderung	Buch 1, NPK112.431.204		370
C.7 · Einbau von Betonstahl und nicht rostenden Stählen											
Material-Vorversuche Betonstahl (R382–R384) bereits in B.4. Ausgeschlossen: R385 (Bewehrungsgeometrie Tübbingelement).											
Einbau von Betonstahl und nicht rostenden Stählen											386
Position und Höhenlage Verankerungsgarnituren	Einmessen mit Bezug zu Fixpunkten. Masse dokumentiert	Abnahme 1 AT vor Betonierbeginn	Jede Garnitur	UN	UN	UN	gem. Plan	Korrektur	---	Betonsfreigabe	387
Position und Höhenlage Verankerungsgarnituren	Kontrollmessung	Abnahme 1 AT vor Betonierbeginn	Kontrollprüfung auf Anordnung BL	öBL	VermU	öBL	gem. Plan	Massnahmen in Rücksprache mit PV	---		388
Anordnung Betonstahl	Visuell, Metermass	Abnahme 1 AT vor Betonierbeginn	Jede Betonieretappe	öBL	UN	öBL	gem. Plan / Einhaltung Masstoleranzen	Abnahme 1 AT vor Betonierbeginn Korrektur, evtl. Verschiebung des Betonierdatums zu Lasten UN	---		389
Verankerungslängen, Stösse, Umlenkungen, Übergreifungsstösse	Visuell, Metermass	Abnahme 1 AT vor Betonierbeginn	Jede Betonieretappe	UN	UN	UN	gem. Plan / Einhaltung Masstoleranzen		---		390
Bewehrungsüberdeckung	Visuell, Metermass	Abnahme 1 AT vor Betonierbeginn	Jede Betonieretappe	UN	UN	UN	gem. Plan, Toleranz Dcnom = ± 5 mm (in Abweichung SIA 262, Ziff. A.3.5)		---		391
Bewehrungsüberdeckung	Zerstörungsfreies Messen der Bewehrungsüberdeckung; Messung kalibriert durch zerstörende Kontrolle (Anbohren), statistisch ausgewertet	Nach Ausschalung	Stichproben, Bauwerksabnahme, auf Anordnung BL	öBL	UN	öBL			Buch 1, NPK112.461.001		392
Abstandhalter	Zertifikat / Visuell, Anzahl	Abnahme 1 AT vor Betonierbeginn	Jede Betonieretappe	UN	UN	UN	Betonklötzchen mit nichtrostendem Bindedraht; gleiche Eigenschaften wie der umgebende Konstruktionsbeton Keine Abweichungen zulässig / 4 St/m2 Keine stabförmigen Profile und/oder Unterlagsklötzchen Ausreichend fixiert, kein nachträgliches Verdrehen		---		393
Bindedrähte	Zertifikat / Visuell, Metermass	Während Verarbeitung	Jede Betonieretappe	UN	UN	UN	Korrosionsarm (= feuerverzinkt) oder korrosionsbeständig (= Chromstahl); einwandfrei und in genügendem Ausmass gebunden; Weggebogen von der Schalung (nach innen), so dass geforderte Bewehrungsüberdeckung gewährleistet bleibt	Korrektur	---		394

Prüfgegenstand / Zu prüfende Eigenschaft / Zu überwachendes Bauteil	Art der Prüfung	Prüfungszeitpunkt	Häufigkeit / Anzahl	Veranlassung	Durchführung	Interpretation	Qualitätsanforderung	Massnahmen bei ungenügendem Resultat	Vergütung NPK	Art der Protokollierung	Original-Zeile
C.8 · Einbau einbetonierter Werkleitungen (Kabelrohre, Kanalisationen, Wasserleitungen)											
Materialqualifikation (R297–R302) plus Einbauprüfungen (R311–R336). Ausgeschlossen: R303 Schlauchliner, R305–R310 Belagseinbau (Fahrbahn), R337–R339 Werkleitungsgraben (nicht QV-relevant).											
Prüfungen an Materialien für Rohrleitungen und Schächte									NPK112.350		297
Kabelrohr: Typ, Qualität	Eignungsnachweis (Zertifikat, Dokum.) Lieferschein, Visuele	Vor Baubeginn Vor Einbau / Montage	jede Lieferung	UN	UN	öBL	gem. Plan	Rückweisung	---	Betonsfreigabe	298
Leitungen: Typ, Qualität	Eignungsnachweis (Zertifikat, Dokum.) Lieferschein, Visuele	Vor Baubeginn Vor Einbau / Montage	jede Lieferung	UN	UN	öBL	gem. Plan	Rückweisung	---		299
Beschichtung: Typ, Qualität	Eignungsnachweis (Zertifikat, Dokum.) Lieferschein, Visuele	Vor Baubeginn Vor Einbau / Montage	jede Lieferung	UN	UN	öBL	gem. Plan	Rückweisung	---		300
Schächte: Typ, Qualität	Eignungsnachweis (Zertifikat, Dokum.) Lieferschein, Visuele	Vor Baubeginn Vor Einbau / Montage	jede Lieferung	UN	UN	öBL	gem. Plan	Rückweisung	---		301
Schachtdeckel: Typ, Qualität	Eignungsnachweis (Zertifikat, Dokum.) Lieferschein, Visuele	Vor Baubeginn Vor Einbau / Montage	jede Lieferung	UN	UN	öBL	gem. Plan. Tragfähigkeitsklasse gem. Zuordnung (SIA 205 (2003), Ziff. 2.1.4.2	Rückweisung	---		302
Unterirdische bzw. eingedeckte Werkleitungen und Bauwerke											311
neue, unterirdische Bauwerke (Werkleitungen etc.)	Vermessung, Nivellement	vor dem Einbetonieren / Verfüllen	jede Etappe	UN	SPE-VER	öBL	gem. Plan	Korrektur	Beilage 7.04, Kap. 4.6.2	Betonsfreigabe	312
Einbau Kabelrohre											313
Kabelrohr: Position	Visuell, Messung	Während Einbau	laufend	UN	UN	UN	Lage gem. Plan, Muffen dicht gestossen, Distanzhalter montiert, Verlegeradius eingehalten, Welligkeit max 1cm/10m	Korrektur	---	Betonsfreigabe + Kalibrationsprotokoll	314
Kabelrohr: Auftriebssicherung, Distanzhalter	Visuell	Während Einbau	laufend	UN	UN	UN	Stabile Halterung	Korrektur	---		315
Kabelrohr: Rohrquerschnitt, Geometrie	Kalibrierung	Vor Abnahme	Jedes Rohr	UN	UN	öBL	Keine Einschnürungen, 90% des Sollinnendurchmessers	Korrektur, Minderwert, Ersatz	---		316
Kabelrohr: Rohrverbindung nach Verlegung	Schnureinzug	Nach Kalibrierung	Jedes Rohr	UN	UN	öBL	Kunststoffschnüre PP 4mm mit Reiskraft 3kN, Schnurende an Schächten	Korrektur	---		317
Rohrblock: Anzahl Rohre	Visuell	vor Eindeckung	Stichproben	öBL	UN	öBL	gem. Plan	Abriss und Neubau, Ergänzung	---		318
Rohrblock: Nennweite, Kalibrieren	Visuell	vor Eindeckung	Stichproben	öBL	UN	öBL	gem. Plan	Abriss und Neubau, Ergänzung	---		319
Einbau Kanalisationen und Entwässerungsleitungen											320
Leitungen: Lage, Gefälle	Vermessung, Nivellement	vor dem Einbetonieren / Verfüllen	jede Etappe	UN	UN / öBL	öBL	gem. Plan	Korrektur	---	Betonsfreigabe + Protokoll	321
Leitungen: Anschlüsse, Muffen	Visuell	vor dem Einbetonieren / Verfüllen	jede Etappe	UN	UN	öBL	dicht, festsitzend	Korrektur	---		322
Leitungen: Rohreinführungen	Visuell	vor dem Einbetonieren / Verfüllen	jede Etappe	UN	UN	öBL	dicht, festsitzend, nicht mehr als 3cm vorstehend	Korrektur	---		323
Leitungen: Zustand	Visuell	vor dem Einbetonieren / Verfüllen	jede Etappe	UN	UN	öBL	Neuwertig, schadenfrei	Korrektur	---		324
Leitungen: Durchfluss	Kanal-TV	nach dem Einbetonieren / Verfüllen	jede Etappe	UN	UN	öBL	Durchflussfunktion, Keine Ablagerungen, keine Beschädigung	Korrektur	Buch 1, NPK 112.388.001		325
Schmutzwasserleitungen (Kanalisation): Dichtigkeit	Dichtheitsprüfung gem. SIA 190, Anhang A: Verfahren W	vor dem Einbetonieren / Verfüllen	jede Etappe	UN	UN	öBL	gem. SIA 190, Anhang A: Verfahren W	Korrektur	Buch 1, NPK 112.386.101		326
Drainage-, Bergwassersammel-leitungen: Durchlässigkeit	Visuell	Vor Einbetonieren	jede Leitung	UN	UN	öBL	Durchlässigkeit der Sickerpackung, Durchlässigkeit der Drainageschlitze	Korrektur	---		327
Sicherpackung	Visuell	Nach fertigstellen Leitungsstrang	Jeder Leitungsstrang	UN	UN	öBL	Funktionalität, Geotextil	Korrektur	---		328
Schächte: Lage, Höhe	Vermessung	vor dem Einbetonieren und Verfüllen	einmalig	UN	UN	öBL	gem. Plan Masstoleranzen Deckel ±10mm;	Korrektur	---		329
Schächte: Anschlüsse	Visuell	vor dem Einbetonieren und Verfüllen	einmalig	UN	UN	öBL	gem. Plan	Korrektur	---		330
Schächte: Dichtigkeit	Dichtheitsprüfung gem. SIA 190, Anhang A: Verfahren W	vor dem Einbetonieren / Verfüllen	jede Etappe	UN	UN	öBL	gem. SIA 190, Anhang A: Verfahren W	Korrektur	Buch 1, NPK 112.386.201		331
Einbau Wasserleitungen (inkl. Sanitäranlagen, Pumpleitungen und Pumpen Wasserhaltung)											332
Druckleitungen: Position, Lage	Visuell, Handmessung ? Wie 326 ?	während Montage	jedes Element	UN	UN	UN	gem. Plan	Korrektur	---	Betonsfreigabe + Protokoll	333
Druckleitungen: Verbindungen	Visuell	während Montage	jedes Element	UN	UN	UN	Fachgerecht	Korrektur	---		334
Sanitäranlagen: Montage	Visuell	während Montage	jedes Element	UN	UN	UN	Fachgerecht	Korrektur	---		335
Pumpleitungen Wasserhaltung:	Visuell	während Bau	laufend	UN	UN	UN	Funktionalität, Dichtigkeit	Korrektur	---		336

Prüfgegenstand / Zu prüfende Eigenschaft / Zu überwachendes Bauteil	Art der Prüfung	Prüfungszeitpunkt	Häufigkeit / Anzahl	Veranlassung	Durchführung	Interpretation	Qualitätsanforderung	Massnahmen bei ungenügendem Resultat	Vergütung NPK	Art der Protokollierung	Original-Zeile
C.9 · Abdichtung (nur KDB) – Material-Eignungsnachweise											
Nur KDB-Abdichtung. Ausgeschlossen: R479 Hochbau, R481 Fahrbahnplatten, R482–R483 PBD-Produktekonformität.											
Prüfungen an Dichtungsbahnen und Dichtungsschichten									Buch 1, NPK 112.540		478
Abdichtungssystem von Bauten unter Terrain und Untertag: Systemkonformität	Ausführungsanweisung, Systemaufbau, Verfahren und Geräte, Umgebungsbedingungen, Verlegeplan	4 Wochen vor Einbau	1x, bei Systemänderung	UN	UN	öBL	gem. Plan, nach SIA 272	Korrektur	---	Datenblätter	480
KDB-Abdichtungen Produktekonformität	Zertifikat	1 Woche vor Einbau	1x, bei Zweifel	UN	UN	öBL	gem. LV und Vorschriften, CE-Kennzeichnung (SIA 281 (2013) Ziff. 4, Gem. Tab. 22, Anhang C.5, SIA 272 (2009)	Wechsel Produkt	---		484
KDB-Abdichtungen Produktekonformität	Visuell, Lieferschein	vor Einbau	Jede Lieferung	UN	UN	öBL		Rückweisung	---		485
Alle Dichtungsbahnen, sichtbare Mängel	Visuell	vor Einbau	jede zu verlegende Dichtungsbahn	UN	UN	UN	keine sichtbaren Mängel	Rückweisung	---		486
Prüfungen an Drainageschichten und Schutzsschichten									Buch 1, NPK 112.550		487
Schutzvlies, Chargenkontrolle	Visuell, Lieferschein	Vor Einbau	Jede Lieferung	UN	UN	öBL	gem. LV und Vorschriften,	Rückweisung	---	Datenblätter	488
Drainagematten, Chargenkontrolle	Visuell, Lieferschein	Vor Einbau	Jede Lieferung	UN	UN	öBL	gem. LV und Vorschriften,	Rückweisung	---		489
Schutzschichten Chargenkontrolle	Visuell, Lieferschein	Vor Einbau	Jede Lieferung	UN	UN	öBL	gem. LV und Vorschriften,	Rückweisung	---		490
C.10 · Abdichtung: Untergrund-Vorbereitung (für alle Abdichtungssysteme)											
Abdichtungsträger (Spritzbeton-Oberfläche) zur Vorbereitung der KDB. Ausgeschlossen: R500–R503 (PBD-spezifische Untergrund-Prüfungen).											
Untergrund									Buch 1, NPK 112.581		493
für alle Abdichtungssysteme											494
Abdichtungsträger auf Spritzbetonsicherung (Ebenheit/Welligkeit Untergrund)	Vollflächige Profilvermessung Laserscan, Raster von 1 cm x 1 cm (Genauigkeit ± 1 mm)	vor Einbau Abdichtung	1x, ganze Abwicklung und Länge alle Spritzbeton-sicherungen (exkl. TBM)	öBL	UN	öBL	gem. Plan. Soll-Ist Vergleich, Anforderungen an Ebenheit/Welligkeit gem. SIA 272, Anhang B.1, Tab. 16, Typ oV	Korrektur	Buch 1, NPK 112.823.004	Laserscan	495
Abdichtungsträger übrige Bauwerke: Ebenheit / Welligkeit	mit 2m Latte (VSS 40 517, 518 (ganze Fläche quer und längs)	vor Einbau Abdichtungsbahn	jede Etappe	UN	UN	öBL	Keine Senken, keine Heben, Abdichtung mit PBD: ≤ 15 mm	Korrektur	Buch 1, NPK 112.581.203	Abnahmeprotokoll 1 Abdichtung	496
Oberflächenbeschaffenheit	Visuell	Vor der weiteren Arbeitsetappe	jede Etappe	UN	UN	öBL	sauber abgezogen, keine Brauen, keine Kanten, keine Überzähne, reine Reste von Beschichtungen und Nachbehandlungs-filmen, keine Verunreinigungen und keine Zementhaut, keine rauen und porösen Stellen (Kiesnester, Lunkern, Poren), keine Spuren von Öl, Fett etc, kein Wasser, kein Staub, keine losen Teile, keine Holz- und Plastikteile	Korrektur	---		497
Kanten und Kehlen	Visuell, Metermass	Vor der weiteren Arbeitsetappe	jede Etappe	UN	UN	öBL	Dichtungsschicht muss hohlraumfrei aufliegen	Korrektur	---		498
Schutzvlies, Verlegen	Visuell	Vor der weiteren Arbeitsetappe	jede Etappe	UN	UN	öBL	Überlappungen, Position gem. Plan und Herstellerangaben	Korrektur	---		499

Prüfgegenstand / Zu prüfende Eigenschaft / Zu überwachendes Bauteil	Art der Prüfung	Prüfungszeitpunkt	Häufigkeit / Anzahl	Veranlassung	Durchführung	Interpretation	Qualitätsanforderung	Massnahmen bei ungenügendem Resultat	Vergütung NPK	Art der Protokollierung	Original-Zeile
C.11 · Abdichtung: Verlegung KDB am Bauwerk											
Nur KDB-Untertagbau SIA 271. Ausgeschlossen: R522–R530 (PBD).											
Dichtungsbahnen									Buch 1, NPK 112.584		521
KDB-Abdichtungen (Untertagbau SIA 271)											531
KDB-Abdichtungen											532
Applikationsbedingungen	Temperaturmessungen, Visuell	vor Arbeitsbeginn	jede Etappe	UN	UN	UN	Luft-, Baustoff- und Untergrundtemp. > 0°C, kein Niederschlag	Arbeitsunterbruch, Zuwarten	Buch 1, NPK 112.581.301	Abnahmeprotokoll 2+3 Abdichtung	533
Abdichtungsfolie, Überlappung	Visuell, Handmessung	Vor der weiteren Arbeitsetappe	jede Etappe	UN	UN	öBL	gem. Herstellerangaben	Korrektur	---		534
Abdichtungsfolie, Stösse	Visuell						durchgehend verklebt / geschweisst (Doppelnaht), keine grossen Poren, Lager der Stösse optimal, keine Kreuzstösse	Korrektur	---		535
Abdichtungsfolie, Anzahl Lagen	Visuell						gem. Plan, keine Fehlstellen	Korrektur	---		536
für vollflächig verklebte KDB: Schälzugfestigkeit	Schälzugprüfungen nach SIA 218/2 Verfahren B	Vor der weiteren Arbeitsetappe	1 Dreierserie pro 1000 m2	UN	UN	öBL	≥ 1.5 N/mm2 bei 5°C ≥ 0.8 N/mm2 bei 30°C	in Absprache BL	Buch 1, NPK 112.584.300		537
Schweisssnähte ohne Überlappnaht	Mit Reissnadel geprüfte Schweisssnähte	nach Applikation	jede Schweisssnaht	UN	UN	öBL	keine Unregelmässigkeiten und Fehlstellen	Korrektur	Buch 1, NPK 112.584.510		538
Schweisssnähte mit Überlappnaht	Mit Druckluft oder Druckflüssigkeit geprüfte Schweisssnähte	nach Applikation	jede Schweisssnaht	UN	UN	öBL	Prüfdruck 2 bar Druckabfall ≤ 10% innert 10 Min	Korrektur, Vakuumprüfung	Buch 1, NPK 112.584.520		539
Einzelstellen	Mit Vakuumhaube geprüfte Einzelstellen	bei Verdacht auf Fehlstelle	jede Verdachtsstelle	UN	UN	UN	keine Blasen	Korrektur	Buch 1, NPK 112.584.530		540
geklebte Dichtungsbänder	Haftzugfestigkeit SIA 281/3 am Untergrund und Dichtungsband	nach Applikation	Stichprobe	UN	UN	UN	≥ 1.5 N/mm2 bei 5°C ≥ 0.9 N/mm2 bei 30°C	Korrektur	Buch 1, NPK 112.584.100	541	
C.12 · Abdichtung: Drainageschichten und Schutzschichten am Bauwerk											
Drainageschichten und Schutzschichten			jede Schweisssnaht						Buch 1, NPK 112.586		553
Schutzvlies, Verlegen	Visuell	Vor Verlegen	jede Etappe	UN	UN	öBL	Überlappungen, Position gem. Plan und Herstellerangaben	Korrektur	---	Abnahmeprotokoll 2+3 Abdichtung	554
Drainagematten, Position	Position		jede Etappe			öBL	Überlappungen, Position gem. Plan und Herstellerangaben	Korrektur	---		555
Drainagematten, Sauberkeit	Sauberkeit		jede Etappe			UN	gem. Anforderungen	Korrektur			556
Schutzfolie, Chargenkontrolle	Visuell, Lieferschein		Jede Lieferung			öBL	gem. Anforderungen	Rückweisung	---		557
Schutzfolie, verlegen	Visuell		jede Etappe			öBL	Überlappungen, Position gem. Plan und Herstellerangaben	Korrektur	---		558

Prüfgegenstand / Zu prüfende Eigenschaft / Zu überwachendes Bauteil	Art der Prüfung	Prüfungszeitpunkt	Häufigkeit / Anzahl	Veranlassung	Durchführung	Interpretation	Qualitätsanforderung	Massnahmen bei ungenügendem Resultat	Vergütung NPK	Art der Protokollierung	Original-Zeile
D — ÜBERGREIFEND (Monitoring · Umwelt · Arbeitssicherheit)											
D.1 · Geodätische Messungen und Verformungsüberwachung (QV-relevant)											
Aus Zustandserfassung (R584) und Messungen (R717–R719) die QV-relevanten Zeilen (MUL/MUF/SPV-Ausbruchsicherung Spritzbeton). Ausgeschlossen: R585–R590 (Portal/Tübbing/1TG), R720 (Gelände Portalstrecke Nord), R721–R722 (Tübbing TBM), R723–R724 (LBA/LHO-spezifische Ankerkräfte und Schnittkräfte), R725 (SZN Porenwasserdruck).											
MUL/MUF/SPV: Spritzbetonsicherung; Profiligenauigkeit	Vollflächige Profilvermessung Laserscan	nach Ausbruchsicherung	1x, ganze Abwicklung und Länge Haupttunnel (exk. TBM)	öBL	UN	öBL	gem. Plan, Soll-Ist Vergleich, kein Unterprofil, innerhalb Toleranzvorgaben	Korrektur	Buch 1, NPK 112.823.003	UN protokoll	584
Messungen									NPK276.300		717
Alle Vortriebe: Verformungen	Visuell	während Vortrieb	laufend	UN	UN	öBL / PV	gem. Überwachungskonzept	gem. Überwachungskonzept	---	visuell	718
MUL/MUF/SPV Ausbruchsicherung Spritzbeton: Verformung	geodätische 3D-Verformungsmessung	während Vortrieb	gem. Überwachungskonzept	UN	UN	öBL / PV	gem. Überwachungskonzept	gem. Überwachungskonzept	Buch 3, 5, 6, 7, 8, NPK 276.312ff		719
D.2 · Wasserkontrollen — Bergwasser und Nutzwasser (NPK 112.810)											
Chemische und quantitative Überwachung des Bergwassers (Aggressivität Beton → Expositionsklasse XA für C.6 Durabilität, R606) und Freigabe des Zugabewassers für die Betonproduktion (R607).											
Prüfungen an flüssigen Stoffen									NPK112.920		601
Bergwasser: Zutrittsort	Visuell, Messung (TM & Uhrzeit)	Bei erstmaligem Auftreten	1x monatlich	UN	UN	öBL GeoBL	gem. Geologischer Prognose	Bei Unsicherheit Beizug PV	---		602
Bergwasser: Zutrittsort	Ortsbrustkartierung	während Vortrieb	1x	öBL	GeoBL	GeoBL	gem. Geologischer Prognose	Bei Unsicherheit Beizug PV	---		603
Bergwasser: Schüttmenge	Visuell, geschätzt (Tropf, Quelle l/min)	Initial	1x monatlich	UN	UN	öBL GeoBL	gem. Geologischer Prognose	Bei Unsicherheit Beizug PV	---		604
Bergwasser: Schüttmenge	Permanenter Bergwassermenge	während Vortrieb	alle 100 m, monatlich	öBL	GeoBL	GeoBL	gem. Geologischer Prognose	Bei Unsicherheit Beizug PV	---		605
Bergwasser: Betonaggressivität	Sammelprüfung nach DIN 4030 (Temperatur und elektr. Leitfähigkeit, Carbonathärte, Sulfat, etc.)	Während Vortrieb	alle 100 m	öBL	UN	öBL GeoBL	gem. geologische Prognose	Bei Unsicherheit Beizug PV	Buch 1, NPK 112.921.101		606
Nutzwasser: Chemismus Zugabewasser Beton	Sammelprüfung nach Norm SN EN 1008 (SIA 162.157)	Vor Betonproduktion	1x mtl	UN	UN	öBL	gem. SN EN 1008	Korrektur	Buch 1, NPK 112.922.111		607
D.3 · Baulüftung, Klima und Gase im Untertagbau (NPK 112.820)											
Atemluftüberwachung während Vortrieb und Ausbauarbeiten: Luftmenge, Klima, NOx/CO2, geogene Gase (inkl. Radon). Qualitätsanforderungen nach SUVA-Vorgaben. Ergänzt R741–R743 in D.5.											
Prüfungen an gasförmigen Stoffen									NPK112.930		662
Baulüftung	Luftmenge und -geschwindigkeit	während Vortrieb	Laufend	UN	UN	öBL	gem. Norm, Vorschriften SUVA	Anpassung	---		663
Untertagebaustellen: Klimatische Verhältnisse	Daueraufzeichnung Lufttemperatur und Luftfeuchtigkeit	während Vortriebs- und Ausbauarbeiten	Messstelle alle 500 m; permanent	UN	UN	öBL	gem. BB, gem. Applikationsanforderungen, gem. SUVA	Meldung BL	Buch 1, NPK 112.941.001		664
Untertagebaustellen: NOx - CO2-Gehalt	Daueraufzeichnung NOx - CO2	während Vortriebs- und Ausbauarbeiten	Messstelle alle 500 m; permanent	UN	UN	öBL	gem. BB, gem. SUVA	Meldung BL	Buch 1, NPK 112.941.002		665
Untertagebaustellen: geogene Gase	Permanente Überwachung entsprechend den Gaswarnstufen	während Vortrieb	permanent	UN	UN	öBL	gem. SUVA Warnstufen	Meldung BL	Buch 1, NPK 112.941.003		666

Prüfgegenstand / Zu prüfende Eigenschaft / Zu überwachendes Bauteil	Art der Prüfung	Prüfungszeitpunkt	Häufigkeit / Anzahl	Veranlassung	Durchführung	Interpretation	Qualitätsanforderung	Massnahmen bei ungenügendem Resultat	Vergütung NPK	Art der Protokollierung	Original-Zeile
D.4 · Ausbruchmaterial-Triage, Abbrüche und Durchbrüche											
Ausbruchmaterial-Triage Deponie/Verwertung (R657–R661) für den SPV-Ausbruch der QV. Allgemeine Abbruch- und Entsorgungskontrollen (R677–R678, R680–R681). Bohren und Trennen von Beton (NPK 132, R682–R686) gilt insbesondere für Durchbrüche QV ↔ Haupttröhre. Ausgeschlossen: R648–R656 (Aushubmaterial Portalbereich, Ausbauasphalt, Beton-/Mischabbruch Fahrbahn), R679 (Abbruch Tübbing).											
Ausbruchmaterial: Triage Deponie/Verwertung											657
Ausbruchmaterial: Triage	Trennung Rückprall, Visuell (antropogene Abfälle, Spritzbeton, Stahlfasern, Kunstharz, Stahl)	während Vortrieb	laufend	UN	UN	öBL	Saubere Trennung Rückprall	Korrektur Zuweisung	---		658
Ausbruchmaterial: Triage	Visuell: Nitrit Eluat während SPV	während Vortrieb	nach jedem Abschlag	UN	UN	UBB	Entsprechend Deponiekonzept, Kein Zweifel	Materialbehandlung, Anordnung Laboruntersuchung, Korrektur Zuweisung	---		659
Ausbruchmaterial: Triage	Visuelle Begutachtung Petrographie an der Ortsbrust	während Vortrieb	mindestens 1x täglich	öBL	GeoBL	GeoBL	gem. AQV (Beilage 04.08 (Kap. 1.2.3), gem. Geolog. Bericht (Beilage 7.2.1, Kap. 5.10), gem. Schnittstelle zu Los 111 (Beilage 04.13).	Bei nicht eindeutiger Zuweisung temporär als Klasse B und An-ordnung von Laboruntersuchungen	---		660
Ausbruchmaterial: Triage	Laborprüfung Ausbruchmaterial (Sammelprüfungen auf Bestandteile VVEA mit Säureaufschluss)	während Vortrieb	alle 14d oder 50'000to oder bei Zweifel	UN	UN	öBL UBB	gem. Anforderungen VVEA	Korrektur Zuweisung	Buch 1, NPK 112.934.202/203		661
Abbrüche und Demontagen (NPK 117)									NPK 117		677
Abbruchvorgang bestehende oder erstellte Bauwerke und Bauteile übertag und untertag (inkl. Provisorien)	Prüfung Abbruch- und Entsorgungskonzept / Freigabe Abbruch durch BL	2 Monate vor Abbruch	einmalig	UN	UN	öBL	gem. Abbruch- und Entsorgungskonzept UN (Keine Beschädigung durch Abbrucharbeiten. Gesetzeskonforme Entsorgung, Einhaltung Arbeitssicherheit & Gesundheitsschutz, Lärmvorschriften)	Überarbeitung Abbruchkonzept durch UN	---		678
Schäden an benachbarten bestehenden Gebäude/Bauteilen	Rissaufnahmen	Vor und nach Abbruch	einmalig	öBL	SPE-BEW	SPE-BEW	Keine Beschädigungen durch Arbeiten	Korrektur	---		680
Schäden an benachbarten Bauwerksteile	viuselle Kontrolle	Vor und nach Abbruch	einmalig	UN	UN	öBL	Keine Beschädigung benachbarter Bauwerksteile	Korrektur	---		681
Bohren und Trennen von Beton (NPK 132)									NPK 132		682
Position Bohrung und Schnitte	Visuell, Handmessung	Vor Bohrung	einmalig	UN	UN	öBL	Masstoleranzen	Korrektur	---		683
Freigabe Bohrung Schnitte	Anzeichnen, Freigabe	vor Ausführung	einmalig	UN	UN	öBL	Masstoleranzen	Korrektur	---		684
Ausbau von Einzelstücken	Visuell	während Arbeiten	laufend	UN	UN	UN	gem. Plan	Korrektur	---		685
Ausführung Kantenschutz	Visuell	Nach Arbeitsende	einmalig	UN	UN	UN	Vollständigkeit, Funktionalität	Korrektur	---		686
D.5 · Arbeitssicherheit und Gesundheitsschutz (inkl. Asbest-Überwachung)											
Baustellenrundgang, Bauabschränkungen, Verkehr, Böschungen, Arbeitszeiten, Lüftung und Luftqualität Untertage. SCHWERPUNKT ASBEST: R744 Freisetzung geogener (aus dem Gestein) oder antropogener Asbestfasern — VDI-Messung bzw. gem. Sicherheits- und Gesundheitskonzept (SGK) und Notfallkonzept — während des Vortriebs in asbestgefährdenden Gesteinen. Die geologische Identifikation asbestführender Einheiten erfolgt im Vorfeld bereits über A.1 R47 (Geologie, Geologische Prognose, Petrographie Ortsbrust) und D.4 R660–R661 (Petrographie und Laborprüfung Ausbruchmaterial). Ausgeschlossen: R745 (Überdrucklüftung und Löschwasser 1TG Abbrucharbeiten im SiSto — nicht QV-relevant).											
Arbeitssicherheit und Gesundheitsschutz											726
Generell über alle Arbeiten: Arbeitssicherheit & Gesundheitsschutz	Visuell, Baustellenrundgang, Instruktion, weitere	permanent	Laufend	UN	UN	UN	gem. Gefahrenanalyse UN; gem. SiGe-konzept UN gem. EKAS-Richtlinie 6508, gem. SUVA-Vorschriften	Korrektur, Einstellen der Arbeiten bei akuter Gefahr	---		727
Generell über alle Arbeiten: Arbeitssicherheit & Gesundheitsschutz	Visuell Prüfung bei Baustellenrundgang	permanent	Stichproben	öBL	öBL	öBL	Allgemeine Anforderungen Baustellensicherheit	Korrektur, Einstellen der Arbeiten bei akuter Gefahr	---		728
Bauabschränkungen / Strassensignalisation	Vollständigkeit	Nach Arbeitsende	Täglich	UN	UN	öBL	Betriebs- und Sicherheitstauglichkeit Sicherheits- und Gesundheitsschutzkonzept Reduktion der Beleuchtungsdauer und -intensität auf das Minimum	Korrektur	---		729
Bauabschränkungen / Strassensignalisation	Beschädigung										730
Bauabschränkungen / Strassensignalisation	Beleuchtung, Sichtbarkeit										731
Bauabschränkungen / Strassensignalisation	Zu- und Wegfahrten										732
Bauabschränkungen / Strassensignalisation	Türen und Tore										733
Öffentliche Strassen	Sauberkeit	Nach Arbeitsende	Täglich	öBL	UN	öBL	Keine Verschmutzung	Reinigung	Buch 1, 113.261.304 / 305		734
Öffentliche Strassen	Beschädigungen						Keine Beschädigungen	Reparatur	---		735

Prüfgegenstand / Zu prüfende Eigenschaft / Zu überwachendes Bauteil	Art der Prüfung	Prüfungszeitpunkt	Häufigkeit / Anzahl	Veranlassung	Durchführung	Interpretation	Qualitätsanforderung	Massnahmen bei ungenügendem Resultat	Vergütung NPK	Art der Protokollierung	Original-Zeile
Baupisten / Installationsplätze des Unternehmers / Baustrassen nach Projekt BH	Sauberkeit	Nach Arbeitsende	Täglich	UN	UN	öBL	Keine Verschmutzung	UT: Korrektur / ÜT: Meldung BL / Baustrassen nach Projekt BH: Korrektur	UT: --- ÜT: durch Los 204 Baustrassen BH: Buch 1, NPK 113.212.120		736
Baupisten / Installationsplätze des Unternehmers / Baustrassen nach Projekt BH	Entwässerung	Vor Arbeitsbeginn	Wöchentlich und bei Regenwetter				Funktionalität	Meldung BL	---		737
Baupisten / Installationsplätze des Unternehmers / Baustrassen nach Projekt BH	Freihaltung Durchfahrt für Ereignisdienste / Nebenunternehmer	Vor Arbeitsbeginn	Laufend				gem. BB Pos. 526.300	Meldung BL	---		738
Böschungen	Visuell Deformationen	permanent	Laufend	UN	UN	öBL	keine Losen Steine keine Ausschwemmungen	Korrektur	---		739
Einhalten der vorgeschriebenen Arbeitszeiten	Visuell	permanent	Stichproben	öBL	öBL	öBL	gem. BB Pos. 625.300	Einstellen der Arbeiten ausserhalb der zulässigen Arbeitszeiten	---		740
Lüftung / Kühlung Untertage inkl. ununterbrochener Aufzeichnung und Dokumentation	Luftmenge / Geschwindigkeit	permanent	Laufend	UN	UN	öBL	gem. SUVA-Vorgaben	Korrektur	---		741
Lüftung / Kühlung Untertage inkl. ununterbrochener Aufzeichnung und Dokumentation	Einhaltung der Arbeitsplatzbedingungen nach SUVA	permanent	Laufend				gem. SUVA-Vorgaben	Korrektur	Buch 1, 112.941.001 / 001		742
Lüftung / Kühlung Untertage inkl. ununterbrochener Aufzeichnung und Dokumentation	Luftqualität / Abgase	permanent	Laufend				gem. SUVA-Vorgaben	Korrektur	Buch 1, 112.941.001 / 002		743
Freisetzung von geogenen oder antropogenen Asbestfasern	VDI Messunge bzw. gem. Sicherheits- und Gesundheitskonzept (SGK) - Notfallkonzept des UN in Abstimmung mit SUVA	während Vortrieb in asbestgefährdenden Gesteinen / während Rückbau oder Schneidvorgängen asbesthaltiger Materialien	Laufend	UN	UN	öBL	gem. SUVA-Vorgaben	gem. Aktionsplan (SGK)	Buch 1, NPK 113.921.201		744

Master of Science FHNW in Virtual Design and Construction

Anhang E

Fragenkatalog



Alice Panciera

Zugehöriger Abschnitt der Arbeit

Kapitel 5 – Datenerhebung

Quelldokument

Keine

Einleitung

Die Gespräche werden in einer oder zwei Sprachen geführt: Italienisch und/oder Deutsch. Daher wurde der **Fragenkatalog** in zwei Varianten erstellt, wobei die Fragen auf Italienisch ihre exakte Entsprechung auf Deutsch haben und dabei derselbe technisch-akademische Sprachstil und dieselbe logische Reihenfolge beibehalten wurden.

Die Fragen des Katalogs sind in **2 Module** gegliedert:

- A. **Prozessanalyse (allgemein):** Für alle Akteure.
- B. **Operatives Modul:** Für diejenigen, die im Tunnel arbeiten (Polier, Bauleiter, Bauführer).

MODULO A: Analisi del Processo e Criticità (Generale)

Target: Schichtbauleiter, Polier, Bauführer (dopo aver mostrato il diagramma BPMN).

MODUL A: Prozessanalyse und kritische Punkte (allgemein)

Target: Schichtbauleiter, Polier, Bauführer (nachdem ihnen den Ist-Prozess gezeigt wurde).

1. Identificazione dei Colli di Bottiglia / Identifikation von Herausforderung

- **IT:** Osservando il diagramma del processo attuale, in quale fase specifica riscontra le maggiori perdite di tempo o inefficienze operative?
- **DE:** Wenn Sie das Diagramm des aktuellen Prozesses betrachten: In welcher spezifischen Phase stellen Sie die grössten Zeitverluste oder operativen Ineffizienzen fest?

2. Rotture di Media e Ridondanze / Medienbrüche und Redundanzen

- **IT:** In quali passaggi i dati vengono trasferiti manualmente da un formato all'altro (es. da cartaceo a digitale) e dove avviene una doppia immissione delle stesse informazioni?
- **DE:** An welchen Stellen werden Daten manuell von einem Format in ein anderes übertragen (z. B. von Papier zu Digital) und wo erfolgt eine doppelte Erfassung derselben Informationen?

3. Qualità dei Dati e Cicli di Errore / Datenqualität und Fehlerzyklen

- **IT:** Quanto frequentemente si verificano interruzioni o cicli iterativi (loop di correzione) causati da dati mancanti, incompleti o non conformi?
- **DE:** Wie häufig kommt es zu Unterbrechungen oder iterativen Zyklus (Korrekturschleifen), die durch fehlende, unvollständige oder nicht konforme Daten verursacht werden?

4. Gestione delle Varianti in Corso d'Opera / Umgang mit Änderungen

- **IT:** Come viene gestito attualmente il flusso informativo quando le condizioni geologiche reali differiscono da quelle previste (adeguamento del *Festlegeblatt*)?
- **DE:** Wie wird der Informationsfluss aktuell gehandhabt, wenn die realen geologischen Bedingungen von den prognostizierten abweichen (Anpassung des Festlegeblatts)?

MODULO B: Focus Operativo e Cantiere

Target: Schichtbauleiter, Polier, Bauführer (User)

MODUL B: Operativer Fokus und Baustelle

Zielgruppe: Schichtbauleiter, Polier, Bauführer (Anwender)

1. Usabilità in Ambiente Sotterraneo / Nutzbarkeit im Untertagebau

- **IT:** Quali sono i principali ostacoli pratici (es. connettività offline, condizioni ambientali, ...) che limitano l'uso di dispositivi digitali direttamente al fronte di scavo?
- **DE:** Was sind die grössten praktischen Hindernisse (z. B. Offline-Konnektivität, Umweltbedingungen, ...), die den Einsatz digitaler Geräte direkt an der Ortsbrust einschränken?

2. Validazione sul Campo / Feldvalidierung

- **IT:** Considera più efficiente una validazione del *Prüfplan* basata su checklist digitali collegate al modello 3D, rispetto alla procedura cartacea attuale? Quali rischi percepisce?
- **DE:** Erachten Sie eine Validierung des Prüfplans auf Basis digitaler Checklisten, die mit dem 3D-Modell verknüpft sind, als effizienter im Vergleich zum aktuellen papierbasierten Verfahren? Welche Risiken sehen Sie?

3. Tempistiche di Reazione / Reaktionszeiten

- **IT:** Quanto tempo intercorre mediamente tra il rilevamento dei dati in cantiere e la loro disponibilità ufficiale per l'ufficio tecnico (es. per l'elaborazione dell'Ausmass)?
- **DE:** Wie viel Zeit vergeht durchschnittlich zwischen der Datenerfassung auf der Baustelle und deren offizieller Verfügbarkeit für das technische Büro (z. B. für die Ausmass-Erstellung)?

4. Incidenza del Fattore Umano / Einfluss des menschlichen Faktors

- **IT:** Secondo la sua esperienza sul campo, in che misura ritiene che il "fattore umano" (es. errori di trascrizione manuale, stanchezza, interpretazione soggettiva dei criteri di controllo) incida attualmente sulla qualità dei dati e sui rallentamenti del processo?
- **DE:** Basierend auf Ihrer praktischen Erfahrung: Inwieweit schätzen Sie den Einfluss des "menschlichen Faktors" (z. B. manuelle Übertragungsfehler, Ermüdung, subjektive Auslegung von Prüfkriterien) auf die aktuelle Datenqualität und auf Prozessverzögerungen ein?

5. Dinamiche Relazionali e Collaborazione / Beziehungsdynamiken und Zusammenarbeit

- **IT:** In che misura le dinamiche interpersonali e il livello di fiducia reciproca tra i diversi ruoli operativi e direttivi (ad esempio, tra Polier e Bauführer, o tra Bauführer e Bauleiter) incidono attualmente sulla fluidità dei processi di approvazione e sulla trasparenza dello scambio informativo?
- **DE:** Inwieweit wirken sich die interpersonellen Dynamiken und das gegenseitige Vertrauen zwischen den verschiedenen operativen und leitenden Rollen (z. B. zwischen Polier und Bauführer oder zwischen Bauführer und Bauleiter) aktuell auf die Reibungslosigkeit der Freigabeprozesse und die Transparenz des Informationsaustauschs aus?

MODULO C: Focus Strategico e Contrattuale

Target: Committente (Bauherr), Chef Bauleiter, Chef Impresa

MODUL C: Strategischer und vertraglicher Fokus

Zielgruppe: Bauherr, Chefbauleiter, Chefunternehmer

1. Validità Legale del Dato Digitale / Rechtssicherheit digitaler Daten

- **IT:** Sotto il profilo contrattuale, sussiste la disponibilità ad accettare una validazione digitale come sostituto formale della firma su protocolli cartacei per la convalida dei requisiti qualitativi?
- **DE:** Besteht aus vertraglicher Sicht die Bereitschaft, eine digitale Validierung als formalen Ersatz für die Unterschrift auf Papierdokumenten zur Bestätigung der Qualitätsanforderungen zu akzeptieren?

2. Obiettivi del Progetto Pilota / Ziele des Pilotprojekts

- **IT:** Qual è il KPI prioritario per considerare questo progetto pilota un successo: la riduzione dei tempi di processo (efficienza) o l'aumento della tracciabilità e trasparenza dei dati (qualità)?
- **DE:** Was ist der primäre KPI, um dieses Pilotprojekt als Erfolg zu werten: die Reduzierung der Prozesszeiten (Effizienz) oder die Erhöhung der Rückverfolgbarkeit und Datentransparenz (Qualität)?

3. Grado di Automazione Desiderato / Gewünschter Automatisierungsgrad

- **IT:** In riferimento alle varianti proposte: preferite un sistema ad alta automazione o ritenete indispensabile mantenere un controllo umano su ogni singola fase di approvazione?
- **DE:** In Bezug auf die vorgeschlagenen Varianten: Bevorzugen Sie ein hochautomatisiertes System oder halten Sie eine menschliche Kontrolle in jeder einzelnen Genehmigungsphase für unabdingbar?

MODULO D: Focus Tecnico e Implementazione

Target: Esperti Trimble Connect, Progettista (PV)

MODULO D: Technischer Schwerpunkt und Implementierung

Zielgruppe: Trimble Connect-Experten, Planer (PV)

1. Caso d'uso: controllo qualità/ Anwendungsfall: Qualitätskontrolle

- **IT:** Osservando il processo e conoscendo le potenzialità del software quale parte del processo integrerebbe in Trimble per il caso d'uso del controllo qualità ed eventualmente quantità?
- **DE:** Wenn Sie den Prozess beobachten und das Potenzial der Software kennen, welchen Teil des Prozesses würden Sie für den Anwendungsfall der Qualitäts- und gegebenenfalls Quantitätskontrolle in Trimble integrieren?

2. Pianificazione delle prove/ Planung der Prüfungen

- **IT:** Reputa fattibile anticipare tutta la pianificazione dei controlli in cantiere in fase di progettazione così da eliminare il flusso “kontrollplan-prüffplan-esecuzione di prove” e passare direttamente da “progettazione di prove-esecuzione di prove”?
- **DE:** Halten Sie es für machbar, die gesamte Planung der Kontrollen auf der Baustelle bereits in der Planungsphase vorzunehmen, um den Ablauf „Kontrollplan-Prüfplan-Durchführung der Prüfungen“ zu eliminieren und direkt von der „Planung der Prüfungen-Durchführung der Prüfungen“ auszugehen?

3. Automazione Contabile (Ausmass) / Automatisierung des Ausmasses

- **IT:** È tecnicamente fattibile estrarre le quantità (volumi, lunghezze) direttamente dagli oggetti BIM validati per generare report contabili automatici, eliminando la trascrizione manuale?
- **DE:** Ist es technisch machbar, Mengen (Volumen, Längen) direkt aus validierten BIM-Objekten zu extrahieren, um automatische Abrechnungsreports zu generieren und die manuelle Übertragung zu eliminieren?

4. Integrazione "No-Code" / No-Code Integration

- **IT:** In che misura è possibile personalizzare l'interfaccia utente di Trimble Connect per ridurre la complessità operativa per utenti non esperti, senza ricorrere a sviluppi software dedicati?
- **DE:** Inwieweit ist es möglich, die Benutzeroberfläche von Trimble Connect anzupassen, um die operative Komplexität für nicht fachkundige Benutzer zu reduzieren, ohne auf dedizierte Softwareentwicklungen zurückzugreifen?

5. Sincronizzazione Dati e Offline / Datensynchronisation und Offline-Modus

- **IT:** Come viene garantita l'integrità dei dati (es. checklist qualità) in caso di conflitti di sincronizzazione dovuti al lavoro offline in galleria?
- **DE:** Wie wird die Datenintegrität (z. B. Qualitäts-Checklisten) im Falle von Synchronisationskonflikten aufgrund der Offline-Arbeit im Stollen gewährleistet?

Master of Science FHNW in Virtual Design and Construction

Anhang F

Systemarchitektur der Varianten



Alice Panciera

Zugehöriger Abschnitt der Arbeit

Kapitel 6.1 – 6.1 Variantenbildung

Quelldokument

Keine

SOLLWERTE — Kontrollplan / Anhang D
Akzeptanzschwellen je Bauteil (Anker, Bewehrung, Spritzbeton, Dichtungen, Beton)
Lage: separates PDF-Dokument neben dem Modell

```
graph LR; A[Ebene 1  
Erfassung im Tunnel] --> B[Polier / Bauführer (UN)  
Erfasst Istwerte auf Papier oder als PDF-Formular am Tablet,  
scannt das Protokoll und lädt es ins CDE  
→ MEDIENBRUCH 1 (Feld → PDF)];
```

The diagram illustrates the data flow from the tunnel recording level to the operator. On the left, a yellow box labeled 'Ebene 1 Erfassung im Tunnel' (Level 1 Recording in Tunnel) is connected by a blue arrow to a larger pink box on the right. The pink box contains the text: 'Polier / Bauführer (UN)' (Operator / Construction Manager (UN)), 'Erfasst Istwerte auf Papier oder als PDF-Formular am Tablet, scannt das Protokoll und lädt es ins CDE' (Records actual values on paper or as a PDF form on a tablet, scans the protocol and uploads it to the CDE), and '→ MEDIENBRUCH 1 (Feld → PDF)' (→ MEDIA BREAK 1 (Field → PDF)).

```
graph LR; A[Ebene 2 Datenhaltung am Modell] --> B[Modell-Container Trimble Connect (CDE) Ordnerstruktur 52_BA / L241 / QV]; B --> C[Werteablage PDF-Protokolle (Istwerte) Sollwerte NICHT am Bauteil]; C --> D[3D-Modell als Index Hyperlink Bauteil -> PDF keine Aussen-Schnittstelle aktiv];
```

Ebene 2
Datenhaltung am Modell

Modell-Container
Trimble Connect (CDE)
Ordnerstruktur 52_BA / L241 / QV

Werteablage
PDF-Protokolle (Istwerte)
Sollwerte NICHT am Bauteil

3D-Modell als Index
Hyperlink Bauteil → PDF
keine Aussen-Schnittstelle aktiv

Ebene 3
Validierung Soll/Ist
ISO 19650-2

Bauleitung (BL) — manuelle Validierung
Öffnet PDF vom Modellobjekt, vergleicht Istwerte (im PDF) mit Sollwerten (im KP-PDF nebenan),
setzt Status manuell als Kommentar oder Metadatenfeld am Dokument

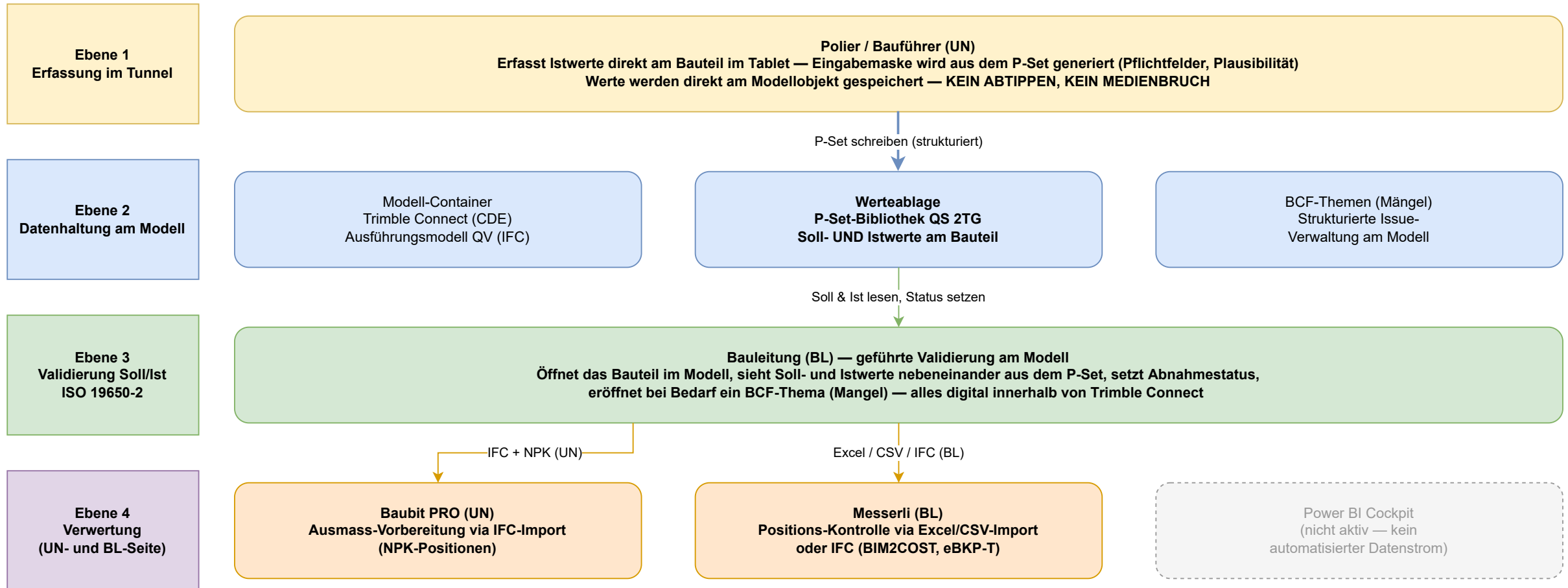
[illegible]

Lesart: Vier Ebenen — von oben (Sollwerte) nach unten (Verwertung). Pfeile zeigen den Datenweg. Rote Bausteine = Medienbrüche (manuelle Übertragung). Grau-gestrichelte Bausteine = Funktionen, die in dieser Variante nicht aktiv sind. Software-Rollen: Baubit PRO auf UN-Seite, Messerli auf BL-Seite.

Variante 2 — Datenarchitektur für die Qualitätskontrolle (gewählte Zielvariante)

P-Set am Bauteil · Soll und Ist nebeneinander · Validierung am Modell · in Anlehnung an SN EN ISO 19650-1 und -2

SOLLWERTE — Kontrollplan / Anhang D
Akzeptanzschwellen je Bauteil (Anker, Bewehrung, Spritzbeton, Dichtungen, Beton)
Lage: in den P-Set am Bauteil eingebettet (gleicher Ort wie die Istwerte)



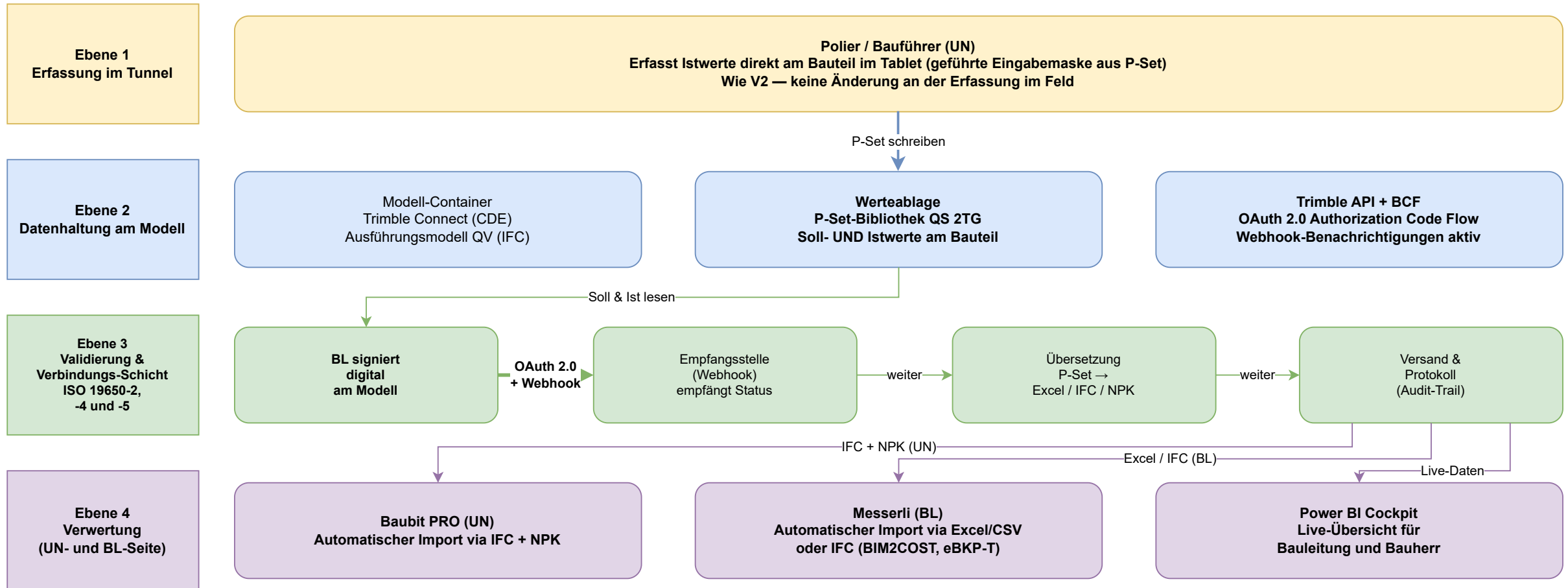
BILANZ V2 — Medienbrüche: 1 pro Empfänger (kontrolliert) · Latenz Feld→Abrechnung: Tage · Aufwand: mittel · Risiko: gering (geführte Eingabe, P-Set-Pflichtfelder)
EIGNUNG: gewählte Zielvariante — bestes Verhältnis von digitalem Mehrwert zu Umsetzbarkeit; nutzt "No-Code"-Funktionen von Trimble Connect (siehe Abb. 19); erfüllt von SN EN ISO 19650-2

Lesart: Identische 4-Ebenen-Struktur wie V1 und V3 — direkt vergleichbar. Oranger Baustein = ein einziger Medienbruch je Empfänger (kontrollierter Export). Grau-gestrichelter Baustein = Funktion in dieser Variante nicht aktiv. Software-Rollen: Baubit PRO auf UN-Seite, Messerli auf BL-Seite.

Variante 3 — Datenarchitektur für die Qualitätskontrolle (API-basierter Zukunftsausblick)

P-Set + Trimble API · automatische Weiterleitung an Baubit (UN) und Messerli (BL) · in Anlehnung an SN EN ISO 19650-1, -2, -4 und -5

SOLLWERTE — Kontrollplan / Anhang D
Akzeptanzschwellen je Bauteil (Anker, Bewehrung, Spritzbeton, Dichtungen, Beton)
Lage: in den P-Set am Bauteil eingebettet (gleicher Ort wie die Istwerte) — wie V2



BILANZ V3 — Medienbrüche: 0 · Latenz Feld→Abrechnung: Sekunden · Aufwand: hoch · Risiko: mittel (Wartungspflicht der Schnittstelle, Vertragsanpassung)
EIGNUNG: nicht für Pilot in dieser Arbeit, aber natürlicher nächster Schritt nach erfolgreicher V2; in Anlehnung an SN EN ISO 19650-1, -2, -4 (Information Exchange) und -5 (Security via OAuth 2.0)

Lesart: Identische 4-Ebenen-Struktur wie V1 und V2 — direkt vergleichbar. Ebene 3 hat zusätzlich drei Bausteine, die die Verbindungs-Schicht zeigen. Software-Rollen: Baubit PRO auf UN-Seite (offiziell auf Trimble-Integrationsliste), Messerli auf BL-Seite (via IFC und Excel/CSV).

Master of Science FHNW in Virtual Design and Construction

Anhang G

Soll Prozesse



Alice Panciera

Zugehöriger Abschnitt der Arbeit

Kapitel 8.1 - Konsolidierter Soll-Prozess für
die digitale Qualitätskontrolle

Quelldokument

Keine

Anhang G: Soll Prozesse

Legende:

- PV: Projektverfasser

BL: Bauleitung

UN: Bauunternehmen

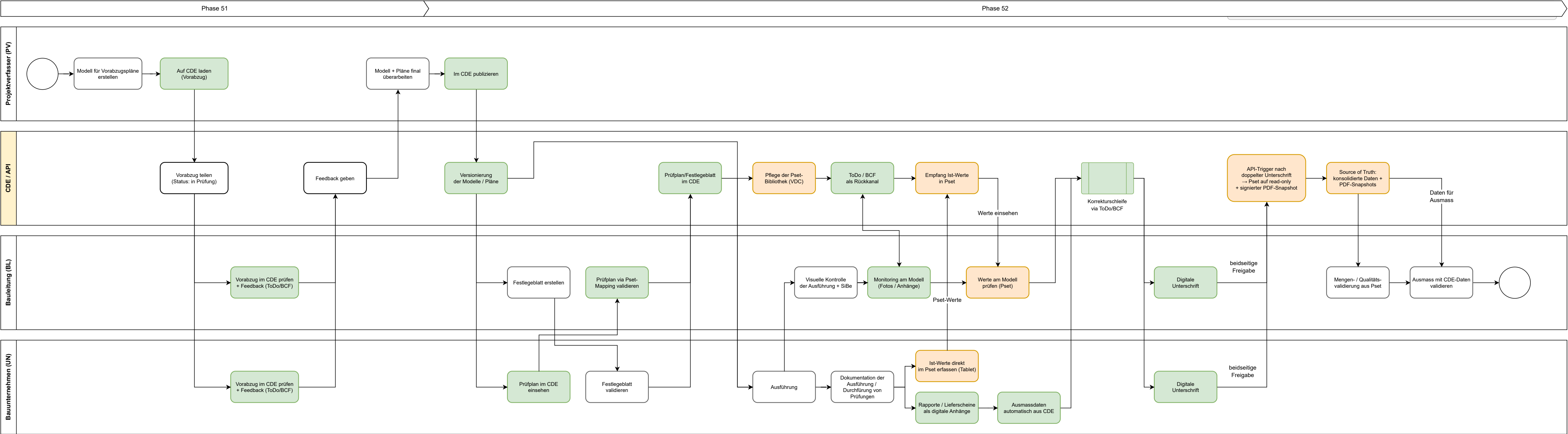
SiBe: Sicherheitsbeauftragte

TR: Tagesrapport

LS: Lieferschein
- bestehende Aktivität (aus Ist-Prozess übernommen)

neu / Soll-spezifisch (gegenüber Ist-Prozess)

CDE / API – Plattform-getriebene Aktivitäten



Master of Science FHNW in Virtual Design and Construction

Anhang H

Angaben zu den verwendeten Tools



Alice Panciera

Zugehöriger Abschnitt der Arbeit

Keine

Quelldokument

Keine

Angaben zu den verwendeten Tools

Im Rahmen der Erarbeitung dieser Master-Thesis wurden verschiedene digitale Hilfsmittel eingesetzt. Diese dienten insbesondere der sprachlichen Überarbeitung, der Strukturierung von Inhalten, der Visualisierung von Prozessen sowie der effizienten Aufbereitung von Arbeitsständen. Die fachliche Verantwortung für Inhalte, Interpretation, Methodik und Schlussfolgerungen liegt vollständig bei der Verfasserin.

Tool / Hilfsmittel	Verwendungszweck
DeepL	Übersetzung italienischer Ausgangstexte ins Deutsche
ChatGPT	Sprachliche Überarbeitung, Strukturierung, Formulierungsvorschläge und Verbesserung der Lesbarkeit
Microsoft Word Editor	Erstellung, Bearbeitung und Formatierung der schriftlichen Arbeit
Microsoft Excel	Aufbereitung von Tabellen, Kriterien und Variantenvergleichen
Draw.io	Erstellung von Prozess-, Workflow- und Datenflussdiagrammen
Trimble Connect	Modellbasierte Erprobung des digitalen Qualitätssicherungsworkflows

Erklärung zum KI-Einsatz

KI-gestützte Werkzeuge wurden ausschliesslich als Hilfsmittel zur sprachlichen und strukturellen Unterstützung verwendet. Dazu gehörten insbesondere Übersetzungen, Formulierungsvorschläge, sprachliche Glättungen sowie die Unterstützung bei der Strukturierung einzelner Kapitel. Die fachliche Prüfung, Auswahl, Anpassung und Verantwortung sämtlicher Inhalte erfolgten durch die Verfasserin.

Da die Arbeit in einer Fremdsprache verfasst wurde, erfolgte der Arbeitsprozess mehrstufig: Die Inhalte wurden zunächst auf Italienisch erarbeitet, anschliessend mit DeepL ins Deutsche übersetzt, mit ChatGPT sprachlich überarbeitet und zusätzlich von deutschsprachigen Personen gegengelesen. Ziel dieses Vorgehens war es, die Verständlichkeit, sprachliche Qualität und formale Konsistenz der deutschen Fassung sicherzustellen.