

Die Macht der Entscheidung

Multikriterielle Bauablaufplanung mit Entscheidungsnetzwerken



(Olemedia & iStock, 2020)

MAS FHNW Digitales Bauen

Masterthesis

Autor: Thien-Phuoc Vo

Betreuung: Evelyne Jost

Expertin / Experte: Jörg Amport

Ort, Datum: Bern, 3. November 2025

Die Macht der Entscheidung

Multikriterielle Bauablaufplanung mit Entscheidungsnetzwerken

Autor

Thien-Phuoc Vo

tp.vo@outlook.com

Betreuung

Evelyne, Jost

Fachhochschule Nordwestschweiz

evelyne.jost@fhnw.ch

Expertin / Experte

Jörg, Amport

Marti Holding AG

Joerg.Amport@martiag.ch

Bern, November 2025

Ehrenwörtliche Erklärung

“Ich erkläre hiermit, dass ich die vorliegende Master-Thesis mit dem Titel
"Die Macht der Entscheidung" 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. Quillbot]) oder Programmierapplikationen [z.B. Github Copilot] für inhaltlich verwendete Beiträge deklariert habe,

dass ich die Hilfsmittel Copilot und Quillbot ausschliesslich zur Unterstützung bei grammatikalischen Korrekturen und sprachlichen Umformulierungen eingesetzt habe, sofern keine explizite Deklaration erfolgt ist, handelt es sich um rein sprachlich unterstützte Passagen ohne inhaltliche Generierung durch diese Hilfsmittel,

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 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 Studierendendenpflichten 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.“

Thien-Phuoc Vo

Bern, 03. November 2025

Summary

Diese Masterarbeit beschäftigt sich mit der Entwicklung eines Programms zur multikriteriellen Bauablaufplanung auf Basis von Entscheidungsnetzwerken, das insbesondere in der Ausschreibungsphase eingesetzt werden soll. Ziel ist es, Bauabläufe automatisiert und realitätsnah aus digitalen Modellen abzuleiten und dabei technische sowie ressourcenbezogene Rahmenbedingungen zu berücksichtigen.

Obwohl digitale Modelle im Bauwesen weit verbreitet sind, werden Bauablaufpläne häufig noch manuell und erfahrungsbasiert erstellt. Dies führt zu ineffizienten Prozessen und mangelnder Transparenz. Das Potenzial einer automatisierten, modellbasierten Planung bleibt bislang weitgehend ungenutzt. Die Arbeit adressiert zentrale Herausforderungen wie fehlende Standardisierung in der Ausschreibungsphase, die Verfügbarkeit belastbarer Leistungswerte sowie die Vielzahl an Einflussfaktoren, die einen Bauablauf bestimmen. Hinzu kommt die Schwierigkeit, menschliche Intuition in algorithmische Logik zu überführen.

Die Komplexität dieser Einflussgrößen macht die Lösung zu einer multikriteriellen Optimierungsaufgabe. Das entwickelte Programm verfolgt das Ziel, mit minimalen Modellinformationen Varianten des Bauablaufs zu generieren, die Planerinnen und Planer in der Ausschreibungsphase unterstützen. Dabei stehen Nachvollziehbarkeit, Transparenz und Robustheit auch bei unvollständigen Daten im Vordergrund. Grundlage bildet eine Mikrobetrachtung der Bauzeiten unter Einbezug praxisnaher Leistungswerte, Ressourcenkapazitäten und räumlicher Einschränkungen.

Die Entscheidungslogik wird durch ein Entscheidungsnetzwerk abgebildet, in dem Bedingungen und Prioritätswerte die Reihenfolge der Ausführung steuern. Als Ergebnis stellt das Programm eine interaktive Benutzeroberfläche bereit, die zwei Visualisierungen umfasst: ein Paretofront-Diagramm zur Bewertung und Auswahl der Varianten sowie ein Gantt-Diagramm zur detaillierten Darstellung des Bauablaufs. Ergänzt wird diese Ansicht durch Ressourceninformationen über den gesamten Projektzeitraum mit der Auslastung von Personal, Schalung und Material.

Die Validierung erfolgte anhand eines realen Wohnbauprojekts. Die berechneten Bauzeiten stimmen mit dem tatsächlichen Terminplan weitgehend überein, wobei die durchschnittliche Abweichung rund acht Prozent beträgt. Die Ergebnisse zeigen, dass automatisierte, modellbasierte Bauablaufplanung möglich ist und praxisnahe Resultate liefert.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	9
1.1	Motivation	9
1.2	Herausforderung.....	10
1.3	Zielsetzung	11
2	Forschungsstand	12
2.1	Konventionelle Arbeitsmethode.....	12
2.1.1	Die Ausschreibung	12
2.1.2	Erfahrungswerte	13
2.1.2.1	Vergleich der Erfahrungswerte	14
2.2	Bestehende Softwarelösungen und Literatur	18
2.2.1	Bestehende Softwarelösungen	18
2.2.2	Bestehende Literatur	20
2.2.2.1	Konzept der bestehenden Softwarelösung	21
2.2.2.1.1	Vorgängerbeziehungen	22
2.2.2.1.2	Räumliche Einschränkung	22
2.2.2.1.3	Ressourcenverfügbarkeit.....	23
2.2.2.1.4	Generierung von Bauabläufen.....	24
2.2.2.2	Analyse bestehender Methoden und Softwarelösungen	24
2.2.2.2.1	Vorgängerbeziehungen	24
2.2.2.2.2	Räumliche Einschränkung	28
2.2.2.2.3	Variantengenerierung.....	31
3	Methodik	33
3.1	Vorgehen	33
3.1.1	Übersicht	33
3.1.2	Softwareentwurf und technische Rahmenbedingungen	34
3.1.3	Informationsbeschaffung.....	34
3.1.4	Implementierung – Methodischer Ansatz	35
3.2	Abgrenzungen.....	37
3.2.1	Einflussgrößen auf die Bauzeit.....	37
3.2.2	Thematische Schwerpunkte.....	39

4	Programmaufbau	41
4.1	Programmübersicht.....	41
4.2	Entwicklungsarchitektur	42
4.2.1	CAD-Software	42
4.2.2	Schnittstelle	42
4.2.3	Programmiersprache	42
4.3	Datenerfassung.....	43
4.3.1	Modellbasierte Daten	43
4.3.1.1	Datenprozessierung aus den modellbasierten Daten	44
4.3.1.1.1	<i>Schalungsfläche</i>	<i>45</i>
4.3.1.1.2	<i>Betonvolumen.....</i>	<i>45</i>
4.3.1.1.3	<i>Bewehrungsmenge.....</i>	<i>46</i>
4.3.1.1.4	<i>Gravitative Abhängigkeit.....</i>	<i>46</i>
4.3.1.1.5	<i>Mindestarbeitsfläche.....</i>	<i>48</i>
4.3.2	Erfassung externer Datensätze	49
4.3.2.1	Mindestarbeitsplatz	50
4.3.2.2	Leistungswerte	51
4.3.2.2.1	<i>Leistungswerte SBV</i>	<i>51</i>
4.3.2.2.2	<i>Angewendete Leistungswerte</i>	<i>54</i>
4.3.2.3	Gruppengrößen.....	54
4.3.2.3.1	<i>Gruppengrößen in der Praxis.....</i>	<i>54</i>
4.3.2.3.2	<i>Optimale Gruppengrößen</i>	<i>55</i>
4.3.2.4	Ressourcenverfügbarkeit	56
4.3.2.4.1	<i>Verfügbarkeit Schalung</i>	<i>56</i>
4.3.2.4.2	<i>Verfügbarkeit Personal.....</i>	<i>56</i>
4.3.2.4.3	<i>Verfügbarkeit Beton.....</i>	<i>57</i>
4.3.2.5	Bauzeitliche Vorgaben	58
4.3.2.5.1	<i>Frühfestigkeitszeit.....</i>	<i>58</i>
4.3.2.5.2	<i>Ausschallfrist</i>	<i>59</i>
4.4	Datenprozessierung	60
4.4.1	Bauzeit Bauteil	60
4.4.1.1	Puffer	62
4.4.1.1.1	<i>Produktivitätsverluste</i>	<i>63</i>

4.5	Entscheidungsnetzwerk.....	68
4.5.1	Netzwerk	68
4.5.1.1	Kanten und Knoten.....	69
4.5.1.2	Gewichtete Knoten	70
4.5.1.3	Gewichtete Kanten	71
4.5.2	Bedingungen	71
4.5.3	Entscheidungsschwierigkeiten.....	75
4.5.4	Menschliches Entscheidungsverhalten.....	77
4.5.4.1	Problematik der Variantenanzahl	79
4.5.4.1.1	<i>Berechnung</i>	80
4.5.4.2	Optimierungen.....	86
4.5.4.2.1	<i>Zeitproblem in der Datengenerierung</i>	86
4.5.4.2.2	<i>Algorithmen für NP-schwere Probleme</i>	87
4.5.4.2.3	<i>Multikriterielle Optimierung</i>	89
4.5.5	Prioritätswerte	92
4.5.5.1	Gewichtung der Prioritätswerte	94
4.5.5.1.1	<i>Definition brauchbarer Bauablauf</i>	94
4.5.6	Entscheidungsnetzwerk	96
4.5.6.1	Knoten	96
4.5.6.2	Kanten	98
4.5.6.2.1	<i>Parameter zu den Bedingungen</i>	98
4.5.6.2.2	<i>Parameter zur Priorisierung</i>	99
4.5.6.3	Funktionsweise Entscheidungsnetzwerk	100
4.6	Output	103
4.6.1	Paretofront Diagramm.....	104
4.6.2	Variantenansicht	105
4.6.2.1	Übergreifende Informationen zur Variante.....	105
4.6.2.2	Modifiziertes Gantt-Diagramm	106
4.6.2.3	Bauteil Detailansicht.....	107
4.6.2.4	Ressourcenbedarf	108
5	Modellvoraussetzungen	109
5.1	Erforderliche Voraussetzungen	109
5.2	Optionale Voraussetzungen	110

6	Resultate.....	111
6.1	Ausführungsprojekt Schärenmoos.....	111
6.2	Vorgehen	112
6.3	Inputdaten.....	113
6.3.1	Statische Inputdaten	113
6.3.2	Variable Inputdaten.....	113
6.3.3	Abgrenzungen.....	114
6.4	Auswertung	114
6.4.1	Gesamtbetrachtung	115
6.4.1.1	Gebäude A	117
6.4.1.2	Geschossebene	117
6.4.1.3	Etappen- und Bauteilebene.....	118
6.4.2	Analyse und Diskussion der Auswertung	120
6.4.3	Analyse mit variablen Parametern.....	122
6.4.3.1	Pufferfaktor (HLKSE und Produktivitätsverlust)	122
6.4.3.1.1	<i>Zusammenhang Pufferfaktor und Bauzeit</i>	124
6.4.3.2	Unlimitierte Ressourcen	125
7	Diskussion und Ausblick.....	126
8	Fazit.....	131
	Zitate und Referenzen.....	133
	Abbildungsverzeichnis.....	137

1 Einleitung

1.1 Motivation

Die Digitalisierung hat das Bauwesen längst erreicht und dennoch scheint ein grosser Teil ihres Potenzials ungenutzt zu bleiben. Digitale Modelle sind heute weit verbreitet und liefern eine Vielzahl an Informationen, die weit über die reine Geometrie hinausgehen. Sie ermöglichen es, die vielschichtigen Zusammenhänge sichtbar zu machen und bieten die Grundlage für automatisierte Prozesse, die den Planungs- und Ausführungsalltag weiterentwickeln könnten. Doch gerade in der frühen Ausschreibungsphase, insbesondere bei der Erstellung von Bauprogrammen, dominieren weiterhin konventionelle Methoden. Terminpläne werden häufig manuell erstellt, gestützt auf Erfahrungswerte, die zwar für typische Bauprojekte brauchbar sind, aber in der Ausführungsphase in manchen Fällen zu Abweichungen führen.

Diese Abweichung wirft eine zentrale Frage auf: Warum wird das Potenzial digitaler Modelle und automatisierter Abläufe nicht konsequent genutzt? Es müsste doch längst möglich sein, mit wenigen Eingaben ein Bauprogramm zu generieren, das auf realen Modellinformationen basiert und sowohl technische als auch wirtschaftliche Bedingungen berücksichtigt. Stattdessen sind zeitintensive, fehleranfällige und wenig transparente Prozesse nach wie vor Alltag. Die Vorstellung, dass es keine Vielzahl an Softwarelösungen gibt, die diesen Schritt automatisiert leisten, erscheint widersprüchlich, gerade in einer Branche, die zunehmend auf Effizienz und Optimierungen angewiesen ist.

Was macht es so schwierig, diesen Prozess vollständig zu automatisieren und wie könnte ein Programm aussehen, das diesen Prozess automatisiert? Ein Entwicklungsansatz, der nicht nur technisch anspruchsvoll, sondern auch fachlich besonders faszinierend ist.

1.2 Herausforderung

Ein zentrales Thema bei der Automatisierung der Bauablaufplanung sind die technischen Grundlagen. Die Datenqualität ist oft unzureichend, Modellstrukturen sind uneinheitlich und die Inhalte nicht durchgängig standardisiert. Digitale Modelle entstehen durch verschiedene Projektbeteiligte, die mit unterschiedlichen Softwarelösungen, Detaillierungsgraden und Modellierungsrichtlinien arbeiten. Diese vielen Einflüsse erschweren die automatisierte Auswertung und schränken die Zusammenarbeit zwischen Systemen ein.

Gleichzeitig zeigt sich, wie komplex die Realität auf der Baustelle ist. Einflussfaktoren wie Klima, örtliche Gegebenheiten oder kurzfristige Umplanungen lassen sich dabei kaum eindeutig erfassen. Sie wirken sich auf den Bauablauf aus, lassen sich aber nur schwer standardisieren. In digitalen Modellen sind solche dynamischen Bedingungen schwer darstellbar, was die algorithmische Umsetzung erschwert. In der Ausschreibungsphase wird deshalb oft auf Erfahrungswerte zurückgegriffen, da zu diesem Zeitpunkt nur begrenzte Informationen verfügbar sind.

Das neue Programm soll in der Ausschreibungsphase unterstützend angewendet werden. Während das Programm präzise Berechnungen auf Basis strukturierter Informationen liefert, beruhen konventionelle Methoden auf Erfahrungswerten. Diese Erfahrungswerte sind oft nicht dokumentiert und hängen stark von intuitiven Entscheidungen ab. Diese Intuition basiert auf praktischer Erfahrung und situativem Verständnis, das sich nur schwer in feste Regeln oder algorithmische Logik überführen lässt.

Besonders spannend ist die Analyse und Übertragung der menschlichen, intuitiven Entscheidungslogik in ein automatisiertes Programm. Die Integration eines automatisierten Systems erfordert daher nicht nur technische Anpassungen, sondern auch ein Verständnis für die Herkunft der Erfahrungswerte. Deshalb ist eine Methode erforderlich, wie Entscheidungslogik in die programmtechnische Logik überführt werden kann.

1.3 Zielsetzung

Im Zentrum dieser Arbeit steht die Frage, wie sich die Automatisierung von Bauablaufprozessen unter realen Bedingungen umsetzen lässt. Die Entwicklung eines eigenen Programms bildet dabei den Kern der Untersuchungen. Das Programm ist im ersten Schritt für die Ausschreibungsphase konzipiert und soll auf Basis des vorhandenen Detaillierungsgrads des Modells arbeiten. Da digitale Modelle häufig nicht standardisiert sind, verfolgt die Anwendung einen stabilen Lösungsweg. Sie soll auch dann zuverlässig funktionieren, wenn nur wenige modellbasierte Eingaben vorliegen. Ziel ist es, den Aufwand für die Modellvorbereitung so gering wie möglich zu halten und dennoch aussagekräftige Ergebnisse zu liefern.

Das Programm soll automatisiert mehrere Ablaufvarianten generieren und Planer:innen sowie Projektleiter:innen in der Ausschreibungsphase bei der Bewertung von Szenarien im Hochbau, insbesondere im Rohbau, unterstützen. Dabei stehen Nachvollziehbarkeit und Transparenz im Vordergrund. Die Berechnungen und die Entscheidungslogik des Programms sollen für die Nutzer:innen jederzeit verständlich und überprüfbar sein.

Der Ablauf gestaltet sich wie folgt:

Die Fachperson erhält ein digitales Modell, das als Grundlage für die Erstellung eines Bauprogramms dient. Dieses Modell wird gemäss den minimalen Modellierungsanforderungen angepasst. Das Programm enthält bereits die notwendigen Basisdaten für die Berechnungen, welche bei Bedarf individuell angepasst werden können. Nach der Ausführung wählt die Fachperson aus den resultierenden Varianten vereinzelte Bauabläufe aus. Auf dieser Grundlage lassen sich weitere Varianten erzeugen, indem neue Eingabewerte verwendet oder alternative Rahmenbedingungen getestet werden.

2 Forschungsstand

Im Kapitel zum Forschungsstand wird die konventionelle Methode zur Erstellung von Bauprogrammen in der Ausschreibungsphase analysiert und ihre Begrenzungen aufgezeigt. Wie diese Methode durch automatisierte Ansätze verbessert werden kann, wird im Abschnitt der bestehenden Softwarelösungen und Literatur vorgestellt, die sich bereits mit dieser Problematik befassen haben.

2.1 Konventionelle Arbeitsmethode

2.1.1 Die Ausschreibung

In der Praxis der Bauausführung zeigt sich immer wieder ein Spannungsfeld zwischen den terminlichen Vorgaben des Bauherrn und den realistischen Erfahrungswerten aus vergleichbaren Projekten. Terminpläne, die während der Ausschreibung vorgegeben werden, orientieren sich häufig nicht an den tatsächlichen Abläufen der Bauproduktion, sondern an den Zielsetzungen des Auftraggebers. Diese Pläne sind oft das Ergebnis von übergeordneten, wirtschaftlichen Projektzielen, unabhängig davon, ob die dafür vorgesehenen Zeitfenster mit den Erfahrungswerten vereinbar sind.

Die Folge ist eine Verzerrung der Planungsrealität: Ausführende Unternehmen sehen sich gezwungen, ihre Kalkulationen und Ressourcenplanungen an Zeitvorgaben anzupassen, die unter realen Bedingungen kaum einhaltbar sind. Erfahrungswerte aus der Bauausführung, wie etwa zur Dauer von Schalungsarbeiten oder zur Betonerhärtingszeit, geraten dabei in den Hintergrund. Stattdessen dominieren Annahmen, die auf idealisierten Abläufen basieren und kaum Raum für unvorhergesehene Ereignisse lassen.

Gleichzeitig sind die Informationen in der Ausschreibungsphase meist unvollständig oder pauschalisiert. Wesentliche Details zur Bauausführung, mit technischen Informationen oder zu logistischen Abläufen, fehlen oder sind nur grob angegeben. Um die Unsicherheiten auszugleichen, müssen Unternehmen zusätzliche Informationen beschaffen oder selbst erstellen, wie etwa durch interne Analysen oder Rückgriffe auf Erfahrungsdaten. Dieser Aufwand verursacht Kosten, die als Informationskosten bezeichnet werden. Informationskosten entstehen dort, wo Informationen nicht frei verfügbar sind, sondern aktiv beschafft werden müssen. Für Entscheidungsträger stellt sich dabei die Frage, wie viele Informationen angemessen sind, um eine belastbare Terminplanung zu ermöglichen.

Eine übermässige Informationsbeschaffung kann zu Verlusten führen, wenn die gewonnenen Daten wenig Einfluss auf das Endergebnis haben. In diesem Kontext gewinnen Erfahrungswerte eine besondere Bedeutung. Sie bieten eine Balance zwischen realitätsnaher Einschätzung und marktgerechter Kalkulation. Erfahrungswerte ermöglichen es, auf bewährte Durchschnittswerte zurückzugreifen, ohne eine zusätzliche Recherche durchführen zu müssen. Sie reduzieren den Aufwand der Informationsbeschaffung und tragen dazu bei, die Informationskosten auf ein sinnvolles Mass zu begrenzen (Vogt, 2025, pp. 12-19) (Wagenhofer, 1990, p. 36).

Das zu entwickelnde Programm verfolgt bewusst einen alternativen Ansatz gegenüber den gewohnten Ausschreibungsmethoden. Anstatt auf Werte zurückzugreifen, die dem Wettbewerb dienen und oft wenig mit den tatsächlichen Bedingungen auf der Baustelle zu tun haben, soll das Programm mit realitätsnahen Daten arbeiten. Ziel ist es, die Informationskosten zu senken, die entstehen, wenn Unternehmen eigene Recherchen durchführen müssen, um belastbare Werte zu erhalten. Das Programm soll hier unterstützend wirken und Entscheidungsträgern die Möglichkeit geben, geplante Terminabläufe mit realitätsnahen Erfahrungswerten abzugleichen und so besser einschätzen zu können.

2.1.2 Erfahrungswerte

Die Frage, wann ein Erfahrungswert als realitätsnah gelten kann, ist zentral für die Qualität jeder baupraktischen Terminplanung. Auf den ersten Blick scheint jeder Erfahrungswert aus der Realität zu stammen, denn schliesslich basiert sie auf tatsächlichen Beobachtungen. Doch sobald mehrere Erfahrungswerte zusammengeführt werden, um sie projektübergreifend anzuwenden, steigt die Verallgemeinerung und damit die Streuung innerhalb der Werte.

Je höher die Betrachtungsebene, desto unsicherer wird die Aussagekraft im Vergleich zur konkreten Ausführung. Erfahrungswissen, das über Jahre hinweg aufgebaut wurde, bleibt häufig individuell und projektbezogen. Informationen zu geometrischen Eigenschaften, Verfügbarkeit von Ressourcen, technischen Vorgaben, Klima sowie zu logistischen Einschränkungen sind in diesen Erfahrungswerten nicht explizit definiert. Eine zu detaillierte Betrachtung kann zu einem erheblichen Modellierungs- und Informationsbeschaffungsaufwand führen. Ein zu geringer Detaillierungsgrad innerhalb der Erfahrungswerte kann zu mangelnder Transparenz führen und in späteren Ausführungsphasen Abweichungen in der Bauzeit sowie Koordinationsprobleme zwischen den beteiligten Gewerken verursachen (Hall, et al., 2021, p. 3).

Deshalb wird ein Mittelweg angestrebt: Das Programm soll mit möglichst wenigen Benutzereingaben auskommen und dennoch belastbare, praxisnahe Werte liefern. Dieser Ansatz soll den Benutzeraufwand reduzieren und trotzdem eine Grundlage für realistische Berechnungen schaffen, ohne die Modellvorbereitung unnötig zu verkomplizieren.

Im folgenden Abschnitt werden Erfahrungswerte aus der Praxis mit Angaben aus der Fachliteratur und den Richtwerten des Schweizerischen Baumeisterverbands verglichen. Dabei wird aufgezeigt, wie gross die Differenz sein kann, wenn Erfahrungswerte auf einer sehr hohen Betrachtungsebene angewendet werden im Vergleich zu einer detaillierten Berechnung.

2.1.2.1 Vergleich der Erfahrungswerte

In mehreren Gesprächen mit Kalkulatoren, Projektleitern und Bauablaufplanern konnten praxisnahe Erfahrungswerte gesammelt werden, die Einblick in die konventionelle Vorgehensweise bei der Erstellung von Bauprogrammen geben. Für den Vergleich wurden zwei Perspektiven berücksichtigt. Dabei wurden Erfahrungswerte, wie sie typischerweise in der Ausschreibung verwendet werden, mit solchen verglichen, die für eine detaillierte Berechnung in der Ausführungsplanung herangezogen wurden.

In der Ausschreibungsphase genügt häufig bereits die Angabe der Wandlänge oder der Schalungsfläche einer Decke, um eine grobe Einschätzung der Bauzeit vorzunehmen. Diese Methoden erlauben zwar eine schnelle Einschätzung der Bauzeit, gewährleisten jedoch keine ausreichende Genauigkeit, wenn geometrische Randbedingungen stark variieren.

Eine exakte Berechnung für jedes Bauteil erfordert jedoch die Ermittlung spezifischer Mengen, was in dieser frühen Projektphase mit einem unverhältnismässig hohen Informationsaufwand verbunden ist. Um die Unterschiede zwischen einer vereinfachten Schätzung und einer detaillierten Berechnung zu verdeutlichen, wurde eine Betonwand als Vergleichsreferenz gewählt.

Die Arbeitsschritte Schalen, Bewehren und Betonieren werden separat betrachtet, wobei ausschliesslich die Wandgeometrie die Abweichung darstellt. Weitere Einflüsse wie Temperatur, Witterung, Logistik oder die Arbeitsmotivation bleiben in diesem Vergleich unberücksichtigt.

Als Vergleichswert gilt der Erfahrungswert aus der Ausschreibung:

An einem Arbeitstag kann eine Wandlänge von 10 Metern erstellt werden. Für die Detailberechnung werden Leistungswerte verwendet, die in Abstimmung mit einem Bauführer festgelegt wurden. Für die Bewehrung wird ein Bewehrungsgehalt von 100 kg/m³ Beton angenommen.

Die variablen Parameter sind die Wandbreite (0.15 m bis 0.30 m) und die Wandhöhe (1.5 m bis 3.5 m), basierend auf den definierten Grenzen der SBV-Leistungsbeschreibungen (Schweizerischer Baumeisterverband, 2024).

Erfahrungswerte	Ausschreibung	Ausführung
Arbeitsstunden / Tag		9 h
Wandlänge		10 m
Wanddicke	-	0.15 – 0.30 m
Wandhöhe	-	1.50 – 3.00 m
Leistungswerte	10 m Wandlänge / Tag	Schalen: 6.7 m ² /h
		Bewehren: 330 kg/h
		Betonieren: 5 m ³ /h

Tabelle 1 Gegenüberstellung der Erfahrungswerte aus Ausschreibung und Ausführung

Die Analyse zeigt in der Tabelle 2 deutliche Abweichungen zwischen den vereinfachten Erfahrungswerten und der detaillierten Berechnung. Während die Bauzeit der Ausschreibung von einem Arbeitstag bzw. neun Stunden ausgeht, variiert die Dauer der Detailberechnung je nach Geometrie. Eine detaillierte Berechnungstabelle ist im *Anhang 1 Zeitdifferenzen* enthalten.

Länge [m]	Höhe [m]	Breite [m]	Dauer Ausschr. [h]	Dauer Ausführung [h]	Differenz [h]
10	1.5	0.15	9.00	5.63	-3.38
10	2.0	0.15	9.00	7.50	-1.50
10	2.5	0.15	9.00	9.38	0.38
10	3.0	0.15	9.00	11.25	2.25
10	3.5	0.15	9.00	13.13	4.13
10	1.5	0.20	9.00	6.00	-3.00
10	2.0	0.20	9.00	8.00	-1.00
10	2.5	0.20	9.00	10.00	1.00
10	3.0	0.20	9.00	12.00	3.00
10	3.5	0.20	9.00	14.00	5.00
10	1.5	0.25	9.00	6.38	-2.63
10	2.0	0.25	9.00	8.50	-0.50
10	2.5	0.25	9.00	10.63	1.63
10	3.0	0.25	9.00	12.75	3.75
10	3.5	0.25	9.00	14.88	5.88
10	1.5	0.3	9.00	6.75	-2.25
10	2.0	0.3	9.00	9.00	0.00
10	2.5	0.3	9.00	11.25	2.25
10	3.0	0.3	9.00	13.50	4.50
10	3.5	0.3	9.00	15.75	6.75

Tabelle 2 Zeitdifferenz der Erfahrungswerte von Ausschreibung und Ausführung

In der Abbildung 1 ist die Tabelle 2 als 3D-Diagramm dargestellt. Die Visualisierung bietet einen schnellen Überblick darüber, ob der in der Ausschreibung verwendete Erfahrungswert tatsächlich im mittleren Bereich liegt oder eher ambitioniert angesetzt wurde. Im 3D-Diagramm ist die Zeitdifferenz auf der z-Achse in Orange dargestellt, während die Wandbreite in Grün und die Wandhöhe in Blau die x- und y-Achse bilden.

Liegt die Detailberechnung exakt beim Referenzwert von neun Stunden, beträgt die Zeitdifferenz null. Alle Wandgeometrien, bei denen dieser Fall zutrifft, befinden sich auf der roten Linie. Dabei handelt es sich vor allem um Wände mit einer Höhe zwischen 2.0 – 2.5 m.

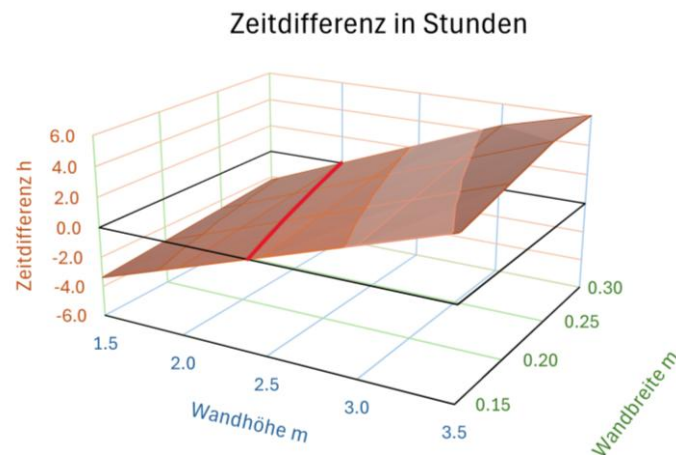


Abbildung 1 Zeitdifferenz der Erfahrungswerte von Ausschreibung und Ausführung bei einer 10 m langen Wand

Die Grafik macht des Weiteren deutlich, dass die Annahme von 10 m Wandlänge pro Tag im unteren Drittel des Wertebereichs liegt. Daraus ergibt sich, dass rund zwei Drittel der Wände eine längere Bauzeit benötigen als der Ausschreibungswert. Verläuft die rote Linie am unteren Rand, erfordern die meisten Wände eine längere Bauzeit, als der Erfahrungswert der Ausschreibung vermuten lässt. Das bedeutet, dass der Erfahrungswert von 10 Metern Wandlänge pro Tag für durchschnittliche Geometrien geeignet ist und sich über mehrere Projekte hinweg statistisch ausgleichen kann.

Bei Fällen mit extremen Geometrien kann dieser Wert jedoch grössere Differenzen verursachen. Beispiele hierfür sind eine massive Wand mit einer 30 cm Breite und 4 m Höhe oder eine sehr schlanke Wand mit einer 15 cm Breite und 1.5 m Höhe. In diesen Fällen liegt die Differenz bei rund +6 beziehungsweise -4 Stunden. Wird diese Abweichung auf ein typisches Wohnbauprojekt mit zwei Geschossen und 30 Wänden übertragen, kann dies im Extremfall zu einer Differenz von bis zu ± 20 Arbeitstagen führen. Das bedeutet, die Bauzeit kann allein aufgrund der Wandgeometrie zwischen 0 und 40 Tagen variieren. Werden zusätzlich weitere Einflussfaktoren berücksichtigt, wie die Anzahl eingesetzter Arbeitskräfte, individuelle Leistungswerte oder Produktivitätsverluste, können die Abweichungen deutlich grösser ausfallen.

Mit konventionellen Methoden ist es kaum möglich, alle relevanten Variablen zu erfassen und zu berücksichtigen. Mit automatisierten, modellbasierten Ansätzen lassen sich diese Parameter umfassend auswerten und in die Ablaufplanung integrieren. Aufgrund der zunehmenden Verfügbarkeit von digitalen Modellen und leistungsfähigen Rechnern ist zu erwarten, dass eine Vielzahl entsprechender Softwarelösungen auf dem Markt bereits existieren. Welche bestehenden Softwarelösungen und wissenschaftlichen Arbeiten sich bereits mit dieser Problematik befassen, wird im folgenden Kapitel erläutert.

2.2 Bestehende Softwarelösungen und Literatur

2.2.1 Bestehende Softwarelösungen

Im Jahr 2022 wurde eine wissenschaftliche Studie veröffentlicht, die den Einsatz von Softwarelösungen untersuchte, mit denen sich Bauprogramme entweder automatisch oder manuell mit digitalen Bauwerksmodellen verknüpfen lassen. Ziel der Studie war es, einen Überblick über die derzeit eingesetzten Softwarelösungen zu gewinnen und deren Herausforderungen zu analysieren. Die Umfrage wurde mit 51 Fachpersonen aus der französischen Baubranche durchgeführt, darunter BIM-Manager:innen, Bauingenieur:innen, Projektleiter:innen und Architekt:innen.

Die Ergebnisse zeigen, dass Autodesk Revit in Kombination mit Navisworks von 55 % der Teilnehmenden verwendet wird, Bentley Synchro Pro von 25 %, Vico Control von 6 %, XD Builder von 4 % sowie weitere Softwarelösungen wie beispielsweise iTwo. Die Nutzung dieser Programme beschränkt sich jedoch grösstenteils auf die manuelle Verknüpfung von 3D-Elementen mit den zugehörigen Aufgaben (Doukari, et al., 2022, p. 9).

Ein Quervergleich mit Microsoft Copilot und ChatGPT zur Frage nach verfügbaren Softwarelösungen ergab ein ähnliches Bild, bei dem Navisworks am häufigsten genannt wird, gefolgt von Synchro Pro und PlanRadar. Diese Programme erlauben ebenfalls lediglich die manuelle Verknüpfung von Aufgaben mit 3D-Elementen. Nur eine Software, genannt Alice Technologies, wurde von Copilot und ChatGPT identifiziert, welche aus digitalen Modellen und deren Projektparametern automatisiert mehrere Bauablaufvarianten generieren und optimieren kann (ChatGPT, 2025) (Copilot, 2025).

Nach aktuellem Stand der Recherche, basierend auf der wissenschaftlichen Arbeit zur *Operational Efficiency Frontier* von (Morkos, 2014), dem Evaluationsbericht von (Arapi & Gagliano, 2019) sowie der Veröffentlichung von (Hall, et al., 2021), in der die Integration solcher Softwarelösungen in Lehrveranstaltungen beschrieben wird, ist Alice Technologies derzeit die einzige angewendete Lösung auf dem Markt, die Bauprogramme automatisch aus 3D-Modellen erstellen kann.

Alice Technologies wurde im Jahr 2015 von Morkos gegründet; basierend auf seiner wissenschaftlichen Arbeit aus dem Jahr 2014. Bis 2021 konnte das Unternehmen eine Finanzierungssumme von 38.3 Millionen US-Dollar einwerben, um die Idee kommerziell umzusetzen. Die entwickelte Software baut auf der von René Morkos entwickelten Tri-Constraint-Method auf, die wiederum auf der Constraint-Methode von (Niederlinski, 2011) beruht (Hall, et al., 2021, p. 4) (vgl. (Morkos, 2014)).

Im März 2023 wurde ein Gespräch mit dem Sales-Team von Alice Technologies initiiert, um eine Preisanfrage zu stellen. Zu diesem Zeitpunkt wurde mitgeteilt, dass die Software ausschliesslich in Kombination mit Support erworben werden kann und sich die vorgesehenen Projekte auf eine Bausumme von mindestens 80-150 Millionen US-Dollar beziehen müssen.

Der verpflichtende Support erfordert pro Projekt eine Gewinnabgabe von 10 Prozent und muss bei der Anwendung der Software durchgehend involviert sein. Diese Bedingungen galten zum Zeitpunkt der Anfrage im März 2023 (Buresova, 2023). Ein Blick auf die aktuelle Webseite des Unternehmens zeigt, dass derzeit eine Bausumme von mindestens 75 Millionen US-Dollar vorausgesetzt wird (ALICE Technologies Inc., 2025).

Da die Anforderung bestand, das Programm auch in der Ausschreibungsphase für schnelle Auswertungen einzelner Modellteile oder kleinerer Projekte anwenden zu können, war der Einsatz der Alice-Software bei der Gewinnabgabe nicht möglich. Denn in der Phase der Angebotskalkulation wird noch kein Gewinn realisiert. Ein weiterer Grund ist der erhebliche Aufwand, der mit den notwendigen Voreinstellungen verbunden ist. Für die Nutzung von Alice Technologies müssen zahlreiche Regeln und Parameter vorgängig manuell hinterlegt werden.

Die manuelle Eingabe führt dazu, dass die Verknüpfungen innerhalb des Modells sehr statisch bleiben. Dadurch ist es nicht möglich, flexibel Modellteile hinzuzufügen oder zu entfernen, um gezielte Auswertungen einzelner Bereiche vorzunehmen. Sobald ein Teil des Modells deaktiviert wird, sind die zuvor definierten Abhängigkeiten nicht mehr vollständig gegeben, was die Konsistenz der Bauablauflogik beeinträchtigt.

Dieses Vorgehen ist mit erheblichem Aufwand verbunden, wie auch in der Arbeit von (Arapi & Gagliano, 2019, pp. 72-77) dokumentiert wurde, und ist laut aktueller Dokumentation von Alice weiterhin erforderlich (ALICE Technologies Inc., 2025). In einer Gastvorlesung an der ETH Zürich erklärte René Morkos selbst, dass die manuelle Erstellung der räumlichen Einschränkungen so aufwendig war, dass sie in der Praxis kaum genutzt und daher vorübergehend aus der Software entfernt wurde (Achermann & Ismael, 2021, p. 1).

Alice Technologies ist eine hochentwickelte Planungssoftware, die darauf ausgelegt ist, eine Vielzahl von Parametern zu integrieren. Ihre Anwendung stösst in der Praxis jedoch häufig an Grenzen, da in frühen Projektphasen relevante Daten oft nicht verfügbar sind. Dies betrifft insbesondere die Ausschreibungsphase, in der schnelle Aussagen zur Bauzeit auf Basis unvollständiger Modelle erforderlich sind. Ein System, das mit minimalen Eingaben auskommt und dennoch realitätsnahe Ergebnisse liefert, würde genau diese Lücke adressieren. Die Fähigkeit, flexibel mit unvollständigen oder sich ändernden Daten umzugehen, ist jedoch entscheidend für die Akzeptanz und Anwendbarkeit der Nutzer:innen.

Diese Einschränkungen waren ausschlaggebend für die Entwicklung eines eigenen Programms, das auf Prozessen und Erfahrungswerten aus der Baupraxis basiert. Ziel ist es, bereits mit minimalen Anforderungen an das zugrunde liegende Modell eine schnelle und belastbare Grobschätzung der Bauzeit zu ermöglichen.

2.2.2 Bestehende Literatur

Für die Entwicklung des Programms wurde eine Literaturrecherche durchgeführt, um bestehende Ansätze für einen Programmaufbau zu finden und relevante Grundlagen zu erarbeiten. Im *Kapitel 2.2.2.1 Konzept der bestehenden Softwarelösung* werden die wichtigsten Ansätze der Software Alice zusammengefasst. Im darauffolgenden *Kapitel 2.2.2.2 Analyse bestehender Methoden und Softwarelösungen* erfolgt eine Diskussion mit diesen Ansätzen.

Dabei werden die Ansätze hinterfragt, durch weiterführende Literatur ergänzt und im Hinblick auf ihre Anwendbarkeit für das eigene Programmsystem weiterentwickelt.

2.2.2.1 Konzept der bestehenden Softwarelösung

Die Tri-Constraint-Method (TCM) wurde von René Morkos im Rahmen seiner wissenschaftlichen Arbeit zur *Operational Efficiency Frontier* im Jahr 2014 entwickelt und basiert auf drei Einschränkungen. Morkos identifizierte eine wesentliche Lücke in der klassischen Bauablaufplanung und erkannte, dass der kritische Pfad zwar eine zentrale Rolle in der Bauablaufplanung spielt, jedoch wichtige Informationen für ein realitätsnahes Bauprogramm fehlen. Diese Informationslücken lassen sich durch drei Einschränkungen des Gravitationsgesetzes, der Ressourcenkapazität sowie der räumlichen Kapazität schliessen.

Ein grundlegendes Problem bei der klassischen Anwendung der Kritischen-Pfad-Methode besteht darin, dass Ressourcen erst nachträglich berücksichtigt und bewertet werden. Häufig wird bei der Erstellung des Bauprogramms von einer unbegrenzten Ressourcenverfügbarkeit ausgegangen. Dabei bleibt die räumliche Einschränkung unberücksichtigt, obwohl sie eine entscheidende Rolle spielt. Die Erstellung eines Bauprogramms auf konventionelle Weise ist mit erheblichem Aufwand verbunden, da die Ausarbeitung eines einzelnen Ablaufplans mehrere Tage oder sogar Wochen in Anspruch nehmen kann. Der zusätzliche Einbezug von Ressourcen sowie die Analyse der minimal erforderlichen Arbeitsflächen lassen sich unter wirtschaftlichen Bedingungen kaum effizient umsetzen. Durch den Einsatz digitaler Modelle eröffnen sich jedoch neue Möglichkeiten, um diese Informationsdefizite auszugleichen (Morkos, 2014, p. 2).

Morkos beschreibt in seiner Arbeit drei zentrale Einschränkungen, die notwendig sind, um automatisiert einen Bauablauf generieren zu können: (Morkos, 2014, p. 61)

1. Vorgänger-Nachfolger-Beziehungen	Definieren die Reihenfolge der Bauaktivitäten aufgrund des physikalischen Gravitationsgesetzes.
2. Räumliche Einschränkungen	Stellen sicher, dass Aktivitäten nicht gleichzeitig im selben Bereich stattfinden, wenn der Platz nicht ausreicht.
3. Ressourcenverfügbarkeit	Berücksichtigt die begrenzte Anzahl an Personal, Geräten und Materialien.

2.2.2.1.1 Vorgängerbeziehungen

In der Software Alice Technologies erfolgt die automatische Bestimmung von Vorgänger-Nachfolger-Beziehungen zwischen Bauteilen auf Basis semantischer Regeln, typischerweise anhand von IFC-Typen (z. B. IFCWall, IFCSlab, IFCPipeline), die dort als sogenannte „Rezepte“ bezeichnet werden. Beispiel:

Fundament → Wand → Decke → Dach

"Decke kann nur gebaut werden, wenn tragende Wände vorhanden sind."

(Morkos, 2014, p. 42) (vgl. (Knowledge Base - ALICE, 2025))

Solche Regeln sind hilfreich für die Grundstruktur eines Bauablaufs, decken jedoch nicht alle Anforderungen ab und entsprechen nicht immer der Reihenfolge der Konstruktion. Dies liegt daran, dass die Regeln auf einer reinen semantischen Auswertung der Bauteilinformationen basieren und die Geometrie für eine gravitative Kontrolle nicht nutzen. Um diese Beschränkung zu beheben, bietet die Software die Möglichkeit, manuell definierte Zonen einzurichten. Bei komplexen Modellen mit vielen Bauteilen ist die manuelle Einrichtung dieser Zonen jedoch sehr zeitaufwändig, wie in der Arbeit von (Arapi & Gagliano, 2019, p. 77) dokumentiert wurde.

2.2.2.1.2 Räumliche Einschränkung

Der zweite zentrale Aspekt der Tri-Constraint Method ist die räumliche Einschränkung, die parallele Aktivitäten im gleichen Bereich kontrolliert. In der wissenschaftlichen Arbeit von René Morkos wird diese Einschränkung auf Grundlage von Riley und Sanvido (1995) in zwölf unterschiedliche Typen gegliedert. Dazu zählen Bauteilbereiche, übergeordnete Nutzungsflächen, Entladezonen, Materialtransportwege, Wege für Personal, Lagerflächen, Bereitstellungsbereich, Vorfertigungszonen, Mindestarbeitsplatz für das Personal, Bereiche für Werkzeuge und Geräte, Entsorgungsbereich, Sicherheitszonen sowie Risikozonen.

Die räumliche Einschränkung wird in der Software Alice Technologies durch sogenannte Zonen abgebildet, die von den Nutzer:innen manuell definiert werden. Für jedes Bauteil wird eine Sequenz von Arbeitsaktivitäten erstellt, die für dessen Herstellung erforderlich ist. Für jede Arbeitsaktivität muss angegeben werden, wie viel Platz sie benötigt. Diese Aktivitäten werden anschließend einer spezifischen Zone zugewiesen. Im Rahmen der Simulation wird anschließend überprüft, ob mehrere Aktivitäten gleichzeitig innerhalb einer Zone stattfinden können, ohne die verfügbare Platzkapazität zu überschreiten (Knowledge Base - ALICE, 2025) (Achermann & Ismael, 2021, p. 1) (Morkos, 2014, p. 31).

2.2.2.1.3 Ressourcenverfügbarkeit

Die Ressourcenverfügbarkeit stellt den dritten Aspekt der Tri-Constraint-Method dar. Sie umfasst die Verfügbarkeit von Personal, Materialien und Geräten, die für die Ausführung des Bauteils erforderlich sind. In Alice Technologies kann die Kapazität dieser Ressourcen entweder als Gesamtanzahl pro Projekt oder als zeitlich begrenzte Verfügbarkeit innerhalb eines bestimmten Zeitraums definiert werden. Mit dieser Einschränkung wird verhindert, dass Arbeitstätigkeiten geplant werden, ohne die tatsächliche Verfügbarkeit der benötigten Ressourcen zu berücksichtigen. Die einzelnen Arbeitsaktivitäten müssen mit dem Bauteiltyp verknüpft werden und Angaben über die Abfolge der Aktivitäten enthalten (siehe Abbildung 2).

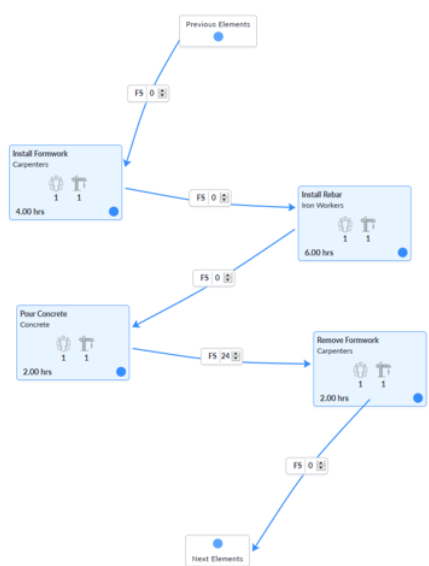


Abbildung 2 ALICE - Eingabe Arbeitsaktivitäten und Leistungswert
(Knowledge Base - ALICE, 2025)

Abbildung 3 ALICE - Eingabe benötigtes Material
(Knowledge Base - ALICE, 2025)

Die Ressourcenanforderungen werden über Formeln definiert, die in den Bauteiltypen hinterlegt sind. Wie in Abbildung 3 ersichtlich ist, wird beispielsweise für die Betonage festgelegt, welche Parameter berücksichtigt werden müssen. Dazu zählen die zu behandelnde Oberfläche, das Volumen des zu verarbeitenden Betons sowie die Anzahl der Arbeitskräfte, die für die Ausführung erforderlich sind (Hall, et al., 2021, p. 2) (Knowledge Base - ALICE, 2025).

2.2.2.1.4 Generierung von Bauabläufen

Zur automatisierten Erstellung von Bauablaufvarianten verwendet Alice Technologies den sogenannten *Random-Walk-Algorithmus*. Der Algorithmus generiert Bauprozesse, indem er zufällige Sequenzen von Aktivitäten abläuft, dies innerhalb der erlaubten Einschränkungen, und erzeugt dabei Tausende bis Millionen von Ablaufvarianten. So ist es mit dem Algorithmus möglich, Varianten explorativ zu generieren, ohne auf feste Regeln angewiesen zu sein.

Jede Aktivität durchläuft die Zustände: Zu bauen → Ausführbar → in Bearbeitung → Fertig.

Der Prozess endet mit einem erstellten Bauprogramm, sobald alle Aktivitäten durch die Zustände iteriert sind und keine Bauteile mehr zur Bearbeitung ausstehen (Hall, et al., 2021, p. 2).

2.2.2.2 Analyse bestehender Methoden und Softwarelösungen

2.2.2.2.1 Vorgängerbeziehungen

Die automatische Erkennung von Vorgänger-Nachfolger-Beziehungen ist ein entscheidender Schritt zur Effizienzsteigerung in der Bauablaufplanung. In der Software Alice erfolgt diese Zuordnung regelbasiert durch die Interpretation von IFC-Typen. Diese Methode ist jedoch anfällig für Fehler, insbesondere wenn Bauteile uneinheitlich klassifiziert sind. Schwierigkeiten entstehen beispielsweise dann, wenn die Geometrie eines Bauteils nicht eindeutig als Wand oder Decke zugeordnet werden kann.

Wird die Reihenfolge der Bauaktivitäten ausschliesslich über semantische Regeln wie: Bodenplatte → Wand → Decke definiert, können inkorrekte Abfolgen entstehen.

Ein Beispiel sind Deckenabsätze, bei denen die Bauteilabfolge Decke → Decke → Decke lautet. Daher sind häufig manuelle Korrekturen erforderlich.

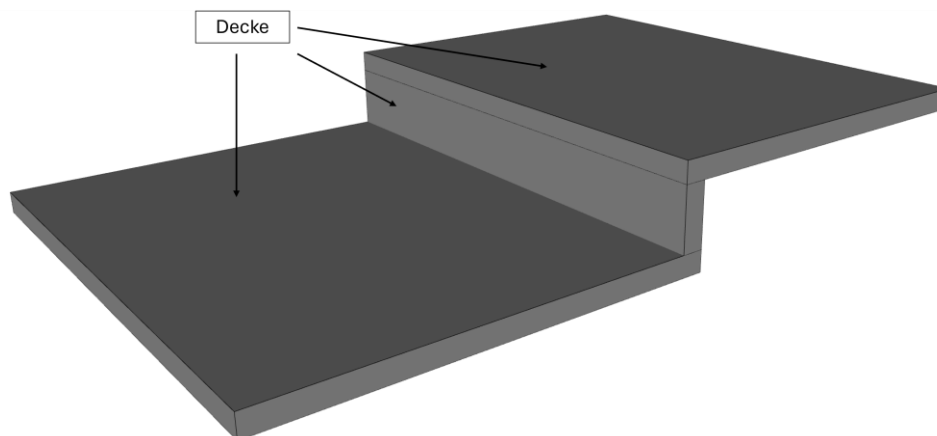


Abbildung 4 Beispiel eines Deckenabsatzes, bei dem die semantischen Regeln fehlerhaft sein könnten

Um die manuelle Nachbearbeitung durch die Nutzer:innen zu reduzieren, sollen die Vorgängerbeziehungen in der Programmimplementierung anhand gravitativer und geometrischer Zusammenhänge der Bauteile im Modell erkannt werden. Durch die Berücksichtigung gravitativer Abhängigkeiten kann die Fehleranfälligkeit gegenüber inkorrekten oder unvollständigen Typenzuweisungen im IFC-Modell reduziert werden.

2.2.2.2.1.1 Automatische Erstellung der gravitativen Abhängigkeit

Im wissenschaftlichen Bericht *Generation of a Construction Planning from a 3D CAD Model* von (De Vries & Harink, 2005) wird ein Ansatz beschrieben, wie gravitative Abhängigkeiten zwischen Bauteilen implementiert werden können. In der Arbeit wurden zwei verschiedene Methoden untersucht. Die erste Methode konnte sich aufgrund von Einschränkungen in der Rechnerleistung nicht durchsetzen, wird jedoch erläutert, da sie die Komplexität der Modellierung gravitativer Abhängigkeiten verdeutlicht. Die zweite Methode erwies sich als effizienter und wurde schliesslich für die Implementierung im Programm verwendet.

1. Methode – 3D Gitternetz

In der ersten Methode wurde ein 3D-Gitternetz erzeugt, in dem die Bauteile als Boundingboxen dargestellt wurden. Diese Boundingboxen bilden ein rechteckiges Volumen, das ein Objekt vollständig umschliesst und dessen räumliche Ausdehnung mit den äussersten Grenzpunkten beschreibt. Jedes Gitterelement, das sich mit einer Boundingbox überlappte, wurde markiert. Befinden sich zwei markierte Gitter übereinander, deutet dies auf eine gravitative Abhängigkeit hin. Mit diesen Markierungen konnten die Abhängigkeiten allein anhand der Grenzpunkte der Bauteile bestimmt werden.

Die Wahl einer geeigneten Gittergrösse stellte eine zentrale Herausforderung bei der ersten Methode dar. Eine Netzbreite von 20 cm erwies sich als praktikabler Kompromiss für eine zuverlässige Analyse. Dennoch konnten kleinere Bauteile wie Stahlstützen nicht zuverlässig erkannt werden, da sie vom Gitternetz nicht erfasst wurden. Eine feinere Auflösung wäre notwendig gewesen, um auch solche Bauteile zu identifizieren. Dies hätte jedoch zu einer drastischen Zunahme der Datenmenge geführt. Ein typisches Bauprojekt mit zwei Wohnblöcken und einer räumlichen Ausdehnung von 50 x 50 x 15 m würde bei einer Gittergrösse von 1 cm rund 37'500'000'000, beziehungsweise 37,5 Milliarden Gitterkuben erzeugen. Aufgrund der Speicherproblematik wurde die erste Methode von den Autoren verworfen und eine zweite, speichereffizientere Methode entwickelt (De Vries & Harink, 2005, p. 15).

2. Methode – Bauteil Translation

Die zweite Methode setzt den Einsatz einer CAD-Software voraus, da die Bauteile als echtes Solid-Volumen vorliegen müssen. Ein echtes Solid-Volumen beschreibt ein vollständig geschlossenes geometrisches Element mit klar definierter Innen- und Aussenseite. Das Element besteht anschliessend nicht nur aus Flächen, sondern bildet ein physikalisch auswertbares Modell (buildingSMART International, 2024).

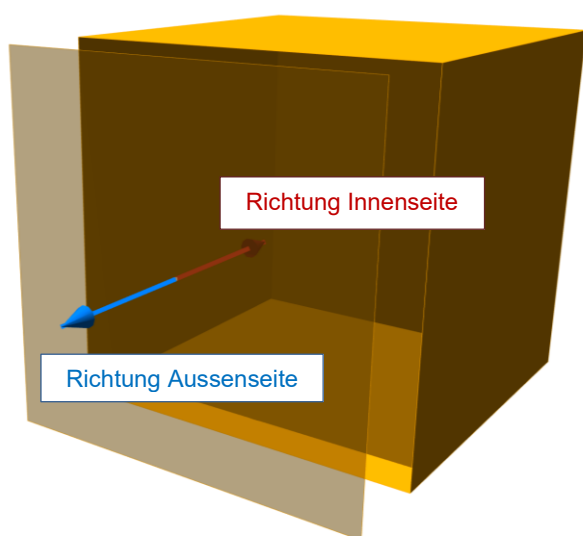


Abbildung 5 wie in CAD-Software Flächen eine Innen- und Aussenseite zugewiesen werden

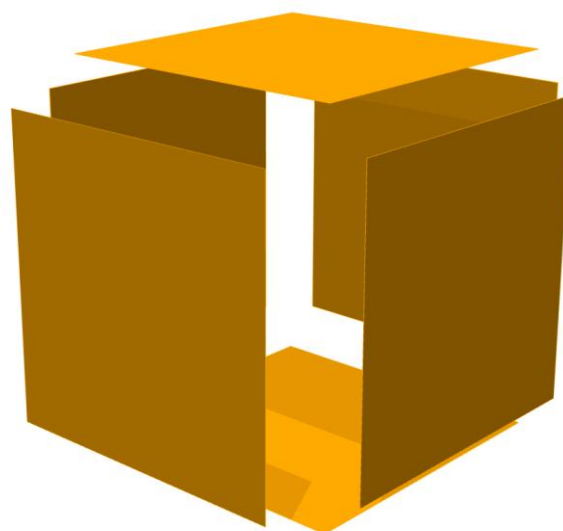


Abbildung 6 Beispiel, wie Flächen in einer IFC-Datei ohne Solid-Volumen dargestellt werden

Zwar enthalten IFC-Dateien bereits Positionsdaten sowie eine geometrische Beschreibung, doch die Umwandlung in ein Solid-Volumen erfolgt erst beim Einlesen in eine CAD-Umgebung. Vor dieser Konvertierung besitzen die Flächen eines Volumenkörpers keine eindeutige Orientierung, wodurch nicht erkennbar ist, ob die Flächen nach innen oder nach aussen zeigen.

Daher kann allein auf Basis der IFC-Daten nicht eindeutig bestimmt werden, wo sich der Innenraum eines Volumens befindet. Erst durch die Erzeugung eines echten Solid-Volumens können physikalische Berechnungen wie Volumen, Masse, Schwerpunkt oder Kollisionserkennung stattfinden.

Zur Bestimmung gravitativer Beziehungen zwischen Bauteilen verschieben De Vries und Harink diese entweder vertikal oder horizontal. Um potenzielle Vorgänger zu identifizieren, wird ein Bauteil um 10 cm nach unten verschoben und auf Überschneidungen mit anderen Bauteilen geprüft. Bei einer Überschneidung gelten die betroffenen Bauteile als Vorgänger.

Liegt keine vertikale Überschneidung vor, erfolgt eine horizontale Verschiebung in alle Richtungen mit erneutem Abgleich. Wird dabei ein seitlich angrenzendes Bauteil erkannt, kann dies auf eine produktionstechnisch bedingte Abhängigkeit hinweisen, wie etwa beim Einhängen von Balkonplatten an Decken. Liegen weder vertikale noch horizontale Überschneidungen vor, handelt es sich vermutlich um ein Starterbauteil oder ein autonomes Element ohne direkte Abhängigkeiten (De Vries & Harink, 2005, p. 16).

Die Verfasserin dieser Arbeit vermutet, dass die fehlende automatische Erkennung gravitativer Abhängigkeiten in der Software Alice auf den grundlegenden Unterschied zwischen einem Modell-Viewer und einer vollwertigen CAD-Software zurückzuführen ist. Da Alice lediglich über einen Modell-Viewer verfügt und keine CAD-Software integriert hat, können keine Solid-Volumen erzeugt werden. Ohne diese Volumenkörper ist eine präzise räumliche Analyse nicht möglich, wodurch gravitative Beziehungen zwischen Bauteilen nicht automatisch erkannt werden können. Zwar wäre die erste Methode mit einem Gitternetz grundsätzlich auch auf Basis eines IFC-Modells umsetzbar, doch stösst die Speicherleistung insbesondere bei komplexen Modellen, wie sie in Alice verwendet werden, schnell an ihre Grenzen.

Für das in dieser Arbeit entwickelte Programm wird daher eine CAD-Software eingesetzt, um die Verarbeitung von Volumenkörpern und die automatische Erkennung gravitativer Abhängigkeiten zu ermöglichen. Der detaillierte Ablauf zur automatischen Erkennung der gravitativen Abhängigkeiten wird im *Kapitel 4.3.1.1.4 Gravitative Abhängigkeit* beschrieben.

2.2.2.2.2 Räumliche Einschränkung

In der Software Alice werden räumliche Einschränkungen in Form sogenannter Zonen manuell definiert. Diese Zonen sowie die zugehörigen Aktivitäten sind nicht automatisch mit den Bauteilen des BIM-Modells verknüpft. Stattdessen erfolgt die Verknüpfung ausschliesslich über Regeln, die entweder den Bauteilen oder direkt den Zonen zugewiesen sind. Aufgrund des hohen Aufwands bei den manuellen Einstellungen wurden diese Zonen in der Praxis nur selten verwendet und zeitweise sogar aus der Software entfernt. Dadurch konnte eine der drei zentralen Einschränkungen der Tri-Constraint-Methode nicht mehr berücksichtigt werden (Achermann & Ismael, 2021, p. 1).

Die gleiche Herausforderung wie bei den Vorgänger-Nachfolger-Beziehungen zeigte sich auch bei der automatischen Erstellung der räumlichen Einschränkungen. Für die Erkennung der Aussenseite eines Bauteils muss ein Solid-Volumen vorliegen. Erst dadurch kann ein Mindestarbeitsplatz um das Bauteil herum generiert werden. Eine alternative Lösung stellt die Entwicklung eines eigenen Programms zur Interpretation von Solid-Volumen innerhalb der Software Alice dar. Dies ist jedoch mit einem erheblichen Entwicklungsaufwand verbunden und entspricht funktional dem Aufbau einer vereinfachten CAD-Software.

2.2.2.2.1 Automatische Erstellung vom Mindestarbeitsplatz

Das eigene Programm soll den Mindestarbeitsplatz automatisch erzeugen und den jeweiligen Bauteilen zuweisen, damit der Aufwand für die Nutzer:innen möglichst gering bleibt. Für die Automatisierung soll das Programm auf einer CAD-Software basieren, um echte Solid-Volumen direkt aus der Modellumgebung verarbeiten zu können. Die Bauteile erhalten basierend auf ihrem IFC-Typ und den ihnen zugewiesenen Arbeitsaktivitäten eine vordefinierte Mindestarbeitsfläche. Dadurch erfolgt die Verteilung der Arbeitsflächen automatisiert. Die Berechnung des Mindestarbeitsplatzes basiert auf der wissenschaftlichen Arbeit *Modelling of Spatial Constraints in BIM* von (Achermann & Ismael, 2021).

Für die Entwicklung dieser Mindestarbeitsflächen arbeiteten die Autoren mit folgenden Fachpersonen zusammen. Daniel M. Hall, Dozent für Bauprozessmanagement an der ETH Zürich, brachte seine Erfahrungen bezüglich der Anwendung der Software Alice im Kontext der Tri-Constraint-Methode ein. Ergänzt wurde die Entwicklung durch Jörg Amport, BIM-Spezialist der Bauunternehmung Marti AG, der praxisnahe Anforderungen aus der Bauausführung beisteuerte und mit dem Wissen für digitale Planungsprozesse ergänzte. Die Einbindung dieser Arbeit gewährleistet einen realitätsnahen Ansatz, da die Definition der Mindestarbeitsflächen direkt an den auszuführenden Aufgaben der Bauteile orientiert ist und auf tatsächlichen Baustellendaten beruht.

Betrachtet wurden Wände, Stützen und Decken, wobei zwischen Ortbetonbauweise und der Montage von Fertigbauelementen unterschieden wurde. Auf Basis durchschnittlicher Messwerte wurde eine Formel entwickelt, die in Abhängigkeit von Höhe und Breite eines Bauteils die erforderliche Mindestarbeitsfläche berechnet. Besonders bei Wänden zeigte sich, dass mit zunehmender Höhe auch die benötigte Fläche anstieg. (Achermann & Ismael, 2021, pp. 6-13)

Zur besseren Übersichtlichkeit werden in dieser Arbeit die im Bericht differenzierten Schalungsschritte, wie das Aufstellen der hinteren und der vorderen Schalung, zu einem einzigen Arbeitsschritt zusammengefasst. Der Platzbedarf wird dabei in zwei Komponenten unterteilt. Einerseits wird die Fläche berücksichtigt, die für die Schalung und das Gerüst selbst erforderlich ist. Andererseits wird der Raumbedarf für das eingesetzte Personal definiert. Diese Trennung ermöglicht eine präzise Analyse, welcher Anteil des Gesamtplatzbedarfs auf den Platzbedarf der Schalung und welcher auf den Platzbedarf der Arbeitstätigkeit entfällt.

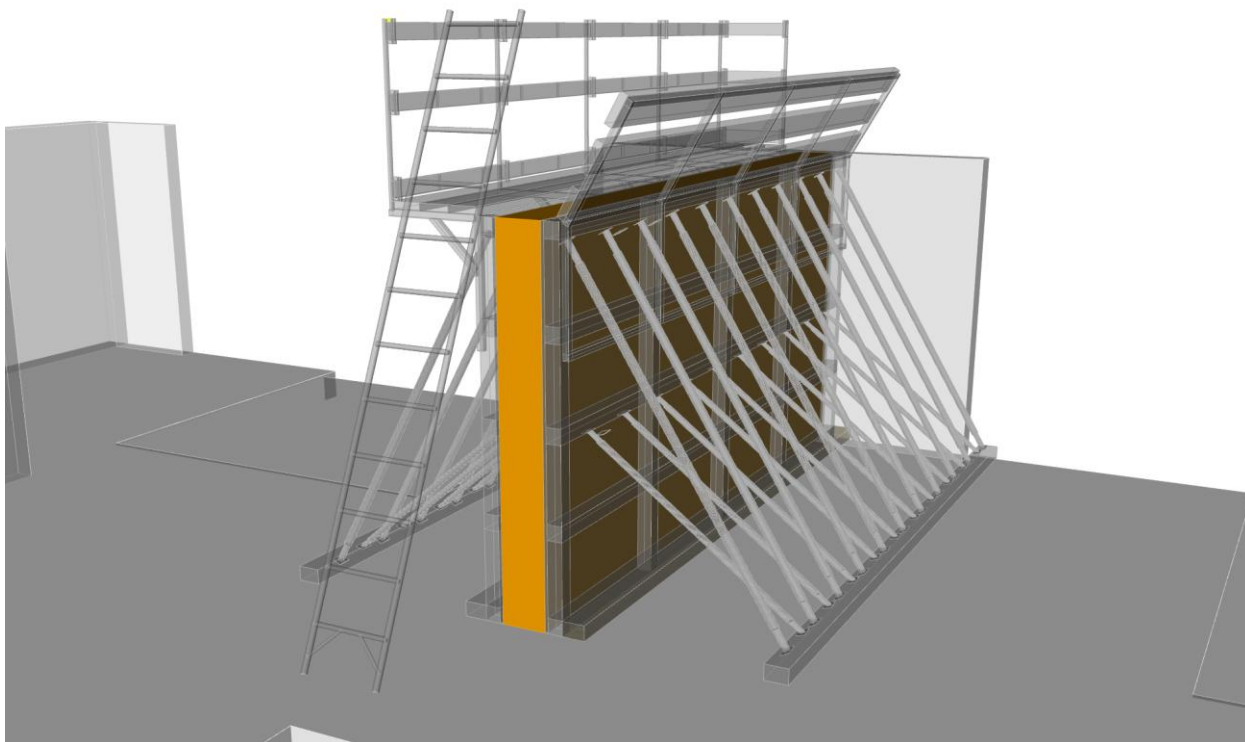


Abbildung 7 Modell einer Wandschalung und eines Gerüsts

Arbeitstätigkeiten	Schalungsfläche	Arbeitsplatz
Wand	Seitlicher Platzbedarf	Seitlicher Platzbedarf
Schalarbeiten	$\tan(30^\circ) \cdot h \cdot 0.9 + 0.5 \text{ m}$	1.0 m
Bewehrungsarbeiten	$\tan(30^\circ) \cdot h \cdot 0.9 + 0.5 \text{ m}$	1.5 m
Betonierarbeiten	$\tan(30^\circ) \cdot h \cdot 0.9 + 0.5 \text{ m}$	1.5 m
Stütze	Allseitiger Platzbedarf	Allseitiger Platzbedarf
Schalarbeiten	3 m x 1 m	1.0 m
Bewehrungsarbeiten	3 m x 1 m	1.5 m
Betonierarbeiten	3 m x 1 m	2 m x 1 m
Decke	Platzbedarf	Platzbedarf
Schalarbeiten	Raum unter der Decke	Raum über der Decke
Bewehrungsarbeiten	Raum unter der Decke	Raum über der Decke
Betonierarbeiten	Raum unter der Decke	Raum über der Decke

Tabelle 3 Modifizierung der Tabelle 13 Mindestarbeitsfläche von (Achermann & Ismael, 2021, p. 21)

2.2.2.2.3 Variantengenerierung

In der Software Alice werden mithilfe des Random-Walk-Algorithmus Millionen von Varianten für den Bauablauf generiert (Hall, et al., 2021, p. 2). Zwar erkennt das System identische Abläufe und schliesst sie aus, dennoch verbleiben zahlreiche Varianten, die sich nur in geringfügigen Details unterscheiden. Zwei mögliche Varianten mit verschiedener Abfolge sind in der Abbildung 8 und Abbildung 9 ersichtlich.

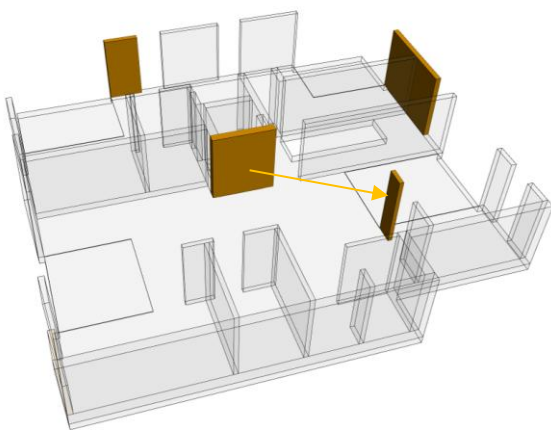


Abbildung 8 Variante 1 –
Wandbau in einer möglichen Reihenfolge

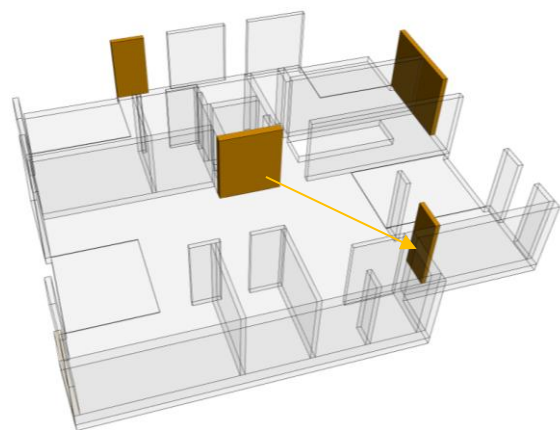


Abbildung 9 Variante 2 –
Wandbau in leicht veränderter Reihenfolge

Selbst nach Anwendung von Ausschlussverfahren bleibt eine grosse Anzahl nahezu identischer Bauprogramme bestehen, die von den Nutzer:innen manuell geprüft und bewertet werden müssen.

Ein ähnlicher Ansatz wurde im Fachartikel *Generating Construction Schedules through Data Extraction from BIM* analysiert. Auch dort basierte die Planung auf drei Einschränkungen: Vorgänger-Nachfolger-Beziehungen, Ressourcenverfügbarkeit und Mindestarbeitsplatz. Die Autoren kamen jedoch zu dem Schluss, dass die resultierenden Abläufe nicht immer realitätsnah sind, da zentrale Informationen wie Logistik, Bauanfangspunkt und räumliche Distanzen nicht berücksichtigt wurden (Kim, et al., 2013, pp. 291, 294).

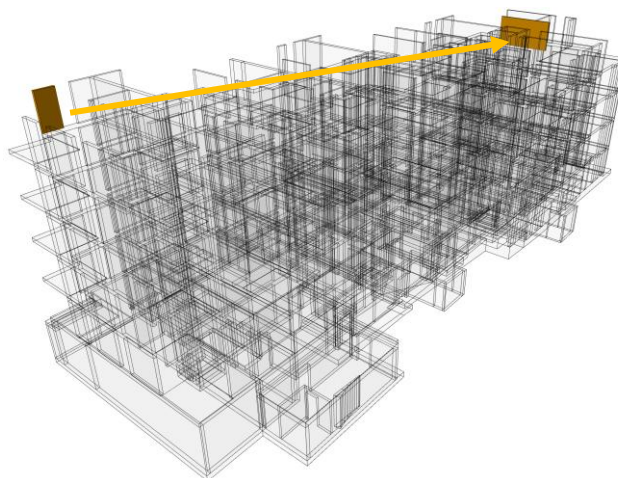


Abbildung 10 Möglichkeit zwei aufeinanderfolgende Wände zu errichten

Im *Kapitel 4.5.3 Entscheidungsschwierigkeiten* wird erläutert, weshalb allein auf Basis der Tri-Constraints Methode nicht zwangsläufig ein sinnvoller Bauablauf generiert werden kann und wie der Begriff „sinnvoll“ in diesem Kontext zu definieren ist. Damit nicht Tausende von Varianten entstehen, die in der Praxis kaum relevant sind und manuell aussortiert werden müssen, werden ergänzend Prioritätswerte eingeführt. Diese ergänzenden Informationen sollen die Anzahl irrelevanter Varianten deutlich reduzieren. Die Erklärung und der Implementierungsvorgang dieser Parameter erfolgen im *Kapitel 4.5.5 Prioritätswerte*.

Auf Basis der Erkenntnisse bestehender Ansätze wird in dieser Arbeit ein eigenes Programm entwickelt. Die Methode orientiert sich an den funktionalen Grundlagen der bestehenden Softwarelösung und wird um Komponenten erweitert, die bislang nicht oder nur unzureichend berücksichtigt wurden. Ziel ist es, die Anwendung für die Nutzer:innen zu vereinfachen und den manuellen Bearbeitungsaufwand auf ein Minimum zu reduzieren.

Übersicht der Fokusbereiche in der Programmentwicklung:

Automatische gravitative Abhängigkeit	Kapitel 4.3.1.1.4 Gravitative Abhängigkeit
Automatische Zuweisung Mindestarbeitsplatz	Kapitel 4.3.1.1.5 Mindestarbeitsfläche
Reduktion irrelevanter Varianten durch Prioritätswerten	Kapitel 4.5.5 Prioritätswerte

3 Methodik

3.1 Vorgehen

3.1.1 Übersicht

Das Vorgehen bei der Programmentwicklung umfasste folgende Schritte:

1. Kundenbedürfnisse abholen

Erhebung der Anforderungen und Erwartungen aus Sicht der Praxisanwender, insbesondere hinsichtlich Bedienbarkeit und Funktionalität

2. Softwareentwurf

Konzeption der Systemarchitektur, Definition der Schnittstellen und Auswahl geeigneter Datenformate

3. Informationsbeschaffung

Analyse relevanter Datenquellen, wissenschaftliche Grundlagen und technische Rahmenbedingungen

4. Implementierung

Entwicklung der Programmfunktionen

5. Testauswertungen und Feedback von Nutzer:innen abholen

Kalibrierung und Validierung der Ergebnisse anhand realer Anwendungsfälle und Rückmeldungen von Nutzer:innen

Die Programmentwicklung erfolgte zwischen den Schritten 4 und 5 in einem iterativen Prozess, da sich durch die Testauswertungen fortlaufend neue Erkenntnisse ergaben, die für die Weiterentwicklung massgeblich waren. Diese Erkenntnisse werden in der Arbeit nicht chronologisch dokumentiert, sondern thematisch zusammengefasst und in einem strukturierten Block dargestellt. Die iterative Arbeitsweise erlaubt eine flexible Anpassung und Erweiterung des Programms, das sich weiterhin noch in Entwicklung befindet und kontinuierlich ergänzt und verfeinert werden kann.

3.1.2 Softwareentwurf und technische Rahmenbedingungen

Nach der Erhebung der Kundenbedürfnisse müssen vor dem Softwareentwurf die grundlegenden technischen Rahmenbedingungen geklärt werden. Dazu gehören die Auswahl einer geeigneten Entwicklungsumgebung, die Definition der erforderlichen CAD-Software und anschließend die Festlegung der Schnittstellen.

Aus dem *Kapitel 2 Forschungsstand* resultiert, dass die Einbindung einer CAD-Software essenziell ist, um die benötigten Geometriedaten direkt aus dem Modell lesen zu können. Dafür soll auf eine bestehende, kompatible CAD-Software zurückgegriffen werden, um den Entwicklungsaufwand gering zu halten. Zusätzlich wird geprüft, ob die gewählte Software über eine Schnittstelle verfügt, die externe Programme ausführen kann, und welche Programmiersprache dafür erforderlich ist. Sobald die technischen Voraussetzungen geklärt sind, beginnt der Softwareentwurf in einem rückwärtsgerichteten Vorgehen. Ausgangspunkt bildet die Zieldefinition aus Sicht der Benutzer:innen. Im ersten Schritt wird festgelegt, welcher Output erzeugt werden soll, und im zweiten Schritt, darauf aufbauend, erfolgt die Beschreibung der notwendigen Funktionen, um diesen Output zu generieren. Abschliessend werden die dafür erforderlichen Eingabedaten identifiziert.

Dieser strukturierte Entwurfsprozess zum Programmaufbau umfasst:

- **Datenerfassung** – Definition der benötigten Inputwerte und Dateiformat
- **Datenprozessierung** – Funktionen innerhalb des Programms
- **Output** – Spezifizierung der Art und Dateiformat

3.1.3 Informationsbeschaffung

Die Beschaffung verlässlicher Leistungsdaten für die Bauausführung ist schwer zu finden, da die Arbeitsprozesse dynamisch, komplex und von zahlreichen internen und externen Faktoren beeinflusst werden. Des Weiteren werden viele Tätigkeiten auf der Baustelle oft nur manuell oder erst gar nicht erfasst, wie die Dauer von einzelnen Arbeitsschritten, Materialbewegungen oder Zwischenprozesse. Bauprozesse sind auch innerhalb eines Betriebes schwer zu standardisieren, da selbst bei gleichen Bauteilen die Arbeitsschritte stark variieren können. Gründe dafür sind beispielsweise die zahlreichen Einflussfaktoren wie die Witterungsbedingungen, Baustellenorganisation, individuelle Qualifikationen, krankheitsbedingte Ausfälle, unvorhergesehene Störungen im Bauablauf sowie persönliche Präferenzen seitens der Bauleitung.

Zur Schaffung einer Datenbasis werden praxisnahe Erfahrungswerte durch Befragungen erhoben und mit der Fachliteratur verglichen. Als Referenz dienen die Werke *Projektvorlaufzeit* (Hofstadler, 2022) sowie *Bauzeit und Produktivität im Baubetrieb* (Hofstadler, 2014). Hofstadler führte für seine Studien eine Datenerhebung durch, bei der insgesamt 54 Expertinnen aus Bauunternehmen, mit einer durchschnittlichen Berufserfahrung von 17 Jahren befragt wurden. Ein Grossteil, rund 68 Prozent, stammt aus Grossunternehmen, wodurch die Daten eine hohe Praxisrelevanz aufweisen.

Die gewonnenen Informationen aus Befragung und Literatur werden miteinander abgeglichen, analysiert und bilden die Grundlage für die Programmentwicklung. Welche Daten für welche Funktionen verwendet werden, ist im *Kapitel 4.3.2 Erfassung externer Datensätze* im Detail beschrieben.

Für die Leistungsdaten werden zusätzlich die Erfahrungswerte des Schweizerischen Baumeisterverbands (SBV) herangezogen, der über viele Jahre hinweg branchenspezifische Kennzahlen dokumentiert hat. Dabei fliessen Daten aus mittelgrossen und grossen Baustellen ein, die den Befragungsergebnissen am nächsten kommen. Durch die Verwendung der SBV-Daten kann der Datenschutz gewahrt bleiben, ohne auf praxisnahe Leistungskennwerte verzichten zu müssen.

3.1.4 Implementierung – Methodischer Ansatz

Das Programm folgt bewusst nicht dem klassischen Ansatz der Makrobetrachtung, wie er typischerweise in der Ausschreibungsphase angewendet wird. Bei dieser Betrachtung werden grobe Annahmen pauschal auf alle Situationen übertragen, ohne einzelne Einflussgrössen isoliert zu betrachten. Eine Einschätzung der Bauzeit auf Makroebene wäre beispielsweise die Dauer zur Herstellung aller Wände in einer Bauetappe. Diese Vorgehensweise birgt das Risiko, wichtige Details zu übersehen.

Stattdessen setzt die Implementierung auf die Mikrobetrachtung, die auf präzisen Einzelinformationen basiert. Diese Methode orientiert sich an der detaillierten Ermittlung der Bauzeit, bei der die Dauer eines Bauteils aus den einzelnen Arbeitstätigkeiten berechnet wird.

Während die Makrobetrachtung lediglich die Gesamtzeit für die Herstellung einer oder mehrerer Wände festhält, berücksichtigt die Mikrobetrachtung die einzelnen Schritte wie Einschalen, Bewehren, Betonieren, Ausschalen und die Ausschalfrist, die sich aus den geometrischen Eigenschaften des Bauteils ergeben (Hofstadler, 2022, pp. 229, 305).

Das Zusammenspiel zwischen der Mikro- und Makrobetrachtung lässt sich bildhaft in Form eines baumartigen Modells darstellen, wie in Abbildung 11 ersichtlich. Ähnlich wie bei einer Baumwurzel beginnen die Berechnungen bei den kleinsten verfügbaren Informationen, wie etwa mit den geometrischen Eigenschaften, und verzweigen sich von dort aus in höhere Ebenen. Diese Detailtiefe ermöglicht eine Kategorisierung der verschiedenen Einflussgrössen. Treten zeitliche Abweichungen auf, beispielsweise durch Witterungseinflüsse oder Produktivitätsverluste, lassen sich diese entlang der Verzweigungen gezielt rückverfolgen und identifizieren. Dadurch lassen sich die Differenzen transparent darstellen und können beispielsweise als prozentuale Einflussfaktoren in die Berechnungen integriert werden.

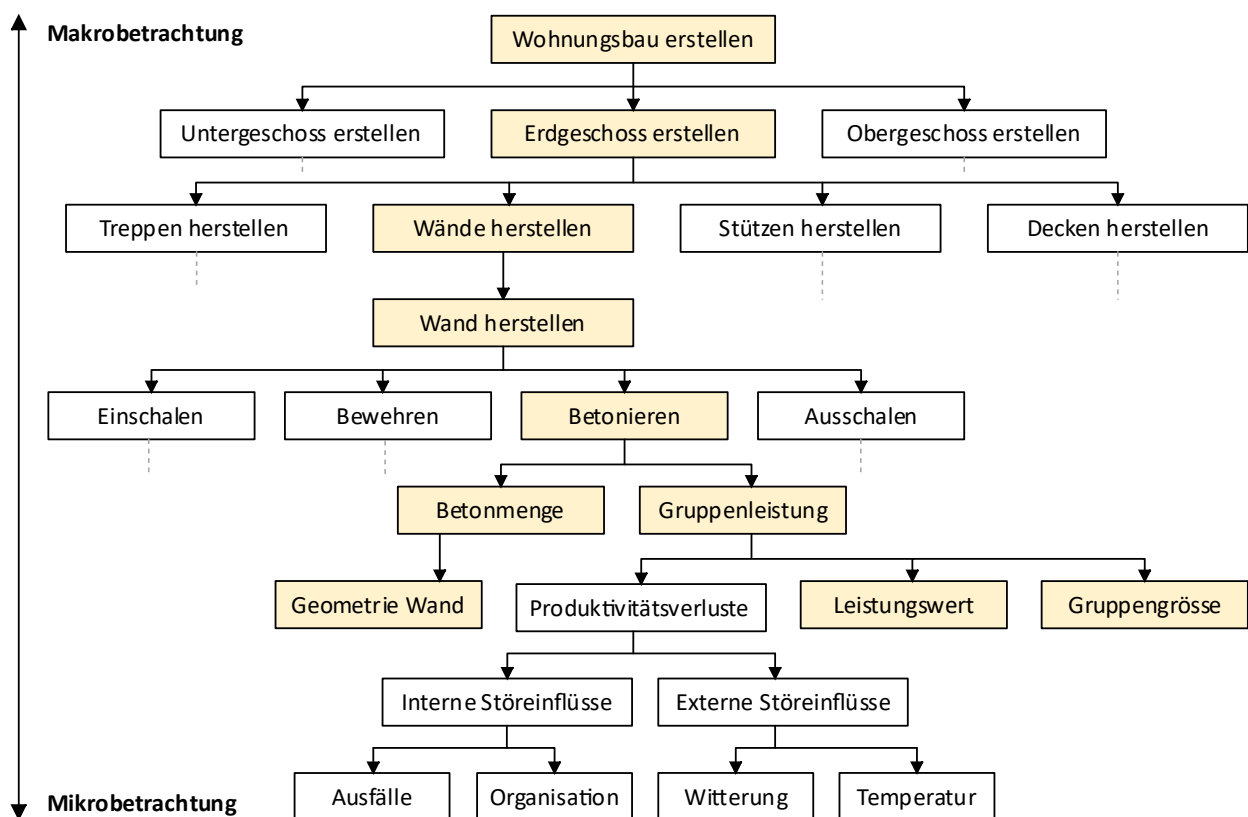


Abbildung 11 Betrachtung der Aufteilung zwischen Makro- und Mikroebene

Obwohl die Methode der Mikrobetrachtung voraussetzt, dass relevante Informationen möglichst transparent vorliegen, ist es nicht zwingend erforderlich, dass sämtliche Einflussgrößen bereits vollständig erfasst sind. Stattdessen können fehlende Einflussgrößen über prozentuale Faktoren berechnet werden. Da der Zeitrahmen für die Thesis begrenzt ist, wird bewusst priorisiert, welche Einflussgrößen in die Programmstruktur aufgenommen und welche gezielt ausgeklammert werden.

3.2 Abgrenzungen

Die Bauzeit ergibt sich aus einem komplexen Zusammenhang zahlreicher Einflussgrößen, wie bereits in den vorherigen Kapiteln thematisiert wurde. Eine vollständige Erfassung aller relevanten Größen ist jedoch weder im zeitlichen Rahmen der Thesis umsetzbar noch in jedem Fall möglich. Viele dieser Größen sind schwer messbar oder lassen sich nicht vollständig dokumentieren, wie etwa die Motivation einzelner Arbeitskräfte. In dieser Arbeit wird daher zunächst ein strukturierter Ansatz verfolgt, um die Einflussgrößen zu identifizieren, die sich nachweislich auf die Bauzeit auswirken. Im Anschluss erfolgt eine gezielte Abgrenzung jener Faktoren, die nicht in die Analyse einbezogen werden.

3.2.1 Einflussgrößen auf die Bauzeit

Eine Übersicht hierfür bietet die Fachliteratur *Produktivität im Baubetrieb* von Christian Hofstadler. Sein Ansatz bietet eine Grundlage, um diese Faktoren zu strukturieren und ihre Abhängigkeiten zu verstehen. Darin schlägt Hofstadler vor, die Einflussgrößen in drei übergeordnete Kategorien zu gliedern:

Einflussfaktoren auf die Produktivität des gesamten Baubetriebs

Hierunter fallen organisatorische Faktoren wie Planung, Steuerung, Kontrolle, Kommunikation und Dokumentation.

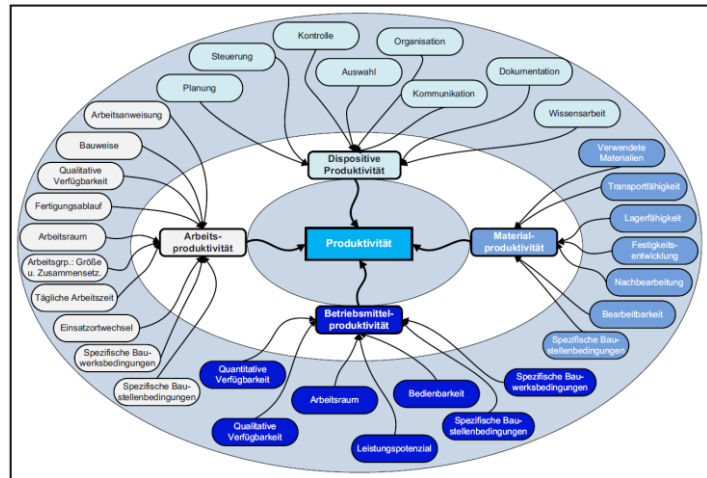


Abbildung 12 Einflüsse auf die Produktivität (Hofstadler, 2014, p. 18)

Einflussfaktoren auf die individuelle Leistungsfähigkeit des Personals

Diese Kategorie umfasst Einflüsse wie tägliche Arbeitszeit, Störeinflüsse, Einarbeitung und die Anzahl der Arbeitskräfte, die die individuelle Produktivität bestimmen.

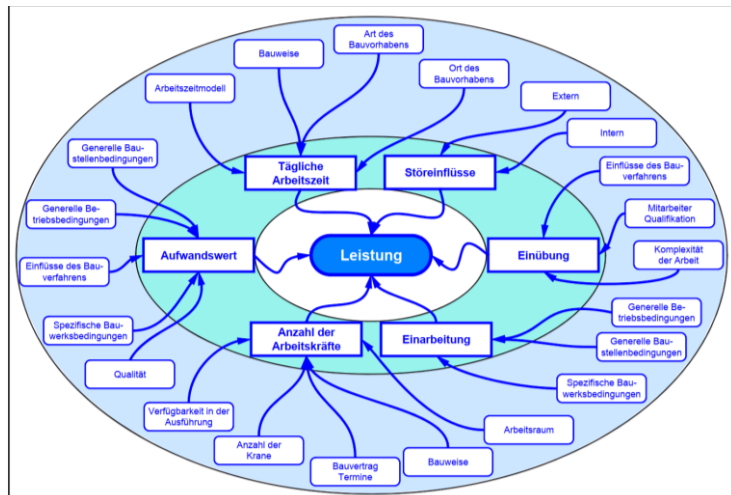


Abbildung 13 Einflüsse auf die Leistung (Hofstadler, 2014, p. 44)

Einflussfaktoren auf den Aufwandswert einzelner Arbeitstätigkeiten

Hier werden Faktoren betrachtet, die direkt auf die Dauer einzelner Arbeitsschritte wirken, wie Witterung, Bauweise, Komplexität der Arbeit, Materialverfügbarkeit und logistische Bedingungen.

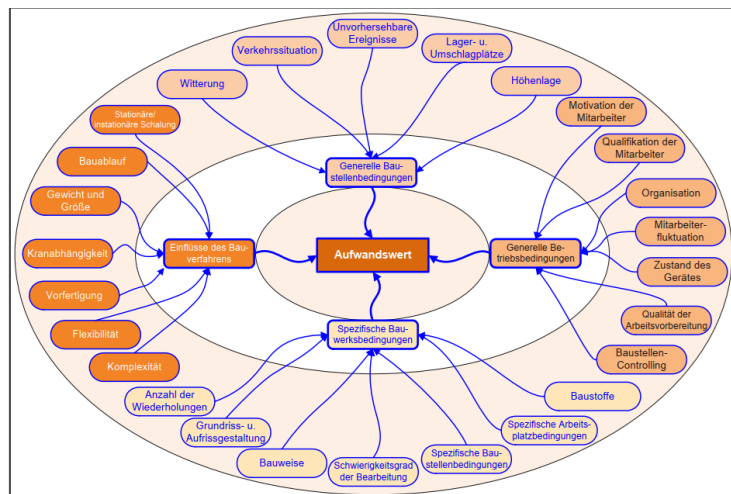


Abbildung 14 Einflüsse auf den Aufwandswert (Hofstadler, 2014, p. 44)

Die Abbildungen von Hofstadler verdeutlichen, dass die drei Kategorien nicht als voneinander getrennte Bereiche betrachtet werden können. Vielmehr bilden sie ein komplexes Netzwerk, bei dem jede Veränderung einer Einflussgrösse in einem Bereich Auswirkungen auf andere Bereiche hat. Diese Vernetzung zeigt, warum Optimierungen in der Praxis nicht isoliert erfolgen können und die Automatisierung von Bauprozessen anspruchsvoll gestalten.

3.2.2 Thematische Schwerpunkte

Zur Reduktion der Komplexität werden in dieser Arbeit die nicht betrachteten Themen ausgeschlossen. Stattdessen werden gezielt jene Themengebiete definiert, die in die Untersuchung einbezogen werden. In der Abbildung 15 wurden die Einflussfaktoren von Hofstadler in eine Baumstruktur überführt. In der Darstellung sind die einbezogenen Faktoren in Gelb markiert.

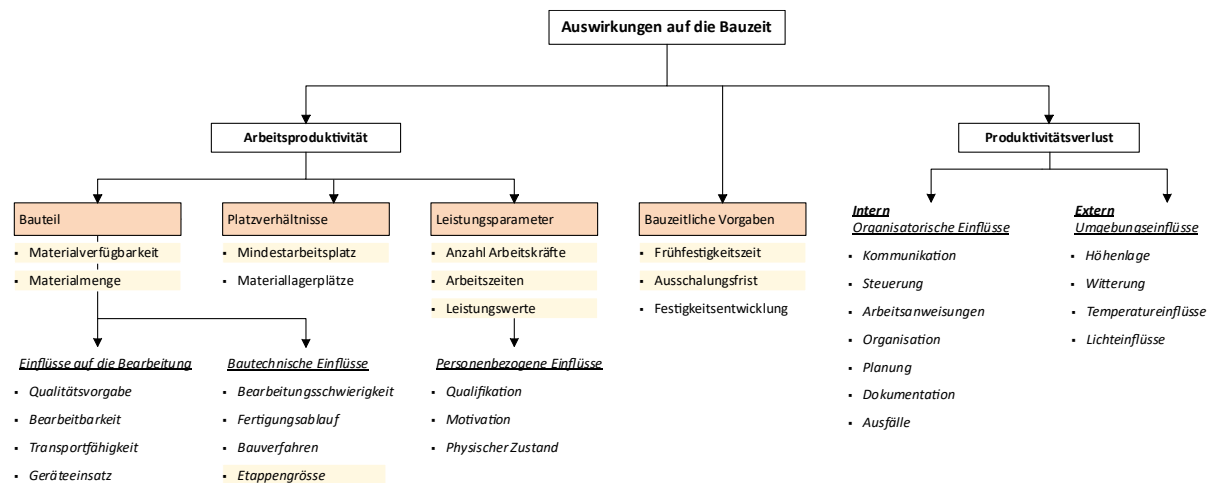


Abbildung 15 Einflüsse auf die Bauzeit – eigene Darstellung in Anlehnung nach Abb. 3.4, 3.17 und 3.18 von (Hofstadler, 2014, pp. 18, 44)

Die Untersuchung konzentriert sich ausschliesslich auf Bauteile aus Ortbeton im Bereich Hochbau-Rohbau. Der Detaillierungsgrad orientiert sich an der Ausschreibungsphase, in der lediglich begrenzte Informationen verfügbar sind. Sie umfasst die folgenden **Bauteile** des Rohbaus: Fundamente, Bodenplatten, Wände, Stützen, Balken und Decken. Unterschiede in der Materialqualität werden bewusst ausgeklammert, da solche Informationen in frühen Planungsphasen meist nicht verfügbar sind und eine höhere Modellkomplexität erfordern würden. Für die Betonqualität wird daher eine einheitliche Ausführung nach NPK A angenommen. Vorausgesetzt wird, dass die **Etappengrössen** im Modell korrekt verschnitten sind. Die Etappengrösse definiert jeweils

den Bauabschnitt eines Bauteils, der in einem einzelnen Betonvorgang realisiert werden kann. Der Fokus liegt dabei auf der Grösse der Etappen und nicht auf deren Reihenfolge. Das Programm geht davon aus, dass jedes Bauteil in einem Guss betoniert wird. Ist diese Voraussetzung nicht erfüllt, interpretiert das System das Bauteil als eigenständiges Bauteil mit separaten Arbeitsschritten und Ausschallfristen. Für die **Platzverhältnisse** wird ausschliesslich der erforderliche Mindestarbeitsplatz zur Bearbeitung eines Bauteils berücksichtigt. Weitere logistische Aspekte bleiben unberücksichtigt. Dazu gehören Materialtransportwege, Personalwege, Vorfertigungszonen oder Bereiche für die Entsorgung. Bei den **Leistungsparametern** werden die Kernprozesse Schalen, Rohrinstallationen, Bewehren, Betonieren, Ausschallfrist und Ausschallen betrachtet, da diese den grössten Einfluss auf die Bauzeit haben.

Die gelb hervorgehobenen Informationen stellen die essenziellen Datenanforderungen für die Erstellung eines Bauablaufs im Programm dar. Diese Daten werden entweder direkt aus dem digitalen Modell extrahiert oder als externe Datensätze (Default-Werte) im Programm hinterlegt. Die Herkunft dieser Daten sowie die Methoden zur Informationsbeschaffung werden im folgenden Kapitel des Programmaufbaus erläutert.

4 Programmaufbau

4.1 Programmübersicht

Die Struktur dieses Kapitels orientiert sich an einem klassischen Datenflussmodell für Programme. Dabei durchlaufen die Daten drei Hauptphasen: Input, Datenprozessierung und Output. Die Inputdaten stammen entweder direkt aus dem digitalen Modell oder werden als externe Datensätze in das Programm integriert. In der Phase der Datenprozessierung werden diese Daten genutzt, um die Bauzeiten einzelner Elemente zu berechnen und für die Erstellung der Bauabläufe aufzubereiten. Die automatische Generierung von Bauabläufen basiert auf einem Entscheidungsnetzwerk, das auf Bedingungsregeln sowie Prioritätswerten beruht. Dieses Netzwerk ermöglicht die strukturierte und nachvollziehbare Erstellung von Bauabläufen, die dem Benutzer schliesslich als Output in Form eines Gantt-Diagramms oder einer Paretofront zur Verfügung gestellt werden.

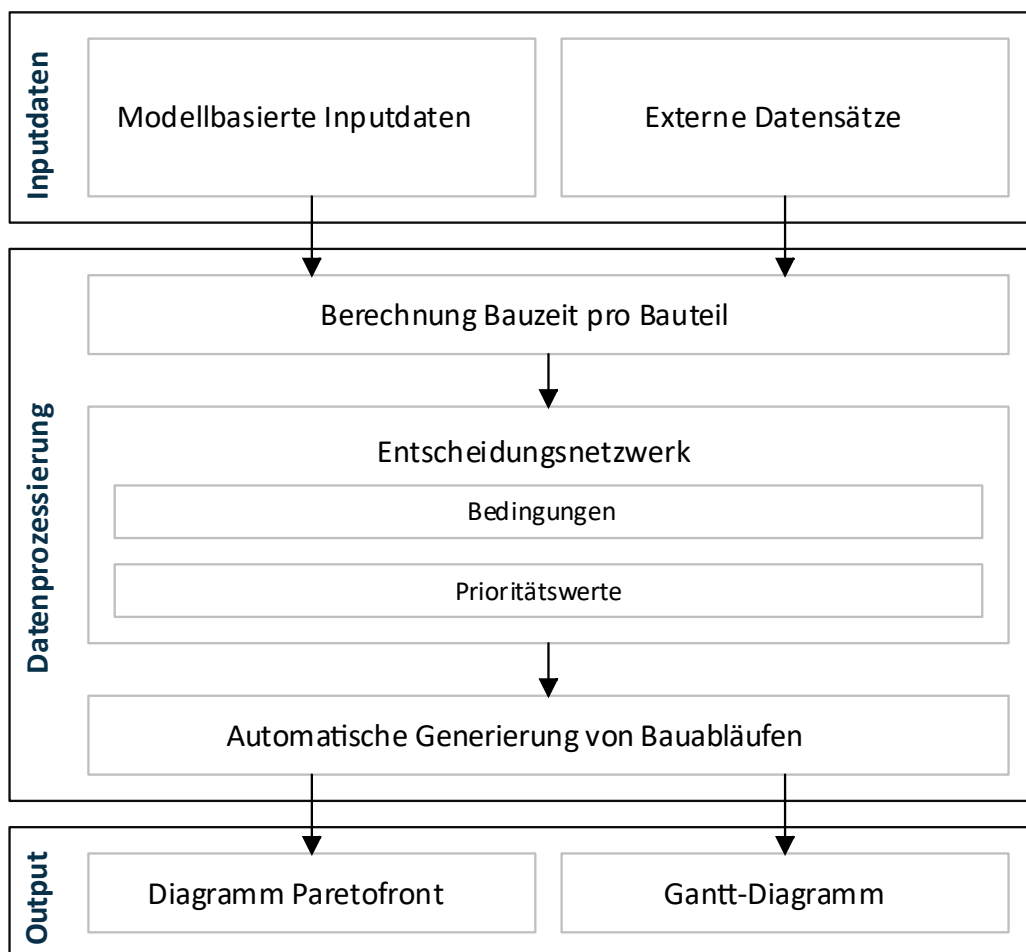


Abbildung 16 Datenflussmodell der Eigenentwicklung

4.2 Entwicklungsarchitektur

Bevor mit der eigentlichen Programmierung begonnen werden kann, muss eine geeignete Entwicklungsarchitektur definiert werden. Für die Durchführung der Berechnungen ist die Einbindung einer CAD-Software unerlässlich, damit Informationen aus dem Modell gelesen werden können. Damit das entwickelte Programm Informationen aus der CAD-Software abrufen kann, ist eine funktionale Schnittstelle erforderlich. Diese Schnittstelle übernimmt die Kommunikation zwischen Programm und Modell und muss in der Lage sein, sowohl die Modellinformationen korrekt auszulesen als auch die verwendete Programmiersprache zu interpretieren und auszuführen. Die Auswahl der CAD-Software erfolgte daher nach Kriterien wie Schnittstellenkompatibilität und Sprachunterstützung.

4.2.1 CAD-Software

Die Wahl der CAD-Software fiel auf Lexocad, ein Produkt aus der Firmenpalette von Cadwork, das speziell für die modellbasierte Planung während der Bauausführung im Rahmen von BIM-Prozessen entwickelt wurde. Lexocad eignete sich durch seine Ausrichtung auf Open-BIM und unterstützt eine Vielzahl offener Austauschformate, insbesondere IFC-Dateien. Die Software verfügt über eine integrierte Schnittstelle, die die direkte Ausführung benutzerspezifischer Skripte erlaubt. Darüber hinaus bietet Lexocad vordefinierte Funktionen, mit denen sich die relevanten Modellinformationen wie Geometrien und Solid-Volumen abrufen und direkt anwenden lassen. Ein weiterer ausschlaggebender Faktor für die Wahl dieser Software war ihre breite Anwendung unter den Projektbeteiligten, mit denen eine enge Zusammenarbeit erfolgt.

4.2.2 Schnittstelle

Die Software Lexocad stellt die öffentlich zugängliche API "OpenLexocad" bereit, welche auf ihrer Webseite www.openlexocad.com dokumentiert ist und als Schnittstelle zwischen der CAD-Umgebung und dem Skript dient.

4.2.3 Programmiersprache

Das Skript wurde in der Programmiersprache Python entwickelt und nutzt die Version 3.9, die aktuell als Interpreter in der CAD-Software Lexocad hinterlegt ist. Die eindeutig definierte Version ist entscheidend, um die Funktionalität zwischen Programm und CAD-Software sicherzustellen.

4.3 Datenerfassung

Im Kapitel zur Datenerfassung werden die Herkunft und Relevanz der Inputdaten beschrieben, die zu Beginn des automatisierten Prozesses erforderlich sind. Zur besseren Zuordnung der Herkunft der Inputdaten werden diese in zwei Kategorien unterteilt. Die erste Kategorie umfasst modellbasierte Informationen, die direkt aus der CAD-Umgebung entnommen werden. Die zweite Kategorie beinhaltet Inputdaten, die entweder manuell durch den Benutzer eingegeben oder als vordefinierte Grundlagedaten (Default-Werte) im Programm hinterlegt werden können. Diese Inputdaten werden für die Programmentwicklung als externe Datensätze bezeichnet.



Abbildung 17 Aufteilung der Inputdaten zwischen Modell und externen Datensätzen

4.3.1 Modellbasierte Daten

Ziel des Programms ist es, mit einem minimalen Satz an Modellinformationen eine belastbare Berechnungsgrundlage für die Erstellung eines realisierbaren Bauablaufs zu schaffen. Dafür werden lediglich zwei erforderliche Parameter aus dem Modell benötigt. Weitere Eingabedaten gelten als optional, besitzen jedoch eine hohe Relevanz für die Optimierung und die Generierung eines brauchbaren Bauablaufs.

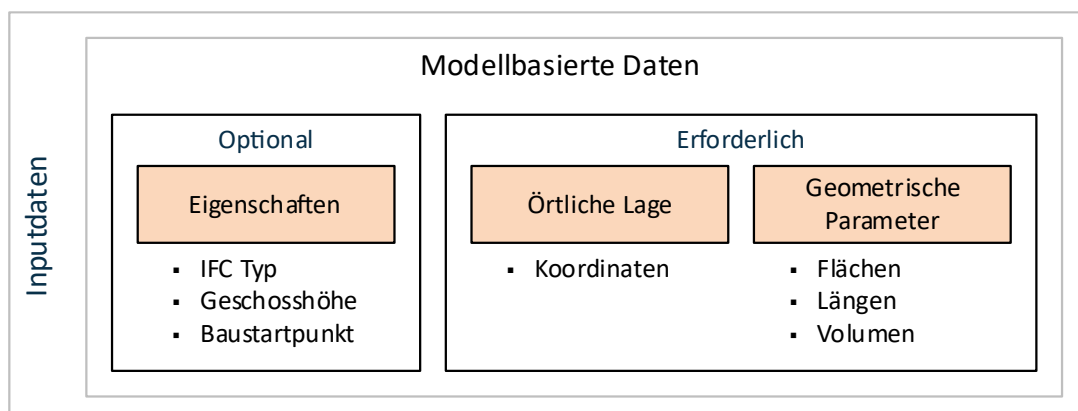


Abbildung 18 Erforderliche und optionale modellbasierte Inputdaten

4.3.1.1 Datenprozessierung aus den modellbasierten Daten

Zur Aufbereitung der Inputdaten wurden ergänzende Funktionen entwickelt, die direkt auf den geometrischen Eigenschaften der Bauteile basieren (siehe Abbildung 19). Anhand dieser Parameter lässt sich die benötigte Materialmenge für Schalung, Beton und Bewehrung ermitteln. In Kombination mit den räumlichen Koordinaten werden zudem gravitative Abhängigkeiten identifiziert und der erforderliche Mindestarbeitsplatz für die Ausführung berechnet.

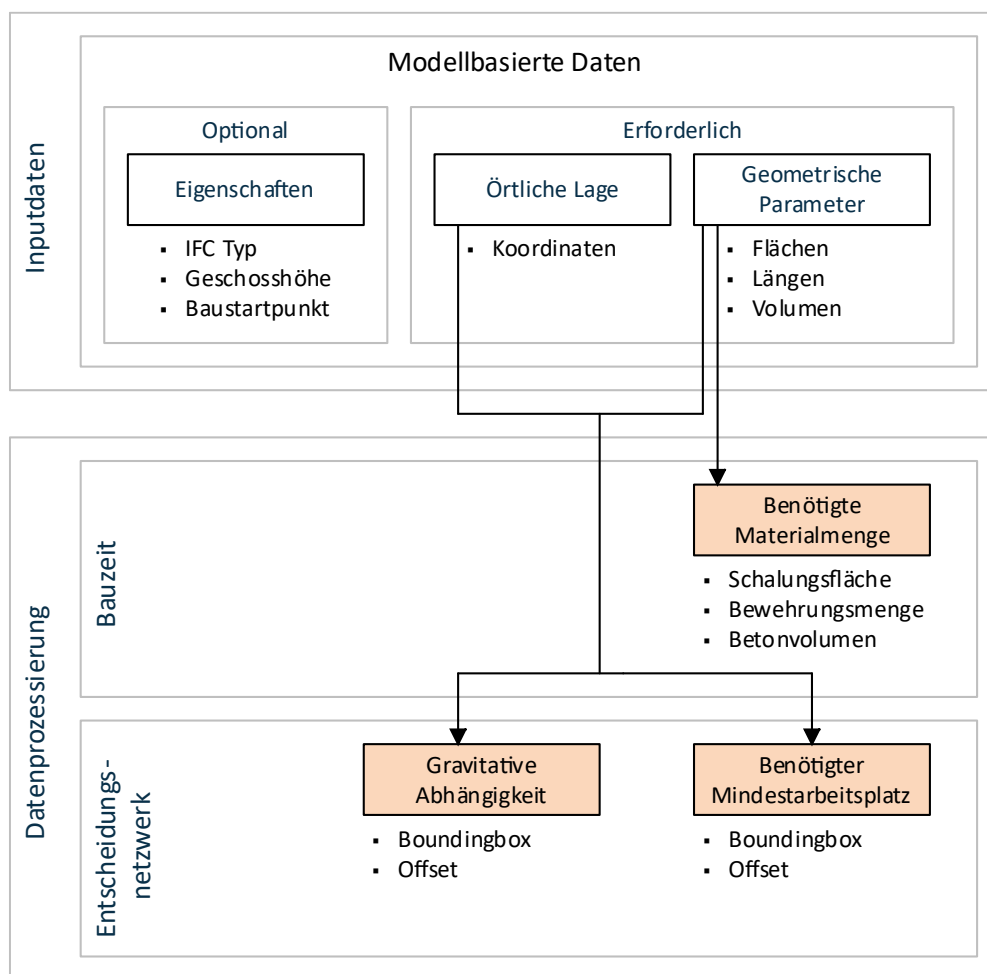
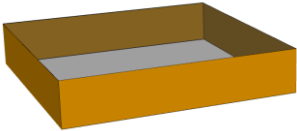
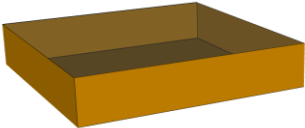
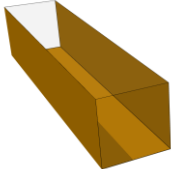


Abbildung 19 Datenprozessierung der geometrischen Modelldaten

4.3.1.1.1 Schalungsfläche

Die Schalungsfläche wird abhängig vom jeweiligen Bauteil direkt aus den einzelnen Flächen des Volumenkörpers berechnet. Bei Wänden mit doppelhäutiger Schalung werden die beiden grössten vertikalen Flächen berücksichtigt. Bei Decken hingegen fliessen die grösste horizontale Fläche auf der Unterseite sowie die umlaufenden vertikalen Randflächen in die Berechnung ein. Eine vollständige Übersicht der verwendeten Flächen ist in der nachfolgenden Tabelle dargestellt.

Fundament Bodenplatte	Alle vertikalen Seitenflächen	
Decke	Grösste horizontale Unterseitenfläche Alle vertikalen Seitenflächen	
Wände	Zwei grössten vertikale Flächen Eine Stirnseitenfläche	
Stützen	Alle vertikalen Seitenflächen	
Balken	Zwei grössten vertikale Flächen Grösste horizontale Unterseitenfläche	

4.3.1.1.2 Betonvolumen

Das Betonvolumen kann über eine Funktion der Lexocad API automatisch aus dem modellbasierten Volumenkörper abgerufen werden.

4.3.1.1.3 Bewehrungsmenge

In der Ausschreibungsphase fehlen häufig detaillierte Fachmodelle, insbesondere Bewehrungsmodelle. Daher wird die Bewehrungsmenge auf Basis des Betonvolumens abgeschätzt. Für jedes Bauteil lässt sich ein Näherungswert festlegen, wie viel Kilogramm Bewehrungsseisen pro Kubikmeter Beton erforderlich ist. Diese ermöglicht eine erste Mengenermittlung, ohne dass Fachmodelle oder zusätzliche Informationsdaten im Modell notwendig sind.

Die folgenden Kennwerte dienen als Grundlage für diese Abschätzung:

Fundamente: 110 kg/m³

Decken: 90 kg/m³

Wände: 85 kg/m³

Übrige Bauteile: 100 kg/m³

4.3.1.1.4 Gravitative Abhängigkeit

Basierend auf dem Ansatz von (De Vries & Harink, 2005) werden Kollisionsprüfungen eingesetzt, um gravitative Abhängigkeiten zwischen Bauteilen zu erkennen. Im ersten Schritt wird die Geometrie eines Bauteils dupliziert und entlang der z-Achse verschoben. Anschliessend erfolgt eine Kollisionsprüfung mit den darunterliegenden Bauteilen.

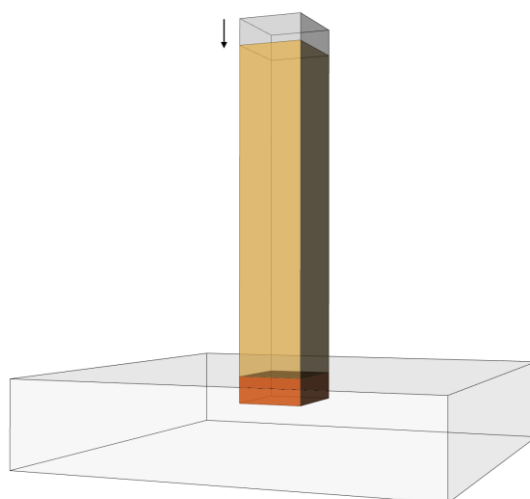


Abbildung 20 Translation der Stützegeometrie für die Kollisionsprüfung

Bleibt eine Kollision aus, wird im zweiten Schritt eine horizontale Verschiebung durchgeführt, um weitere potenzielle Abhängigkeiten zu identifizieren. Solche Bauteile können beispielsweise nachträglich eingehängte Elemente wie Balkonanschlüsse sein oder im Modell nicht realitätsgetreu dargestellte Elemente. Besonders in der Ausschreibungsphase werden Unterzüge häufig vereinfacht, wie in Abbildung 22 modelliert, was zu fehlenden statischen Beziehungen führen kann.

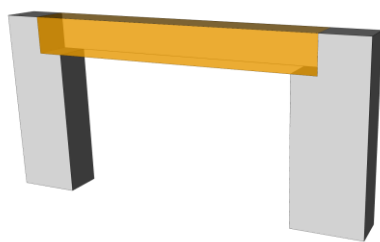


Abbildung 21 Realitätsgetreue Modellierung

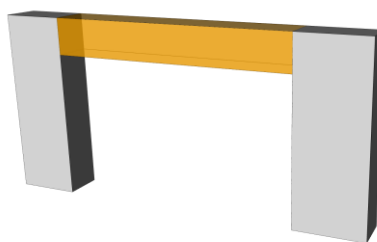


Abbildung 22 Vereinfachte Modellierung

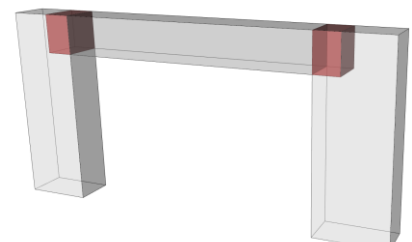


Abbildung 23 Kollisionsprüfung mit horizontaler Translation

Die Methode stellt sicher, dass auch solche Bauteile korrekt erfasst werden und keine scheinbar „schwebenden“ Elemente im Modell verbleiben. Durch diese Kollisionsprüfung lassen sich Vorgänger- und Nachfolgerbeziehungen zwischen den Bauteilen ableiten. Dabei entsteht eine gravitative Abhängigkeitsstruktur, die die statische Reihenfolge der Bauausführung berücksichtigt. Jedes Bauteil erhält ein individuelles Set an Vorgängern und Nachfolgern. Wird diese Logik auf das gesamte Modell angewendet, ergibt sich eine Darstellung der gravitativen Abhängigkeiten.

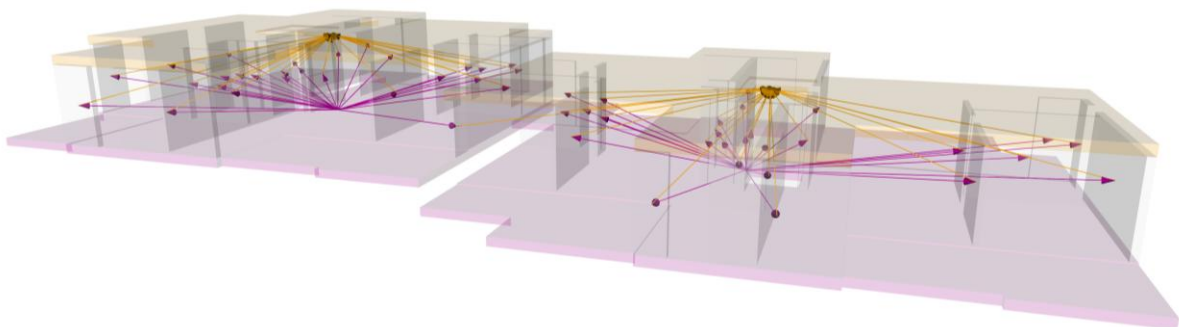


Abbildung 24 Gravitative Abhängigkeit durch Pfeile dargestellt

4.3.1.1.5 Mindestarbeitsfläche

Für die Ermittlung der Mindestarbeitsfläche wird ein vergleichbarer Ansatz verwendet wie bei der Bestimmung gravitativer Abhängigkeiten. Der erforderliche Mindestarbeitsplatz wird auf Grundlage der Thesis *Modelling of Spatial Constraints in BIM* von (Achermann & Ismael, 2021) ermittelt. Das daraus resultierende Ergebnis definiert die zusätzliche Erweiterung, die zur Boundingbox des jeweiligen Bauteils addiert werden muss, um den erforderlichen Mindestarbeitsplatz zu erzeugen. Das Offset erweitert diese Boundingbox in eine oder mehrere Richtungen, um den zusätzlichen Platzbedarf für Arbeitsvorgänge wie Montage oder Bearbeitung zu simulieren.

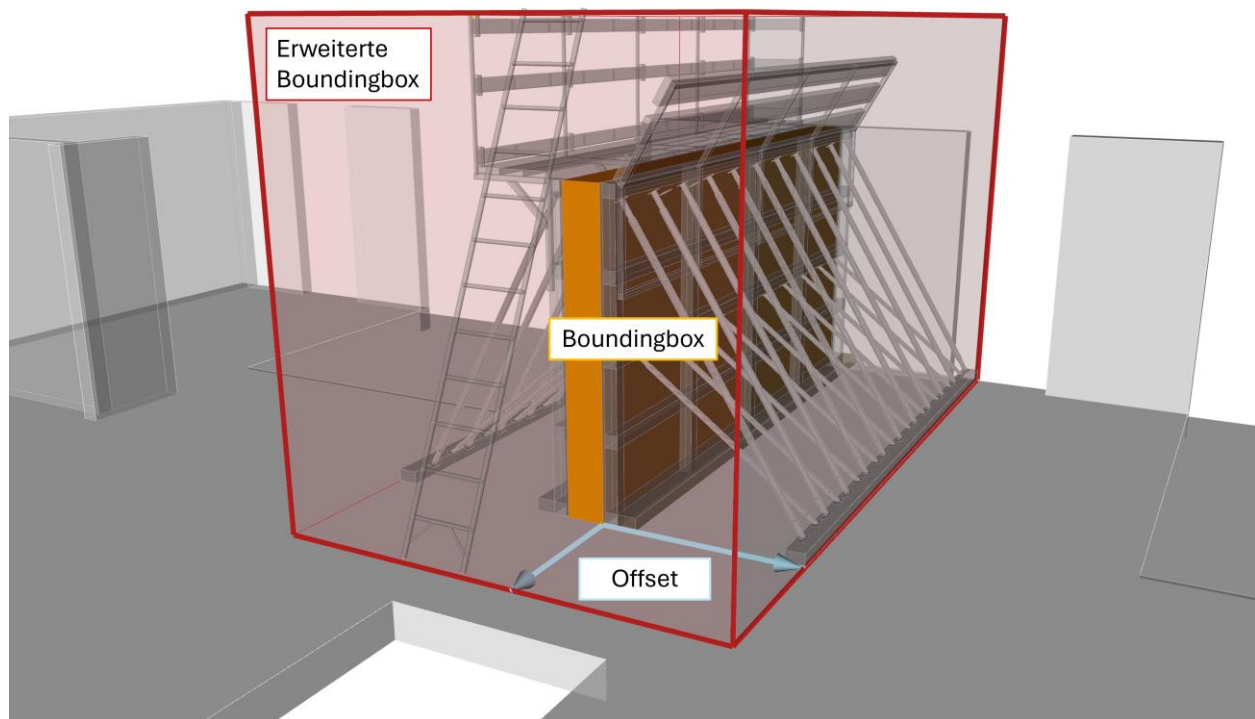


Abbildung 25 Darstellung des Mindestarbeitsplatzes mittels Boundingbox und Offset

Diese erweiterte Boundingbox wird anschliessend für die Kollisionsprüfung mit benachbarten Bauteilen und deren jeweiligen Offset-Boundingboxen verwendet. Wird dabei eine Überschneidung festgestellt, werden die betroffenen Nachbarelemente als blockierte Bauteile unter dem analysierten Bauteil gespeichert. Die Anzahl dieser blockierten Nachbarn ist ein entscheidender Parameter für die Erstellung des Bauablaufs. Bauteile mit hoher Blockierungsdichte können bevorzugt eingeplant werden, um räumliche Engpässe frühzeitig zu vermeiden und die Bauausführung effizient zu steuern.

4.3.2 Erfassung externer Datensätze

Die externen Datensätze umfassen sämtliche vordefinierten Grundlagedaten, die unabhängig vom digitalen Modell als Inputdaten benötigt werden. Je nach Datentyp werden diese Informationen entweder als CSV-Listen eingelesen oder direkt als Funktionen im System hinterlegt, wie beispielsweise die Berechnung der Mindestarbeitsfläche. Durch die vordefinierten Datensätze kann der manuelle Konfigurationsaufwand für einzelne Projekte reduziert werden.

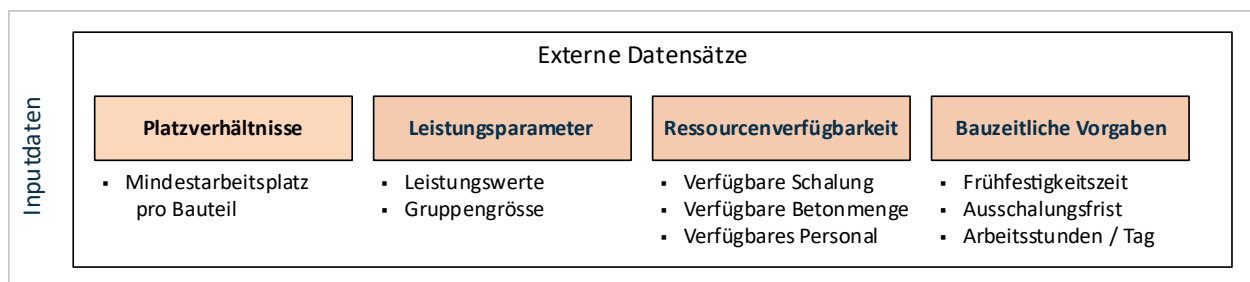


Abbildung 26 Externe Datensätze als Inputdaten

Die folgende Tabelle enthält eine Übersicht der im Programm hinterlegten externen Datensätze als Default-Werte.

Die Herleitung dieser Werte wird in den folgenden Kapiteln detailliert erläutert:

4.3.2.1 Platzverhältnisse	Mindestarbeitsplatz pro Bauteil	Tabelle 4
	Leistungswert pro Person	Tabelle 7
4.3.2.2 Leistungsparameter	Arbeitsaktivitäten pro Bauteil	Schalen, Bewehren, Betonieren, Ausschalung, Nachbehandlung
	Gruppengrösse pro Arbeitsaktivität	Tabelle 8
4.3.2.4 Ressourcenverfügbarkeit	Verfügbares Personal auf der Baustelle	1 Kran = 12 Personen
	Verfügbare vertikale Schalungsflächen	300 m ²
	Verfügbare horizontale Schalungsflächen	1200 m ²
	Maximale Betonliefermenge pro Tag	150 m ³
4.3.2.5 Bauzeitliche Vorgaben	Arbeitsstunden pro Tag	9 h
	Frühfestigkeitszeit	Decke: 1 Arbeitstag oder 9 h übrige: Ausschalfrist
	Ausschalungsfrist	Decken: 5 Arbeitstage Balken: 6 Arbeitstage übrige: 1 Arbeitstag oder 9h

4.3.2.1 Mindestarbeitsplatz

Grundlagewerte *Modelling of Spatial Constraints in BIM* von (Achermann & Ismael, 2021).

Tätigkeiten	Schalungselement	Arbeitsplatz
Wand	Seitlicher Platzbedarf	Seitlicher Platzbedarf
Schalarbeiten	$\tan(30^\circ) \cdot h \cdot 0.9 + 0.5 \text{ m}$	1.0 m
Bewehrungsarbeiten	$\tan(30^\circ) \cdot h \cdot 0.9 + 0.5 \text{ m}$	1.5 m
Betonierarbeiten	$\tan(30^\circ) \cdot h \cdot 0.9 + 0.5 \text{ m}$	1.5 m
Stütze	Allseitiger Platzbedarf	Allseitiger Platzbedarf
Schalarbeiten	3 m x 1 m	1.0 m
Bewehrungsarbeiten	3 m x 1 m	1.5 m
Betonierarbeiten	3 m x 1 m	2 m x 1 m
Decke	Platzbedarf	Platzbedarf
Schalarbeiten	Raum unter der Decke	Raum über der Decke
Bewehrungsarbeiten	Raum unter der Decke	Raum über der Decke
Betonierarbeiten	Raum unter der Decke	Raum über der Decke
Übrige Bauteile	Allseitiger Platzbedarf	Allseitiger Platzbedarf
Schalarbeiten	1 m	1 m
Bewehrungsarbeiten	1 m	1 m
Betonierarbeiten	1 m	1 m

Tabelle 4 Modifizierte Darstellung von der Tabelle 14, Modelling of Spatial Constraint in BIM (Achermann & Ismael, 2021)

4.3.2.2 Leistungswerte

Der Leistungswert beschreibt die Kapazität einer Arbeitstätigkeit für ein spezifisches Bauteil und bestimmt daraus die Dauer, die für deren Ausführung erforderlich ist. In der Baupraxis wird dieser Wert als Verhältnis zwischen der ausgeführten Mengenleistung und der eingesetzten Arbeitskraft berechnet. Grundlage der Berechnung sind die Einheit der Menge (z. B. m², m³, Stück) sowie die Anzahl der beteiligten Arbeitskräfte pro Zeiteinheit.

Diese Werte sind variabel und hängen von einer Vielzahl projektspezifischer Einflussfaktoren ab. Dazu zählen beispielsweise unter anderem die Erfahrung des eingesetzten Personals, die Schwenkgeschwindigkeit von Baukränen, die Platzverhältnisse auf der Baustelle oder die Materialzusammensetzung. Damit eine Annahme getroffen werden kann, stellt der SBV (Schweizerische Baumeister Verband, Standardanalysen) durchschnittliche Leistungswerte bereit, die nach Bauteilkategorien differenziert sind. Zur Validierung und Erhöhung der Aussagekraft wurden zusätzlich Projektleiter:innen und Bauführer:innen einbezogen, um ihre in der Ausführung erhobenen Ist-Daten mit den Leistungswerten des SBV zu vergleichen. Sofern die erfassten Projektdaten plausibel sind und keine signifikanten Abweichungen zu den SBV-Werten aufweisen, werden aus Datenschutzgründen die Daten des SBV für die Auswertungen verwendet.

4.3.2.2.1 Leistungswerte SBV

Die Leistungswerte des Schweizerischen Baumeisterverbands (SBV) sind nach Baustellengrösse unterteilt in Klein-, Mittelgross- und Grossbaustellen. Da die auszuwertenden Pilotprojekte in dieser Arbeit gemäss den Erläuterungen des SBV zu Mittelgrossen Baustellen gehören, werden die Daten aus dieser Kategorie verwendet. Der Fokus des Programms liegt auf Bauteilen aus Ortbeton, weshalb insbesondere die Angaben aus der NPK-Position 241-A19 *Ortbetonbau* von zentraler Bedeutung sind. Eine vollständige Liste aller verwendeten Leistungswerte befindet sich im *Anhang 3 Leistungswerte SBV*.

Ein Beispiel, wie der Leistungswert des SBV zu lesen ist, wird anhand der Abbildung 27 erläutert. Von links nach rechts stehen die Gruppengrösse (Grp. / Anzahl), die Gruppenleistung (GL) und der Leistungswert (LW) pro Einheit. Für die Leistungswerte wird nur der Abschnitt „Lohn“ betrachtet, in dem die Arbeitstätigkeiten bei der Betonage einer Decke aufgeführt sind.

241-A19 Ortbetonbau > 661.113 Plattendicke m 0,31 bis 0,40.



Kleinbaustellen			Mittelgrosse Baustellen				✓ Grossbaustellen			
	ME	GLC	ZA	Grp. / Anzahl	GL	LW / Menge	Basis	Kf	Total	
Lohn										
L01 732.700 Lohn Beton Decken/Brüst/Unterz	h	J		4.100	23.000	0.178	35.50	2.51	15.86	
L01 732.900 Lohn Beton Nebenarbeiten	h	N				0.060	35.50	2.51	5.34	
L01 732.901 Lohn Beton Nachbehandlung	h	N				0.032	35.50	2.51	2.85	
					Total Lohnstunden	0.270		Total	24.05	
Material										
M01 133.116 11 Kranbeton, NPK A, C20/25, 0/32 mm, XC1, XC2	m3					1.010	124.02	1.17	146.31	
M01 137.221 11 Betontransport mit Fahrmischer	m3					1.010	43.40	1.17	51.20	
M01 713.115 11 Sika Antisol-E 20, Betoncuring, 200 kg	kg					0.520	3.44	1.17	2.09	
								Total	199.60	
Inventar										
I01 182.332 00 Vibriernadel, -70 mm, HF-EM	h	J	BoM	1.000	23.000	0.043	1.35	1.21	0.07	
I01 186.122 00 Umformer, EM, -5.5 kVA	h	J	BoM	1.000	23.000	0.043	3.45	1.21	0.18	
I01 212.512 00 Turmkran, Laufkatze, -200 mt / 70 m, stationär	h	J	BoM	1.000	23.000	0.043	21.95	1.21	1.15	
I02 999.911 11 Diverses Betriebsmaterial	gl	N	EI			1.000	1.00	1.21	1.21	
								Total	2.61	
								Angebot	226.00	

Abbildung 27 Kennwerte für eine Decke nach SBV NPK 241.661.113

Arbeitstätigkeiten:

- L01 732.700 Lohn Beton Decken (= Betonieren einer Decke)
- L01 732.900 Lohn Beton Nebenarbeiten
- L01 732.901 Lohn Beton Nachbehandlung

GL – Gruppenleistung [m³/h]

- Menge Beton m³, die eine Gruppe in 1 h einbauen kann
- Bei einer Gruppengrösse von 4.1 Personen können in einer Stunde 23 m³ Beton eingebaut werden.
- Gruppengrösse 4.1 Personen bedeutet: 4 Personen führen die Arbeitstätigkeit aus, unterstützt durch einen Kranführer, der zu 10% seiner Zeit eingeplant ist.

LW – Leistungswert [h/m³]

- Anzahl Stunden, die eine Person benötigt, um 1 m³ Beton zu verbauen.
- Eine Person benötigt dafür 0.178 h um 1 m³ Beton zu verbauen.
- Nebenarbeiten 0.067 h, Nacharbeiten 0.043 h für 1 m³ Beton mit einer Person
- 0.27 h für das vollständige Einbauen von 1 m³ Beton mit einer Person

Die Umrechnung sieht folgendermassen aus:

Bezeichnung SBV	Grp./ Anzahl	GL		LW / Menge
Beschreibung	Gruppengrösse	Gruppenleistung mit 4.1 Personen	Leistungswert pro Gruppe	Leistung pro Arbeiter
Formel			$\frac{1}{GL}$	$\frac{1}{GL} \cdot \text{Gruppengrösse}$
Einheit	[Anzahl]	[m³/h]	[h/m³]	[h/ m³]
Betonierarbeiten	4.1	23.00	0.043	0.178
Nebenarbeiten				0.067
Nachbehandlung				0.043
Total Leistungswert				0.270

Tabelle 5 Umrechnung der Gruppenleistung zur Leistung pro Arbeiter

Das Programm verwendet als Basis den Leistungswert einer einzelnen Person. Da im Programm mit verschiedenen Gruppengrössen gerechnet wird, kann jede Gruppengrösse individuell auf Basis des Leistungswerts einer einzelnen Person eingesetzt werden.

Beispiel für die Betonierung von 24 m³ mit unterschiedlichen Gruppengrössen:

Arbeitstätigkeit	Betonieren 24 m³	Betonieren 24 m³	Betonieren 24 m³
Gruppengrösse	1 Person	2 Personen	3 Personen
Leistungswert pro Person [h/m³]	0.27	0.27	0.27
Umrechnungsformel $\left[\frac{LW}{\text{Anz. Pers.}} \right]$	$\frac{0.27 \left[\frac{h}{m^3} \right]}{1 \text{ Person}}$	$\frac{0.27 \left[\frac{h}{m^3} \right]}{2 \text{ Personen}}$	$\frac{0.27 \left[\frac{h}{m^3} \right]}{3 \text{ Personen}}$
Leistungswert pro Gruppe [h/m³]	0.27	0.135	0.09
Beton Menge [m³]	24	24	24
Umrechnungsformel $\left[\frac{LW}{\text{Anz. Pers.}} \cdot \text{Menge} \right]$	$\frac{0.27 \left[\frac{h}{m^3} \right]}{1} \cdot 24 [m^3]$	$\frac{0.27 \left[\frac{h}{m^3} \right]}{2} \cdot 24 [m^3]$	$\frac{0.27 \left[\frac{h}{m^3} \right]}{3} \cdot 24 [m^3]$
Betonier Zeit pro Gruppe [h]	6.5 h	3.24 h	2.16 h

Tabelle 6 Berechnung der Betonier Zeit für unterschiedliche Gruppengrössen

Durch diese Methode bleibt die Berechnung skalierbar und kann unabhängig von der tatsächlichen Gruppengrösse auf die gesamte Gruppe hochgerechnet werden. Die vollständige Liste mit den Umrechnungen befindet sich ebenfalls im *Anhang 3 Leistungswerte SBV*.

4.3.2.2.2 Angewendete Leistungswerte

Für die folgenden Bauteile werden Arbeitstätigkeiten mit einer spezifischen Abfolge hinterlegt, die jeweils mit einem zugeordneten Leistungswert versehen sind. Auf Grundlage dieser Werte, kombiniert mit der Gruppengrösse und der zu verarbeitenden Materialmenge, lässt sich die Bauzeit für jedes Bauteil berechnen.

Bauteil	NPK	Arbeitstätigkeit	Leistungswert
Fundamente	214.112	Schalung	0.767
	511.112	Bewehrung	0.001
	612.112	Betonierung	0.518
Bodenplatte	216.112	Schalung	0.750
	511.112	Bewehrung	0.001
	613.112	Betonierung + Nachbehandlung	0.531
Wand	231.103	Schalung	0.189
	511.112	Bewehrung	0.001
	631.132	Betonierung + Nachbehandlung	0.719
Stütze	241.122	Schalung	0.391
	511.112	Bewehrung	0.001
	641.131	Betonierung + Nachbehandlung	1.694
Decke	261.113	Schalung	0.156
	511.112	Bewehrung	0.001
	661.112	Betonierung + Nachbehandlung	0.452
Balken	245.113	Schalung	0.380
	511.112	Bewehrung	0.001
	645.112	Betonierung + Nachbehandlung	0.683

Tabelle 7 Angewendete Leistungswerte

4.3.2.3 Gruppengrössen

Die Gruppengrösse beschreibt die Anzahl der Arbeitskräfte, die für die Ausführung einer bestimmten Arbeitstätigkeit erforderlich sind. Sie beträgt mindestens zwei Personen, variiert jedoch abhängig von der Tätigkeit und dem jeweiligen Bauteil.

4.3.2.3.1 Gruppengrössen in der Praxis

Basierend auf Baustellenbefragungen werden für die Arbeitstätigkeiten Schalen, Bewehren und Betonieren typischerweise Gruppengrössen von zwei bis drei Personen genannt.

Eine detailliertere Unterteilung ergibt folgende Werte:

Bodenplatten	Schalen	2	Balken	Schalen	2
	Bewehren	2		Bewehren	2
	Betonieren	3		Betonieren	3
Wände	Schalen	2	Decken	Schalen	3
	Bewehren	2		Bewehren	3
	Betonieren	3		Betonieren	4
Stützen	Schalen	2			
	Bewehren	2			
	Betonieren	3			

Tabelle 8 Angewendete Gruppengrößen

Diese praxisbezogenen Werte dienen als Grundlage für die im Programm hinterlegten Default-Werte zur Ablaufplanung.

4.3.2.3.2 Optimale Gruppengrößen

Neben den praktischen Erfahrungswerten existieren auch optimale Gruppengrößen, die auf den Analysen im Fachbuch *Produktivität im Baubetrieb* von Christian Hofstadler basieren. Dort wurden Fachexperten befragt, welche Gruppengrößen aus ihrer Sicht die höchste Produktivität ermöglichen. Die Ergebnisse dieser Analyse lauten wie folgt:

Bodenplatten	Schalen	3	Balken	Schalen	3
	Bewehren	6		Bewehren	3
	Betonieren	4		Betonieren	3
Wände	Schalen	4	Decken	Schalen	5
	Bewehren	4		Bewehren	5
	Betonieren	3		Betonieren	4
Stützen	Schalen	2			
	Bewehren	2			
	Betonieren	3			

Tabelle 9 Optimierte Gruppengrößen für spezifische Arbeitstätigkeiten (Hofstadler, 2014)

Die aus eigenen Befragungen gewonnenen Gruppengrößen liegen in einem vergleichbaren Bereich zu den in der Fachliteratur angegebenen Werten. Um jedoch realistische Pufferzeiten und eine praxisnahe Ablaufplanung zu gewährleisten, werden im Programm die bewährten Erfahrungswerte aus der Baustellenpraxis als Grundlagedaten hinterlegt. Die optimalen Gruppengrößen werden dennoch im System integriert, um Vergleichsanalysen zu ermöglichen.

4.3.2.4 Ressourcenverfügbarkeit

Die Ressourcenverfügbarkeit beschreibt das auf der Baustelle vorhandene Personal, die Schalung und die Betonmenge. Über diese Parameter wird geprüft, ob ausreichend Ressourcen vorhanden sind, um ein Bauteil zum geplanten Zeitpunkt zu realisieren. Sie wirken direkt als Limitierung im Ablaufalgorithmus und beeinflussen, welche Bauteile priorisiert oder zeitlich verschoben werden müssen.

Folgende Limitierungsparameter sind im Programm hinterlegt:

- Verfügbare horizontale Schalungsmenge pro Baustelle [m²]
- Verfügbare vertikale Schalungsmenge pro Baustelle [m²]
- Anzahl verfügbares Personal auf der Baustelle [Personen]
- Verfügbare Betonliefermenge pro Tag [m³/Tag]

4.3.2.4.1 Verfügbarkeit Schalung

Die verfügbare Schalungsmenge auf einer Baustelle wird grundsätzlich durch die vorhandenen Lagerflächen begrenzt. In der praktischen Umsetzung spielt jedoch weniger die Lagerkapazität eine Rolle, sondern vielmehr eine wirtschaftliche Abwägung. Um unnötige Leerkosten (Kosten nicht eingesetzter Kapazitäten) zu vermeiden, wird die Schalungskapazität möglichst gering gehalten. Ziel ist es, eine möglichst hohe Produktivität zu erreichen, ohne überschüssige Ressourcen vorzuhalten, die nicht konstant genutzt werden können.

Für die Grundlagedaten im Programm werden praxisnahe Erfahrungswerte verwendet, die im Rahmen gezielter Befragungen erhoben wurden.

- Horizontale Schalungsflächen 1200 m²
- Vertikale Schalungsflächen 300 m²

4.3.2.4.2 Verfügbarkeit Personal

Die Anzahl der verfügbaren Arbeitskräfte auf einer Baustelle steht häufig in Zusammenhang mit der Anzahl eingesetzter Krane. Da die Krananzahl wiederum durch die Platzverhältnisse vor Ort begrenzt ist, ergibt sich daraus eine indirekte Limitierung der Personalressourcen. In der Praxis

wird in der Regel davon ausgegangen, dass ein Kran bis zu zwölf Personen gleichzeitig bedienen kann. Diese Annahme deckt sich mit den Angaben aus dem Fachbuch Produktivität im Baubetrieb von Christian Hofstadler.

Im Fachbuch werden für typische Hochbauprojekte in der Norm eine Gruppengrösse von zwölf Personen und eine maximale Gruppengrösse von fünfzehn Personen pro Kran angegeben (Hofstadler, 2014, pp. 120-124).

Für die Ablaufplanung im Programm muss die Anzahl der Krane bzw. die Gesamtanzahl des verfügbaren Personals auf der Baustelle manuell angegeben werden, da diese Information nicht direkt aus dem digitalen Modell entnommen wird. Als Default-Wert wird im Programm ein Kran angenommen, was einer verfügbaren Arbeitskapazität von zwölf Personen entspricht, und kann bei Bedarf projektspezifisch angepasst werden.

4.3.2.4.3 Verfügbarkeit Beton

Die auf der Baustelle verfügbare Betonmenge wird durch die maximal mögliche tägliche Liefermenge am Einbauort bestimmt. Je nach Standort und logistischen Gegebenheiten variiert die Menge an Beton, die pro Tag eingebaut werden kann. Befindet sich die Baustelle in einer stark frequentierten innerstädtischen Umgebung, kann aufgrund begrenzter Zufahrtsmöglichkeiten und verkehrsbedingter Einschränkungen lediglich rund 80 – 120 m³ Beton pro Tag angeliefert werden. Im Gegensatz dazu ermöglichen ausserstädtische Baustellen mit guter Erreichbarkeit eine deutlich höhere Tagesliefermenge von 150 – 200 m³. Wird die Versorgung durch eine vor Ort installierte Ortsbetonanlage sichergestellt, können je nach Anlagengrösse und Rohstoffverfügbarkeit zwischen 200 – 400 m³. (Hofstadler, 2007, p. 388) Aus Befragungen auf der Baustelle können in Ausnahmefällen sogar bis zu 1400 m³ Beton täglich eingebaut werden. Die Rohstoffe werden dabei in verkehrsarmen Randzeiten angeliefert.

Aus diesem Grund wird die Limitierung der Betonmenge nicht baustellenbezogen, sondern tagesbezogen angegeben. Für typische Bauprojekte wird in der Ausschreibungsphase daher häufig ein Richtwert von 150 m³ Beton pro Tag angenommen.

Diese Limitierungen werden bei der Terminberechnung berücksichtigt und beeinflussen direkt die Startzeitpunkte der einzelnen Bauteile. Wird eine der Kapazitätsgrenzen überschritten, verzögert sich die Ausführung entsprechend, bis die benötigten Ressourcen oder der Raum wieder verfügbar sind.

4.3.2.5 Bauzeitliche Vorgaben

Bauzeitliche Vorgaben sind Zeitspannen, die bei der Herstellung eines Bauteils einzuhalten sind und die Startzeit des darauffolgenden Bauteils beeinflussen. Zu den wesentlichen Vorgaben gehören die Frühfestigkeitszeit sowie die Ausschallfrist.

4.3.2.5.1 Frühfestigkeitszeit

Die Frühfestigkeitszeit beschreibt den Zeitrahmen, nach dem ein Bauteil ausreichend ausgehärtet ist, um betreten oder belastet werden zu können. In der Regel wird die notwendige Frühfestigkeitszeit nach etwa zwei Tagen erreicht. Unter bestimmten Bedingungen, wie mit äusserer Wärmezufuhr oder intensiver Hydratationswärme, kann dieser Zustand bereits nach wenigen Stunden eintreten (Stark & Wicht, 2013, pp. 90, 214).

In der praktischen Ausführung ist die Frühfestigkeit insbesondere bei Bauteilen wie Bodenplatten oder Decken von Bedeutung, da die Frühfestigkeitsdauer entscheidet, wann darauf unmittelbar die Schalung für das nächste Bauteil gestellt werden kann. Für den Bauablauf im Programm ist die Frühfestigkeitsdauer nur dann relevant, wenn im Anschluss ein direkter Nachfolger errichtet werden soll. In der Baupraxis gilt häufig die Faustregel, dass eine Decke bereits am Folgetag betreten werden darf. Um diese Praxis realistisch abzubilden, wird im Programm die abzuwartende Frist mit den täglichen 9 Arbeitsstunden definiert. Dadurch wird sichergestellt, dass auch eine morgens betonierte Decke frühestens am nächsten Arbeitstag freigegeben wird.

Frühfestigkeitszeit:

- Decke, Bodenplatten: 1 Arbeitstag oder 9 Stunden
- übrige Bauteile: entspricht der Ausschallungsfrist



Abbildung 28 Auswirkung der Frühfestigkeitszeit bei einer Decke mit einer Wand als direkter Nachfolger

4.3.2.5.2 Ausschallfrist

Die Ausschallfrist beschreibt den Zeitraum, in dem die Schalung am Bauteil verbleiben soll. Diese Dauer wird wesentlich beeinflusst durch die Zementfestigkeitsklasse, die Bauteilart sowie die Umgebungstemperaturen. Während die aktuelle Norm DIN 1045-3 keine konkreten Richtwerte für Ausschallfristen vorgibt, enthält die frühere Fassung DIN 1045:1988-07 praxisnahe Erfahrungswerte in Tagen, die sich nach Bauteiltyp und Zementklasse unterscheiden (DIN Deutsches Institut für Normung, 1988).

Festigkeitsklasse	Wände, Stützen	Decken	Balken
42,5 R; 52,5 N; 52,5 R	1	3	6
32,5 R; 42,5 N	2	5	10
32,5 N	3	8	20

Tabelle 10 Ausschallfrist eingeteilt nach Bauteilen und Zementklasse (DIN Deutsches Institut für Normung, 1988)

Diese Erfahrungswerte stimmen mit den Werten aus der Praxis überein, wie sie in Interviews mit Fachpersonen auf Baustellen bestätigt wurden. In der Ausschreibungsphase werden für Decken häufig 5 – 7 Arbeitstage und für Wände ein Tag als Richtwert für die Ausschallfrist angenommen. Für Decken wird in der Implementierung eine Ausschallfrist von fünf Arbeitstagen hinterlegt. Die Verwendung von Arbeitstagen berücksichtigt automatisch ein Wochenende innerhalb des Zeitraums, wodurch sich eine Zeitspanne von sieben Kalendertagen ergibt. Im Programm dient die Ausschallfrist als die limitierende Blockierungsdauer benachbarter Bauteile. Dadurch wird sichergestellt, dass Folgeelemente erst dann erstellt werden, wenn die Schalung des vorgelagerten Bauteils entfernt wurde und die Mindestarbeitsfläche wieder verfügbar ist.

Ausschalungsfristen:

- Decke, Bodenplatte: 5 Tage
- Wände, Stützen: 1 Arbeitstag oder 9 Stunden
- Balken: 8 Tage

4.4 Datenprozessierung

4.4.1 Bauzeit Bauteil

Auf Grundlage der erfassten Modellinformationen sowie der externen Datensätze kann nun die Bauzeit für jedes Bauteil berechnet und zusammengestellt werden. In der Abbildung 29 sind die dafür benötigten Inputdaten hervorgehoben.

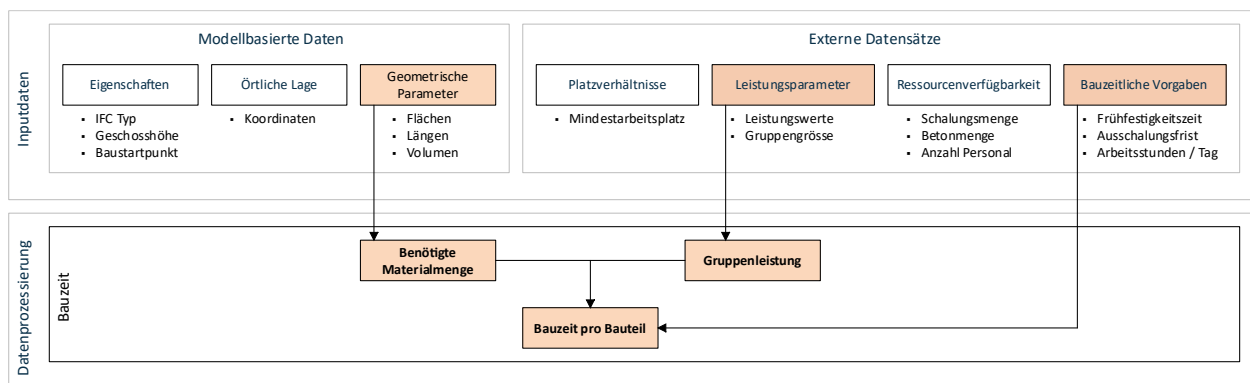


Abbildung 29 Datenprozessierung - Berechnung der Bauzeit eines Bauteils

Benötigte Inputdaten zur Berechnung der Bauzeit eines Bauteils:

- **Materialmengen:**
 - Schalung [m²]
 - Bewehrung [kg]
 - Beton in [m³]
- **Produktivitätskennwerte:**
 - Leistungswert pro Person [h/m³]
 - Gruppengröße [Anzahl Personen]
 - HLKSE Zeitfaktor [%]
- **Ausführungsparameter:**
 - Ausschalungsfrist [Tage]
 - Frühfestigkeitszeit [Stunden]

Wie sich die einzelnen Arbeitstätigkeiten, die aus dem Modell abgeleiteten Materialmengen und die Gruppengrösse auf die benötigte Bauzeit auswirken, wird in Abbildung 30 veranschaulicht. Die Tätigkeiten mit den zugehörigen Leistungswerten definieren die erforderlichen Arbeitsstunden des eingesetzten Personals. In Kombination mit den bauzeitlichen Vorgaben ergibt sich daraus die Gesamtbauzeit für das jeweilige Bauteil.

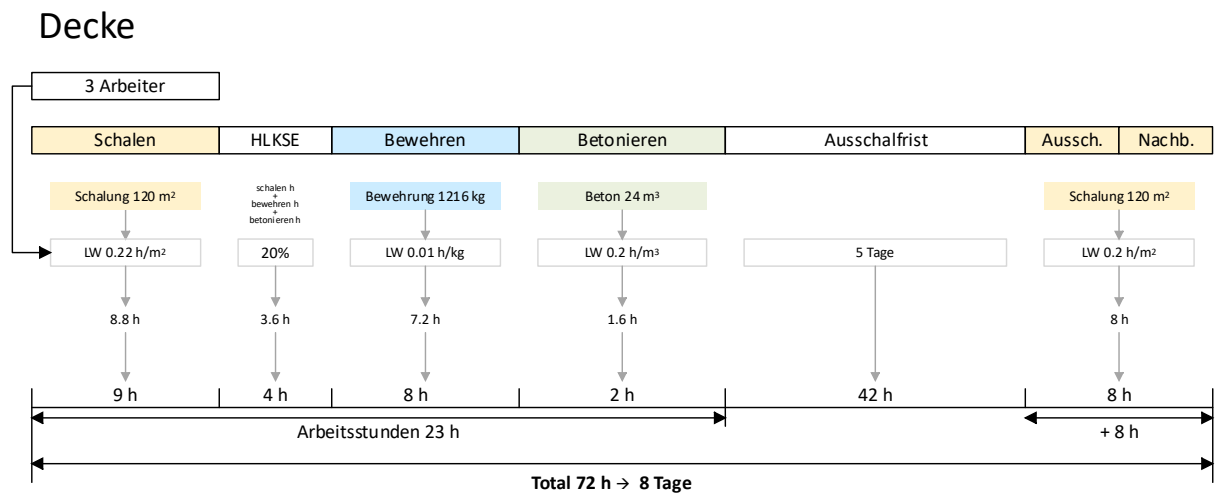


Abbildung 30 Zusammenstellung der Bauzeit durch die Arbeitstätigkeiten und bauzeitlichen Vorgaben

$$\text{Berechnung der benötigten Dauer} = \frac{\text{Leistungswert pro Person} \left[\frac{\text{h}}{\text{m}^2} \right]}{\text{Gruppengrösse [Personen]}} \cdot \text{Materialmenge [Einheit]}$$

$$\text{Beispiel benötigter Schalungsdauer} = \frac{0.22}{3} \cdot 120 \text{ m}^2 = 8.8 \text{ h}$$

HLKSE als Faktoren

Die Bauzeitanteile der HLKSE-Arbeiten (Heizung, Lüftung, Klima, Sanitär, Elektro) werden im Programm lediglich als prozentualer Zuschlag zur jeweiligen Bauteilzeit angenommen. Da zu den Arbeiten keine Leistungswerte hinterlegt sind, werden als Default-Wert 20% angenommen.

$$\text{Berechnete HLKSE Dauer} = \text{Dauer (Schalung + Bewehrung + Betonierung)} \cdot \text{HLKSE Faktor}$$

$$\text{Beispiel HLKSE Dauer} = (8.8 \text{ h} + 7.2 \text{ h} + 1.6 \text{ h}) \cdot 20\% = 3.6 \text{ h}$$

Einsatzblöcke

Für jedes verwendete Bauteil werden die gleichen standardisierten Prozesse Schalung, Bewehrung, Betonierung, Ausschalung und Nachbehandlung angewendet. Zur Vereinfachung der Datenverarbeitung werden Tätigkeiten im Zusammenhang mit dem Personal als ein Arbeitsblock zusammengefasst, während der Einsatz der Schalung inklusive der Ausschallfrist als separater Block definiert wird. Die Blöcke definieren, wie lange das Personal oder die Schalung durch ein Bauteil gebunden sind.

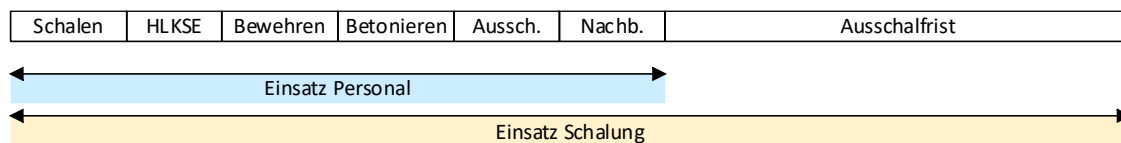


Abbildung 31 Einsatzblöcke von Personal und Schalung

4.4.1.1 Puffer

Die zuvor berechneten Bauzeiten basieren auf sogenannten scharfen Werten, das heisst ohne Berücksichtigung zeitlicher Puffer. In der Baupraxis wird jedoch häufig eine Toleranz von 5 bis 10% angesetzt. In sicherheitsorientierten Planungen kann dieser Wert auch bis zu 15% betragen. Diese Puffer dienen dazu, unvorhergesehene Verzögerungen wie Produktivitätsverluste oder Baustörungen einzuplanen. (Hofstadler, 2022, p. 115)

Für die Programmumsetzung werden zunächst nur Produktivitätsverluste berücksichtigt, die sich erfassen und quantifizieren lassen. Dazu zählen beispielsweise Produktivitätsverluste durch hohe Temperaturen oder Lichtverhältnisse auf der Baustelle. Unregelmässige Baustörungen hingegen bleiben unberücksichtigt, da sie stark von externen, nicht quantifizierbaren Faktoren abhängen und keine konsistente Datenbasis bieten.

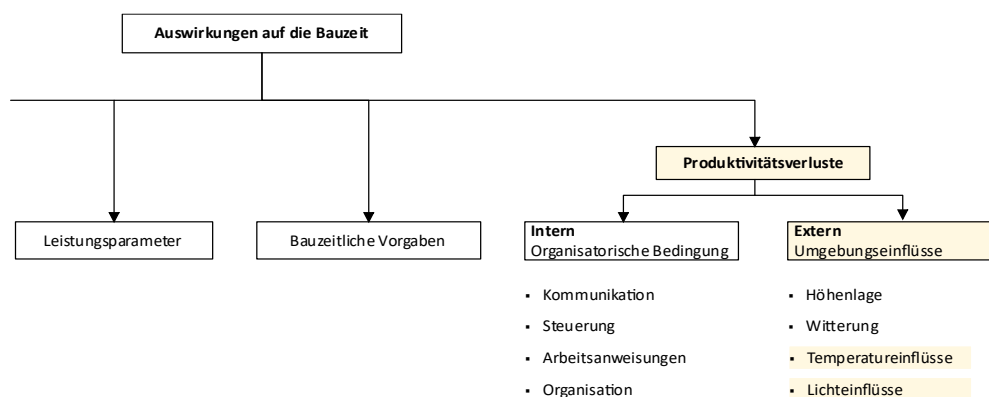


Abbildung 32 Produktivitätsverluste durch Umgebungseinflüsse

Solche Produktivitätsverluste können als prozentuale Faktoren direkt auf die Arbeitsstunden einzelner Bauteile angewendet werden, wie in Abbildung 33 dargestellt. Wie ein solcher Produktivitätsverlust ermittelt werden kann, wird im nächsten Abschnitt erläutert.

Decke

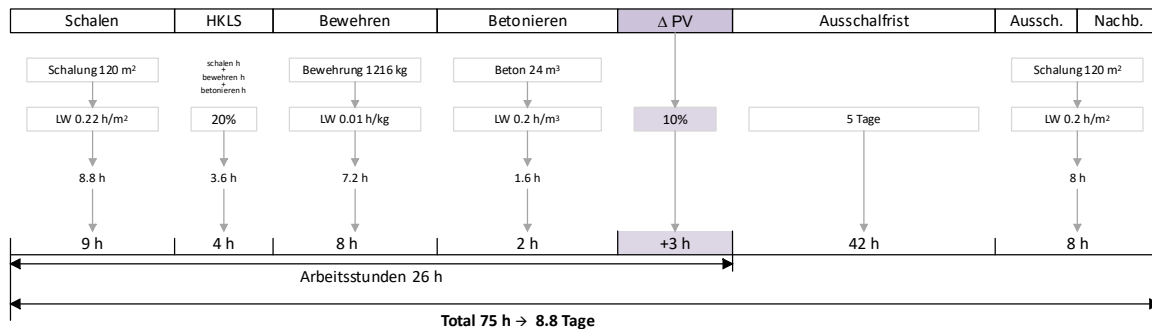


Abbildung 33 Produktivitätsverlust ΔPV als Faktor auf die Arbeitsstunden

4.4.1.1.1 Produktivitätsverluste

Je weniger Informationen zur Verfügung stehen, desto grösser ist das Risiko von Abweichungen und desto schwieriger gestaltet sich die Einschätzung, ob ein Terminplan realisierbar ist. Im Ausführungsprojekt fallen solche Abweichungen in der Regel geringer aus, da bereits eine Vielzahl relevanter Informationen vorliegt, die den tatsächlichen Gegebenheiten auf der Baustelle entsprechen.

Gerade deswegen muss mit Differenzen gegenüber den realen Ausführungsdaten gerechnet werden, da nicht alle relevanten Einflussgrössen im Modell oder im Programm vollständig erfasst werden können. In diesem Kapitel wird eine nicht abschliessende Übersicht möglicher Produktivitätsverluste dargestellt. Sie soll den Anwenderinnen eine erste Orientierung bieten, um potenzielle Abweichungen besser einschätzen zu können.

Beispiele möglicher Produktivitätsverluste:

Betriebsbedingt

Arbeitsgruppengrösse
Tägliche Arbeitszeit

Witterungsbedingt

Lichtverhältnisse
Temperatur
Saisonabhängigkeit

Bauverfahrensbedingt

Krankapazität
Mindestarbeitsfläche
Komplexität der Bauelemente

Zur Veranschaulichung des witterungsbedingten Einflusses auf die Bauproduktivität werden exemplarisch die Tage vom 8. Februar und 21. März für einen Städtebau in Bern herangezogen. Der 21. März markiert gemäss Bauverordnung die Tag- und Nachtgleiche und stellt somit einen witterungstechnisch neutralen Referenzpunkt dar. Der 8. Februar hingegen repräsentiert einen typischen Wintertag mit eingeschränkten Lichtverhältnissen (BauG (Baugesetz des Kantons Bern), 2024).

Damit witterungsbedingte Einflüsse auf die Bauproduktivität bewertet werden können, werden auf meteorologische Daten der MeteoSchweiz zurückgegriffen. Diese Daten basieren auf Messreihen der vergangenen 30 Jahre und werden als sogenannte Normwerte bezeichnet. Aufgrund ihrer langfristigen Erhebung eignen sie sich auch als Planungsgrundlage für die Planung zukünftiger Witterungsverhältnisse. Die Normwerte sind auf einzelne Ortschaften innerhalb der Schweiz spezifiziert und liefern monatliche Durchschnittswerte zu klimatischen Parametern wie Bodentemperatur, Lufttemperatur und täglichen Sonnenstunden.

4.4.1.1.1 Produktivitätsverlust durch Temperatur

Gemäss den Ausführungen im *Kapitel 7.2 Einfluss der Witterung auf die Produktivität* von Christian Hofstadler (2022, p. 179) liegt die optimale Temperatur für Stahlbetonarbeiten im Bereich zwischen 16 – 18 °C. Jede Abweichung von diesem Temperaturbereich, sei es durch steigende oder fallende Temperaturen, führt zu einem Verlust der Arbeitsproduktivität.

Die durchschnittliche Tagestemperatur für Februar und März in Bern wird von der Datenbank der Klimanormwerte von MeteoSchweiz entnommen mit dem Mittelwert aus den Jahren 1991-2020 (MeteoSchweiz, 2024). Eine Übersicht der verwendeten Werte sind im *Anhang 9* und *Anhang 10 Klimanormwerte MeteoSchweiz* dokumentiert.

Durchschnittliche Tagestemperatur Februar = 1.1°

Durchschnittliche Tagestemperatur März = 5.2°

Der Produktivitätsverlust berechnet sich gemäss der Formel (Hofstadler, 2014, pp. 445, (15-28))

$$\Delta PV_{TMP} = -0.000021 \cdot TMP^4 + 0.001622 \cdot TMP^3 + 0.018320 \cdot TMP^2 - 1.531866 \cdot TMP + 14.727522$$

Produktivitätsverlust Februar $\Delta PV_{1.1^\circ} = 13.1 \%$

Produktivitätsverlust März $\Delta PV_{5.2^\circ} = 7.5 \%$

4.4.1.1.2 Produktivitätsverlust durch Lichtverhältnisse

Nach der Literatur *Produktivität im Baubetrieb* von (Hofstadler, 2014, p. 445) werden die Lichtverhältnisse (LV) in folgende Kategorien eingeteilt:

LV = 0 → sehr gut	(Tageslicht)
LV = 1 → gut	(Stark bewölkt)
LV = 2 → befriedigend	(Dämmerung)
LV = 3 → mässig	(Nacht-A)
LV = 4 → schlecht	(Nacht-B)
LV = 5 → sehr schlecht	(Nacht-C)

Zur Abschätzung, in welche Kategorie die gewählten Tage fallen, werden die Normwerte der MeteoSchweiz-Datenbank zur Anzahl Sonnenstunden herangezogen. (MeteoSchweiz, 2024) Die Sonnenstunden betragen im Februar durchschnittlich 94 Stunden und im März 151 Stunden. Im Vergleich zum Juli, dem Monat mit den höchsten Sonnenstunden von 245 Stunden. Unter Berücksichtigung der zulässigen Beschattungsdauer gemäss Art. 22, Abs. 3 des BauG, welche für den März mit 2 Stunden und für den Februar mit 2.5 Stunden festgelegt ist, kann davon ausgegangen werden, dass bei einer Baustelle im städtischen Bereich täglich 2 bis 2.5 Sonnenstunden durch umliegende Bebauung abgeschattet werden.

Aus diesen Werten lässt sich Folgendes berechnen:

Monat	Sonnenstunden im Monat	Sonnenstunden pro Tag	Sonnenstunden pro Tag mit Beschattungsdauer
Februar	94 h	3.5 h	1 h
März	151 h	5 h	3 h

Tabelle 11 Sonnenstunden für die Monate Februar und März gemäss der Meteo Schweiz Datenbank

Auf Grundlage dieser Werte wird angenommen, dass Februar der Kategorie **LV = 3** (mässige Lichtverhältnisse) und März der Kategorie **LV = 1** (gute Lichtverhältnisse) zugeordnet werden können.

Der Produktivitätsverlust berechnet sich gemäss der Formel (Hofstadler, 2014, pp. 445, (15-39))

$$\Delta PV_{LV} = 0.002733 \cdot LV^4 - 0.168053 \cdot LV^3 + 1.854289 \cdot LV^2 - 0.509041 \cdot LV + 0.000848$$

Produktivitätsverlust Februar $\Delta PV_3 = 10.8 \%$

Produktivitätsverlust März $\Delta PV_1 = 1.2 \%$

4.4.1.1.3 Produktivitätsverlust durch Lichtverhältnisse und Temperatur

Der gesamte Produktivitätsverlust durch Licht- und Temperaturschwankungen beträgt:

Total Februar $\Delta PV_{\text{Feb}} = 23.9 \%$

Total März $\Delta PV_{\text{Mär}} = 8.7 \%$

Der gesamte Produktivitätsverlust, der ausschliesslich durch Lichtverhältnisse und Temperaturschwankungen verursacht wird, beträgt im Februar 23.9% und im März 8.7%. Ein pauschaler Puffer von 10% über das gesamte Jahr ist daher nicht in jedem Fall ausreichend. Hinzu kommen im Februar zusätzliche Verzögerungen durch die verlangsamte Festigkeitsentwicklung des Betons infolge niedriger Temperaturen. Für eine präzisere Abschätzung der Puffer können die verschiedenen Produktivitätsverluste getrennt und auf monatlicher Basis ausgewertet werden.

4.4.1.1.4 Produktivitätsverluste über das gesamte Jahr

Monate	C°	PV [%]	Monate	LV	PV [%]
Januar	0.2	14.4	Januar	3.0	10.8
Februar	1.1	13.1	Februar	3.0	10.8
März	5.2	7.5	März	2.0	5.1
April	9.0	3.5	April	2.0	5.1
Mai	13.2	0.8	Mai	1.0	1.2
Juni	16.9	0.2	Juni	0.0	0.0
Juli	18.8	0.6	Juli	0.0	0.0
August	18.4	0.4	August	0.0	0.0
September	14.1	0.5	September	1.0	1.2
Oktober	9.5	3.0	Oktober	1.0	1.2
November	4.2	8.7	November	2.0	5.1
Dezember	0.9	13.4	Dezember	3.0	10.8
Mittelwert		5.5 %	Mittelwert		4.3 %

Tabelle 12 Produktivitätsverlust von Temperatur und Lichtverhältnissen über das gesamte Jahr

Unter Anwendung der gleichen Berechnungsformeln wurden die Produktivitätsverluste durch Lichtverhältnisse und Temperaturschwankungen über das gesamte Kalenderjahr ermittelt. Der Mittelwert der temperaturbedingten Verluste liegt bei 5.5 %, während die Einflüsse durch Lichtverhältnisse durchschnittlich 4.3 % betragen. Daraus ergibt sich ein gesamter durchschnittlicher Produktivitätsverlust von 9.8 % pro Jahr, was sich mit den befragten Erfahrungswerten der 10% Puffer deckt.

Die Puffer könnten präziser berechnet werden, indem zusätzliche Informationen wie Standort und Baustart in das Programm integriert und die Auswertungen für einzelne Monate vorgenommen werden. Zukünftig kann diese Funktionalität als Erweiterung implementiert werden, um weitere Abweichungen zu erfassen und Puffer gezielter einzusetzen. Der prozentuale Zuschlag als Faktor kann flexibel für jegliche Produktivitätsverluste oder Puffer verwendet werden.

Auf Basis der beschriebenen Grundlagen kann nun die Ausführungsreihenfolge der Bauteile bestimmt werden.

4.5 Entscheidungsnetzwerk

Das Entscheidungsmodell bildet das Herzstück der automatisierten Ablaufplanung. Es prüft die Ausführbarkeit von Bauteilen anhand definierter Bedingungen und legt die Reihenfolge der Bauteile auf Basis von Prioritäten fest. Die Herausforderung der automatisierten Entscheidungsfindung liegt in der Abbildung menschlicher Intuition durch algorithmische Logik. Während erfahrene Bauleiter Entscheidungen häufig aufgrund intuitiver Einschätzung und Erfahrungswerte treffen, muss ein Programm auf explizit definierte Regeln und Datenstrukturen zurückgreifen.

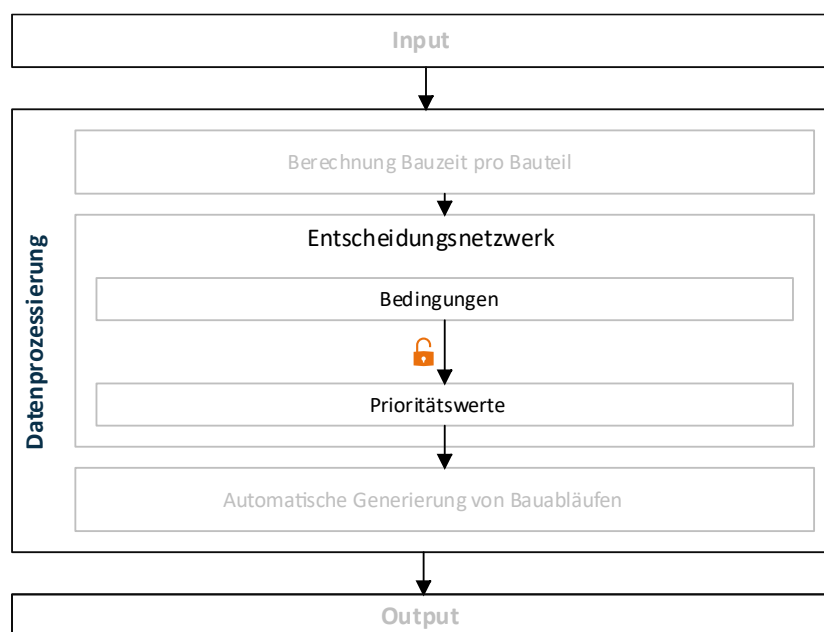


Abbildung 34 Datenprozessierung mit dem Entscheidungsnetzwerk

4.5.1 Netzwerk

Für die Erstellung eines Bauablaufs wird ein Datenmodell benötigt, das in der Lage ist, die Abhängigkeiten zwischen Bauteilen zu speichern, Bedingungen zu prüfen und eine logische Reihenfolge der Ausführung abzubilden. In der Programmierung werden diese Modelle als Graphen oder Netzwerke bezeichnet (Wei, et al., 2012).

Die in diesem Fall verwendete Modellform wird Entscheidungsnetzwerk genannt. Es speichert nicht nur die Eigenschaften einzelner Bauteile, sondern bildet auch deren Abhängigkeiten ab und legt die Reihenfolge der Ausführung fest. Zu diesen Bedingungen zählen unter anderem die Verfügbarkeit von Ressourcen wie Schalung, Personal oder Betonliefermenge, gravitative und räumliche Abhängigkeiten sowie die Einhaltung von Mindestarbeitsflächen.

Die Wahl dieses Netzwerkmodells erfolgte mit Hinblick auf zukünftige Erweiterungen. Ziel ist es, Optimierungsberechnungen zu ermöglichen, beispielsweise zur Ermittlung des schnellsten Bauablaufs oder zur Identifikation der kostengünstigsten Variante. Solche Berechnungen lassen sich besonders effizient über Netzwerkgraphen durchführen (Irnich & Desaulniers, 2005).

Bevor ein Entscheidungsnetzwerk modelliert werden kann, ist es notwendig, die grundlegenden Eigenschaften eines Netzwerks in Bezug auf die Graphentheorie zu definieren.

4.5.1.1 Kanten und Knoten

Netzwerke bestehen aus Knoten (Elemente) und Kanten (Verbindungen, Abhängigkeiten), wobei die Knoten in diesem Kontext einzelne Bauteile darstellen. Zwischen den Knoten bestehen Verbindungen, die Kanten genannt werden und eine eindeutige Richtung aufweisen. Diese Kanten zeigen einen möglichen Fortschrittspfad innerhalb des Bauprozesses auf. Die gerichtete Verbindung legt fest, welches Bauteil in Abhängigkeit von einem anderen ausgeführt werden kann.

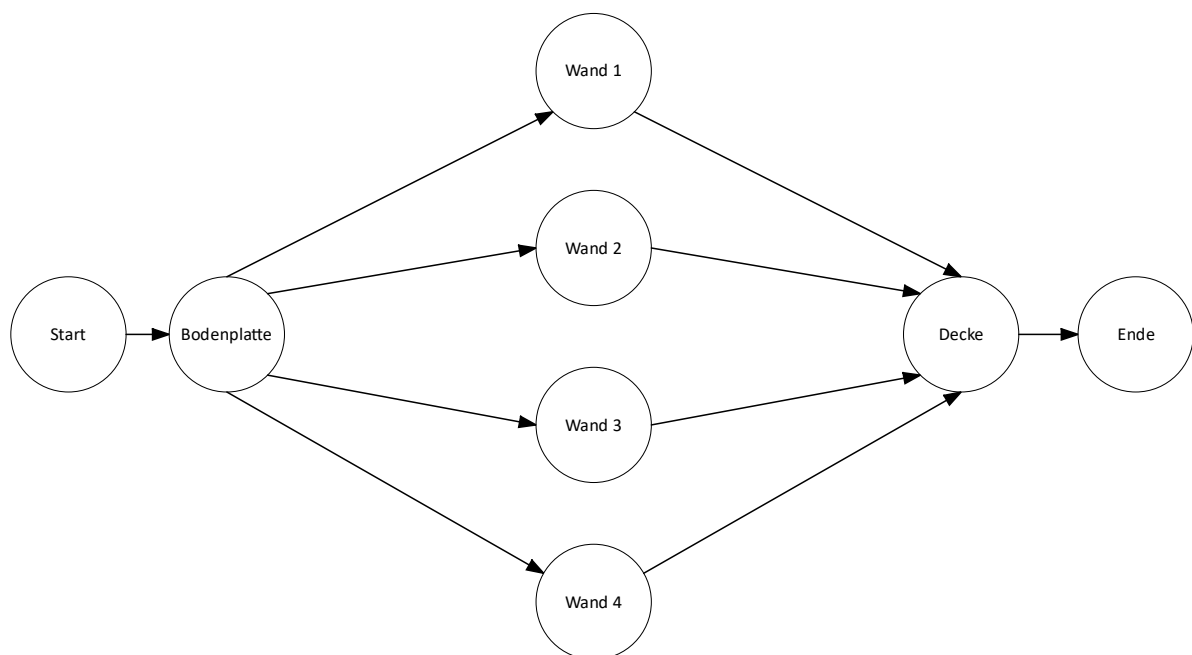


Abbildung 35 Netzwerk mit Knoten und Kanten in Zusammenhang von Bauteilen

In der dargestellten Netzstruktur gehen vom Knoten Bodenplatte vier gerichtete Kanten aus, was bedeutet, dass die Bodenplatte vier Nachfolger-Bauteile besitzt. Umgekehrt lässt sich anhand der eingehenden Kanten eines Bauteils erkennen, wie viele Vorgänger bzw. erforderliche Bauteile vorhanden sind, die vor dessen Ausführung abgeschlossen sein müssen. In einem Entscheidungsnetzwerk lassen sich so für jedes einzelne Bauteil die Vorgänger- und die Nachfolgerbeziehungen erfassen und abspeichern.

In der Graphentheorie wird ein Netzwerk ohne Kreisbildungen als gerichteter azyklischer Graph (DAG) bezeichnet. Das bedeutet, dass die Verbindungen zwischen den Knoten, den Kanten, eine feste Richtung haben und keine Rückverbindungen zu bereits besuchten Knoten existieren. Dies ist besonders wichtig für Bauablaufmodelle und stellt sicher, dass keine Schleifen entstehen, da ein Bauteil nicht gleichzeitig Vorgänger und Nachfolger eines anderen Bauteils sein kann (Diestel, 2010, pp. 124-126).

4.5.1.2 Gewichtete Knoten

Jeder Knoten enthält spezifische Informationen zum Bauteil, darunter die benötigte Betonmenge, Schalungsmenge oder die räumliche Distanz. Diese Werte definieren zugleich die Gewichtung der eingehenden Kanten bzw. die Anforderungen für die Querung des Pfades zum nächsten Bauteil.

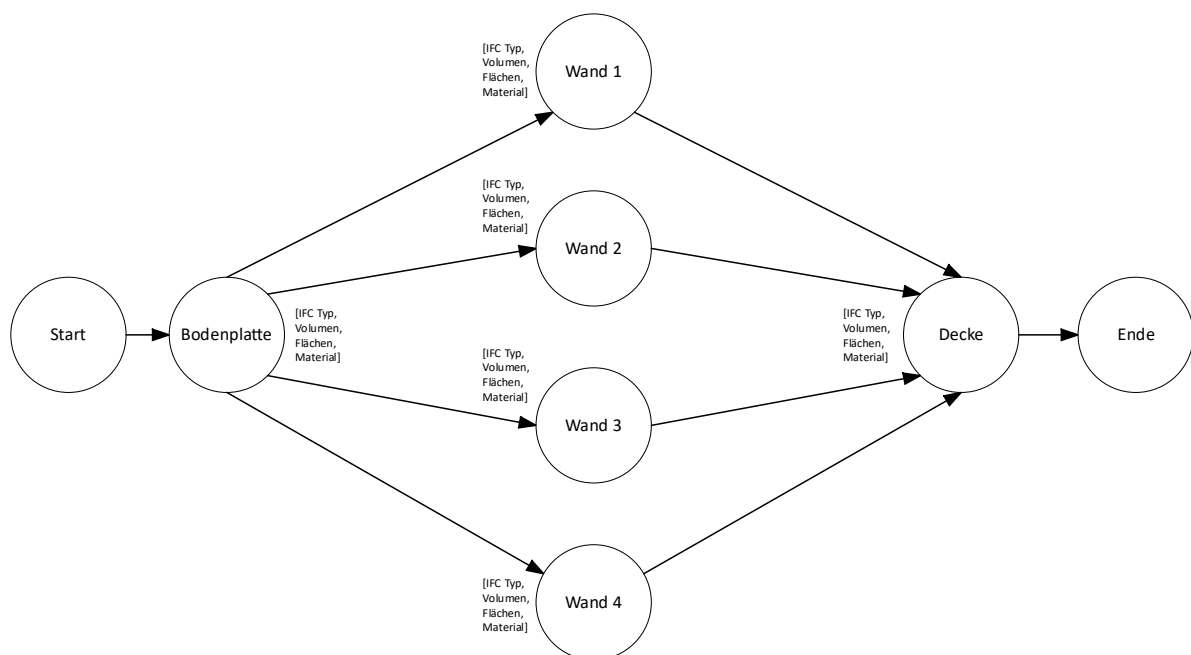


Abbildung 36 Netzwerk mit gewichteten Knoten

4.5.1.3 Gewichtete Kanten

Die Verwendung gewichteter, gerichteter azyklischer Graphen erweitert das Netzwerk mit entscheidungsrelevanten Informationen. Dabei enthalten die Kanten zusätzliche Informationen, etwa wie viele Ressourcen (Beton, Schalung, Personal, Zeit) benötigt werden, um vom aktuellen Bauteil zum nächsten zu gelangen, oder wie weit zwei Bauteile räumlich voneinander entfernt sind.

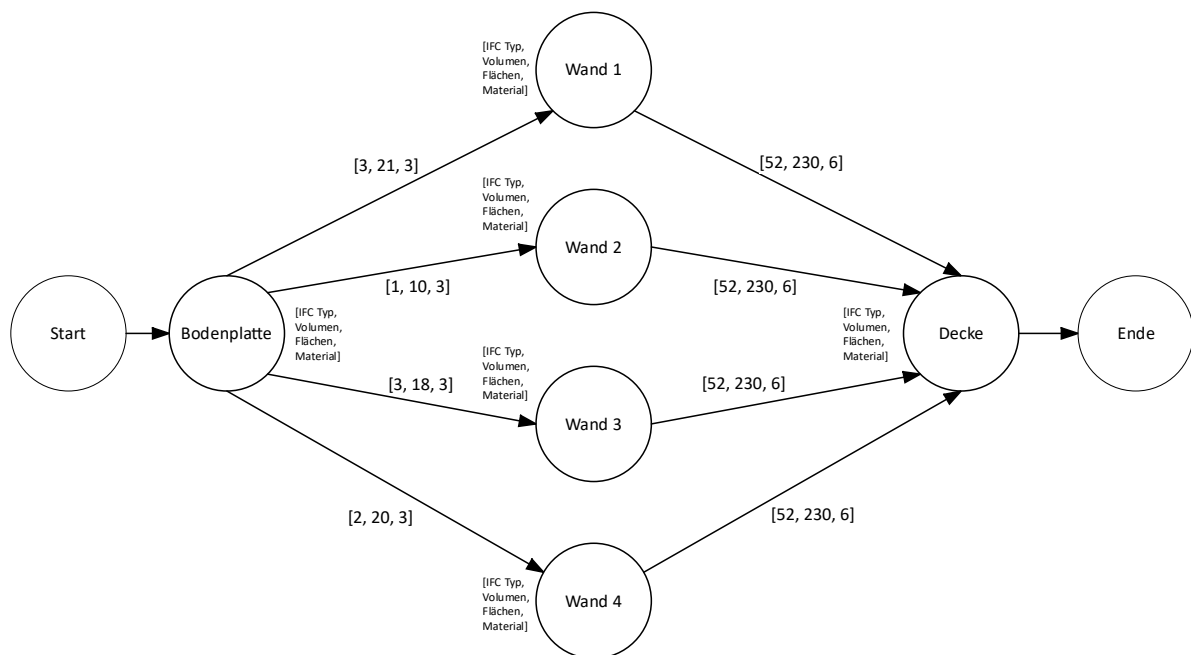


Abbildung 37 Netzwerk mit gewichteten Kanten

Die gewichteten Kanten können somit Bedingungen enthalten, die erfüllt sein müssen, damit ein Übergang zum nächsten Knoten möglich ist.

4.5.2 Bedingungen

Die Bedingungen im Programm dienen als Steuerungsmechanismen für die Ablaufplanung. Sie prüfen, ob alle erforderlichen Voraussetzungen erfüllt sind, bevor ein Bauteil ausgeführt wird. Dazu zählen die Verfügbarkeit von Ressourcen wie Material und Personal, die Einhaltung des Mindestarbeitsplatzes sowie die gravitativen Abhängigkeiten zwischen den Bauteilen.

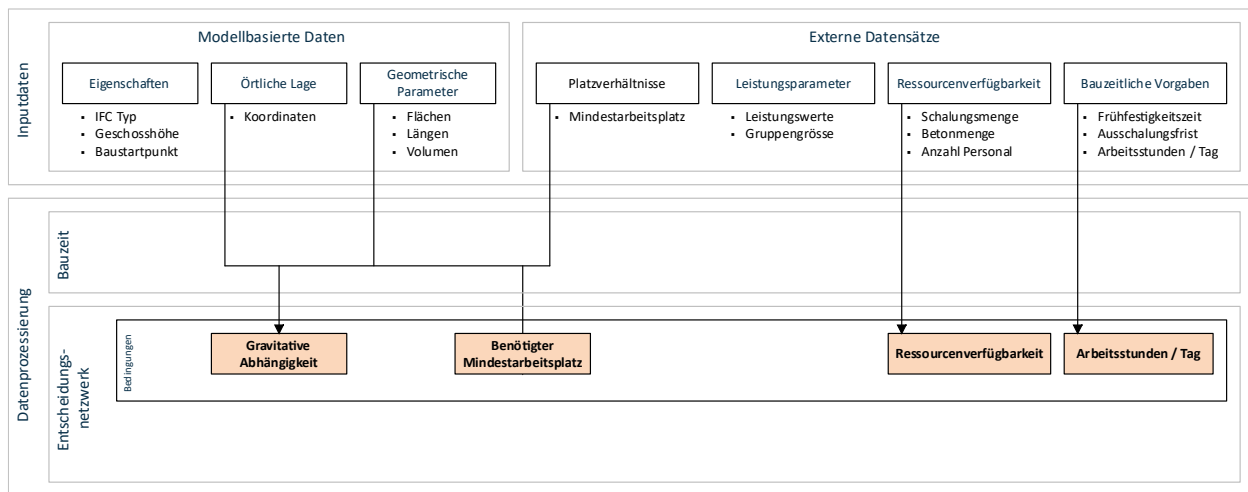


Abbildung 38 Bedingungen im Entscheidungsnetzwerk

Die Bedingungen werden im Entscheidungsnetzwerk entlang der Pfade überprüft. Ein Pfad kann erst freigeschaltet und durchlaufen werden, wenn alle Bedingungen erfüllt sind. Sind die Voraussetzungen nicht gegeben, bleibt der Pfad versperrt. Diese Logik stellt sicher, dass keine Arbeitsschritte geplant werden, die die verfügbaren Kapazitäten überschreiten.

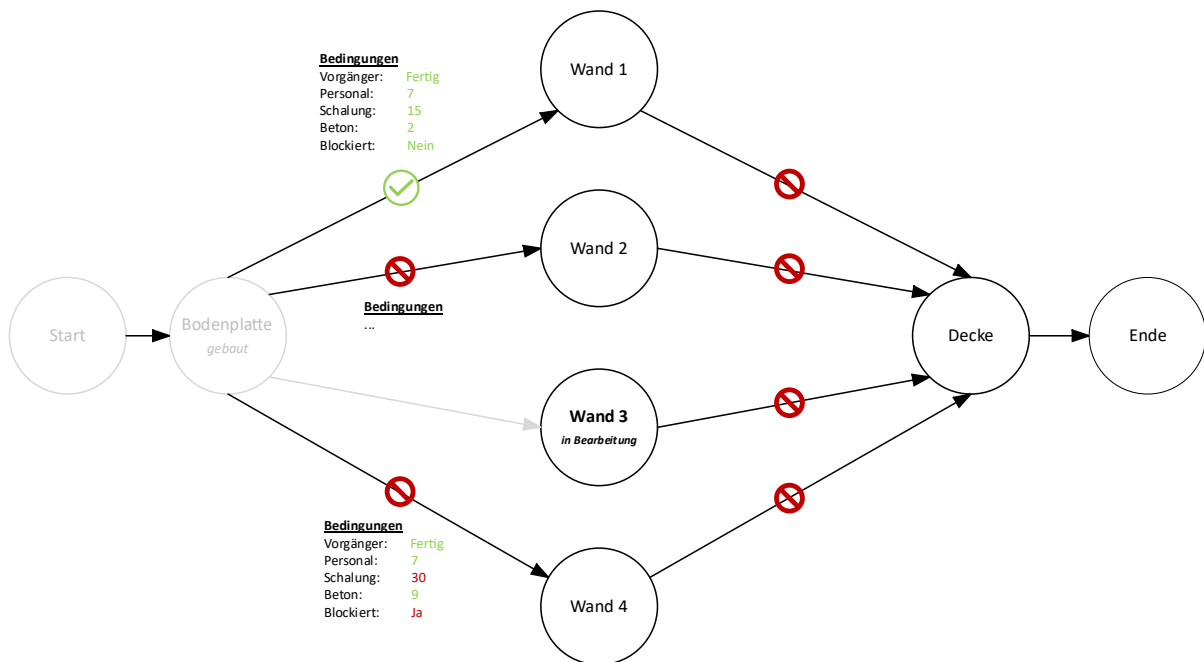


Abbildung 39 Netzwerk mit einer erfüllten Bedingung

Grundsätzlich lassen sich zwei Arten von Bedingungen unterscheiden: eine statische, verbindliche Bedingung, die nach einmaliger Freischaltung dauerhaft gültig ist, und eine dynamische, verfügbarkeitsabhängige Bedingung, die sich je nach Baufortschritt verändert.

Statische Bedingung	Dynamische Bedingung
Vorgänger fertiggestellt	Blockiert durch fehlenden Mindestarbeitsplatz Vorhandene Schalungsmenge Vorhandenes Personal Vorhandene Betonmenge Geschosshöhe überschritten

Bei jedem Baufortschritt werden sämtliche Bedingungen überprüft, um festzustellen, ob eine nachfolgende Kante aktiviert werden kann.

Im Netzwerk werden nicht nur Bauteile miteinander verknüpft, die in einer klassischen Vorgänger-Nachfolger-Beziehung stehen. Stattdessen wird jedes Bauteil mit allen anderen Bauteilen verknüpft, die als Nächstes gebaut werden könnten. Dazu gehören auch Verbindungen zwischen Elementen ohne unmittelbare Abhängigkeit, wie zum Beispiel eine Wand in einer anderen Bauetappe oder eine Decke, die nicht direkt nach der Bodenplatte folgt.

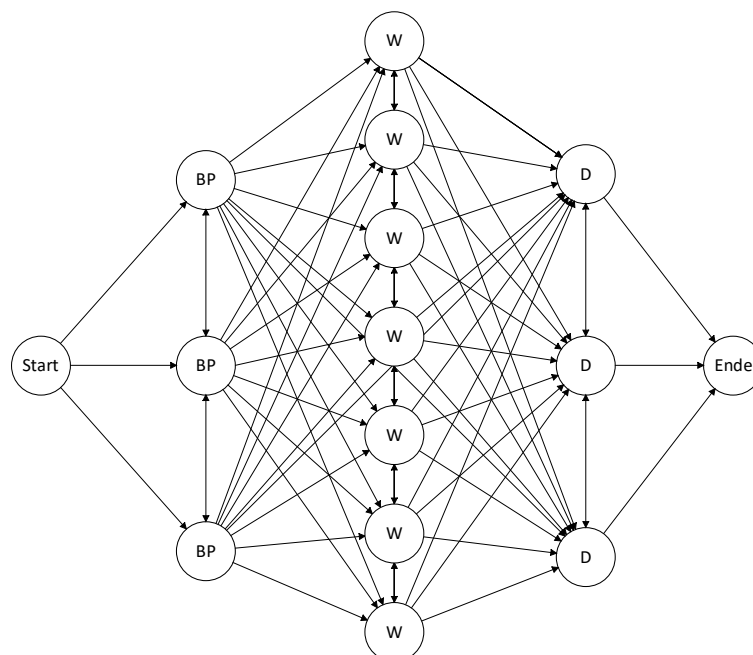
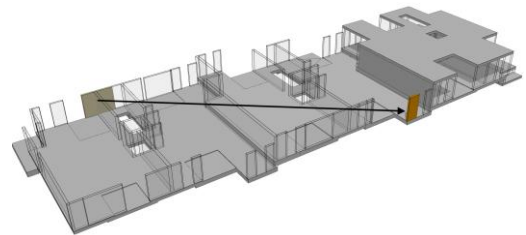
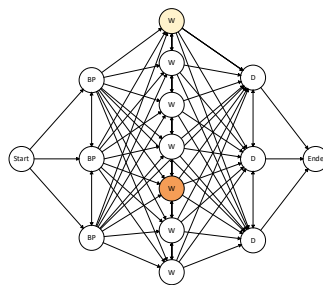


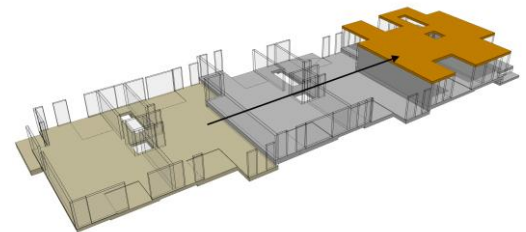
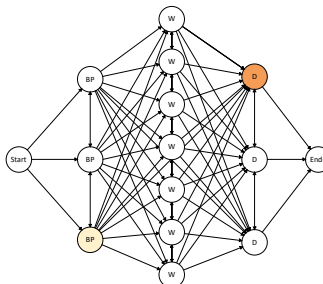
Abbildung 40 Korrekte Anzeige der Pfade zwischen den Bauteilen

Jeder Pfeil im Netzwerk stellt eine mögliche Entscheidung für das Programm dar. Nach dem Bau der Bodenplatte stehen nicht nur die Wände direkt darüber zur Verfügung, sondern auch Wände in anderen Etappen oder sogar Decken können als nächstes Bauteil gewählt werden.

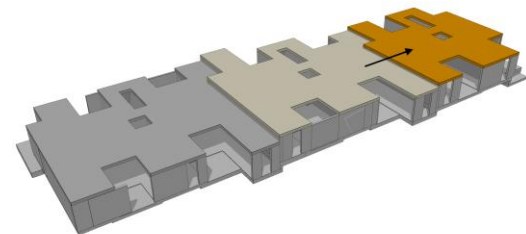
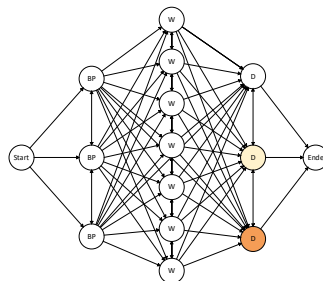
Wand → Wand



Bodenplatte → Decke



Decke → Decke



Durch diese Struktur wird sichergestellt, dass alle möglichen Wege im Bauablauf abgebildet sind und das Programm jede ausführbare Abfolge prüfen kann.

Jeder dieser Pfeile ist eine mögliche Entscheidung für das Programm. Denn nach dem Bau der Bodenplatte stehen nicht nur die Wände über der gefertigten Bodenplatte, sondern alle anderen Wände und sogar einige Decken stehen dabei zur Verfügung als nächstes Entscheidungsbau-
teil. Sind genügend Ressourcen vorhanden, erhöht sich die Anzahl der ausführbaren Bauteile und damit die Zahl der Entscheidungsmöglichkeiten. In diesem Fall stellt sich die Frage, wie das Programm Entscheidungen treffen kann, die auch für einen Menschen nachvollziehbar sind.

4.5.3 Entscheidungsschwierigkeiten

Wie komplex eine Entscheidung sein kann, zeigt sich bereits bei der Festlegung der Bauteilreihenfolge. Angenommen, bei einem einfachen Einfamilienhaus ist die Bodenplatte fertiggestellt und alle darauf stehenden Wände könnten als Nächstes gebaut werden. Zur besseren Übersicht zeigt die Abbildung 41 nur die direkten Nachfolgerverbindungen.

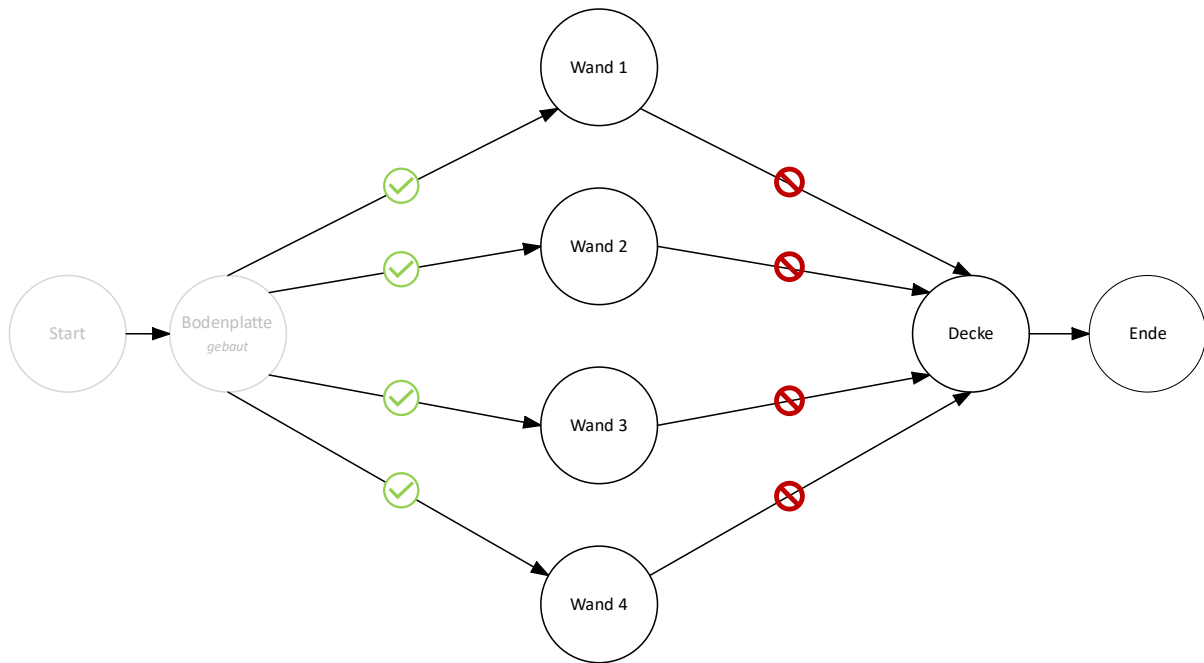


Abbildung 41 Nächstmögliche Abfolge nach dem Bau einer Bodenplatte

Für eine erfahrene Fachperson ist die logische Reihenfolge klar: zuerst das Fundament, dann die Bodenplatte, gefolgt von den Wänden und schliesslich die Decke. Zusammen mit den Einschränkungen durch Ressourcen, räumliche Kapazitäten und gravitative Abhängigkeiten sollte das Programm auf den ersten Blick eine sinnvolle Variante erzeugen können. Unter Berücksichtigung dieser Bedingungen kann das System zwar Varianten generieren, die technisch korrekt erscheinen, jedoch aus praktischer Sicht nicht immer sinnvoll sind. Im Folgenden werden Beispiele dargestellt, die diese Aussage verdeutlichen.

Beispielsweise könnte das Programm nach dem Bau einer Wand die nächste Wand mit der grössten räumlichen Distanz auswählen. Ohne eine Regel zur räumlichen Nähe wird die Auswahl zufällig getroffen. Für einen Menschen ist es klar, dass die räumliche Anordnung für die Ausführung entscheidend ist, doch für ein Programm ohne diese Regel wird die räumliche Distanz keine Relevanz haben.

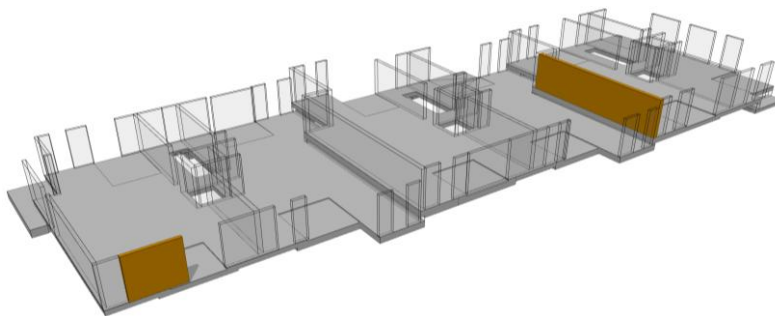


Abbildung 42 Zufälliger Bau einer Wand unter Einhaltung der Bedingungen

Ein weiteres Beispiel zeigt eine Situation, in der die noch zu errichtenden Wände im Inneren des Gebäudes liegen, während die äusseren Wände bereits erstellt wurden. Für eine Person mit Fachkenntnissen ist sofort ersichtlich, dass diese Konstellation den Materialtransport behindert und die Ausführung erschwert.

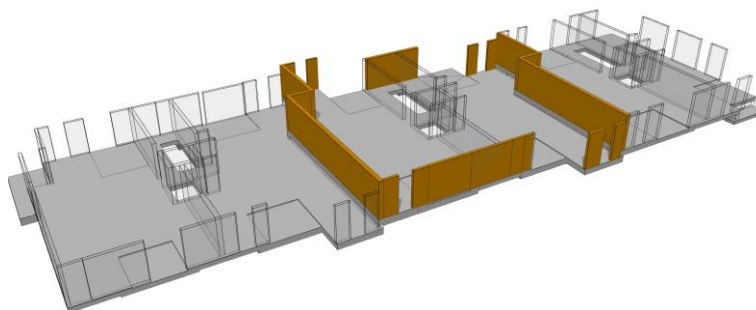


Abbildung 43 Blockierung der Wände im Inneren

Ein drittes Beispiel betrifft den Bau eines Wohnblocks, der zwar in mehreren Etappen geplant ist, aber als zusammenhängendes Gebäude ausgeführt werden soll. Das Programm könnte eine Variante generieren, bei der zuerst nur eine Seite vollständig gebaut wird.

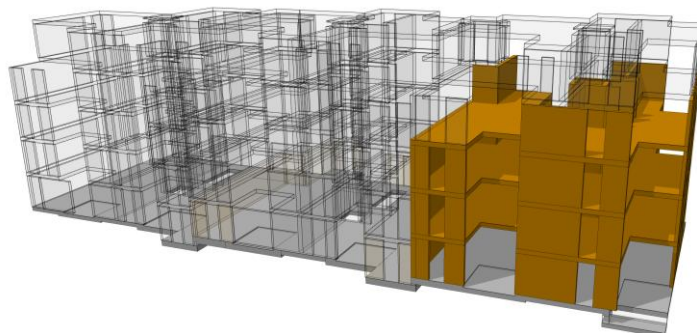


Abbildung 44 seitlich isolierter Bau eines Gebäudes

Obwohl alle gravitativen Abhängigkeiten, Ressourcenverfügbarkeit und Bauteilregeln eingehalten werden, erscheint diese Lösung aus Sicht menschlicher Intuition nicht praktikabel. Die Vorstellung, dass ein Programm allein durch die Definition von Bauteilregeln einen sinnvollen Ablauf erstellt, greift zu kurz. Wie in der Fachliteratur von (Kim, et al., 2013) beschrieben, reicht die Tri-Constraint Methode, bestehend aus Raum, Ressourcen und Vorgängerbeziehungen, nicht aus, um einen realitätsnahen Ablauf zu erzeugen. Die menschliche Entscheidungsfindung ist deutlich vielschichtiger, als es auf den ersten Blick erscheint.

4.5.4 Menschliches Entscheidungsverhalten

Das menschliche Gehirn ist in der Lage, innerhalb weniger Millisekunden Entscheidungen zu treffen, selbst wenn diese auf einer Vielzahl komplexer und miteinander vernetzter Variablen basieren. Trotz begrenzter Informationen gelingt es den meisten Menschen, spontan angemessene "sinnvolle" Entscheidungen zu treffen, auch ohne die zugrunde liegenden Zusammenhänge vollständig zu verstehen. Für Menschen gilt eine Entscheidung als "sinnvoll", wenn sie unter Berücksichtigung ihrer Ziele, den Rahmenbedingungen und ihrer erfahrungsbasierten Intuition übereinstimmt. Die Intuition wird als ein Denkprozess verstanden, bei dem die Erfahrungen über die Zeit hinweg ins Langzeitgedächtnis gelangen. Der Zugriff auf und die Verarbeitung dieser Informationen erfolgen ohne bewusste Steuerung. Eine intuitive Entscheidung bedeutet also, auf Basis von Erfahrungen zu handeln, ohne die Zusammenhänge explizit kennen zu müssen (Betsch, et al., 2011, p. 44).

Diese Erfahrungen werden im Gehirn nicht nur als emotionslose Informationen abgelegt, sondern mit emotionalen Bewertungen gespeichert. Diese bewerteten Informationen nennt man somatische Marker, ein Konzept aus der Neurowissenschaft, das von Antonio Damasio entwickelt wurde. Somatische Marker sind im Gehirn abgespeicherte Informationen, die mit emotionalen Bewertungen wie "korrekt", "falsch", "gut" oder "schlecht" versehen sind. Somatische Marker helfen dabei, Situationen schnell zu bewerten, indem sie frühere Erfahrungen mit ähnlichen Umständen abrufen und emotional gewichten (Damasio, et al., 1991, p. 219).

Diese Gewichtung hängt von individuellen Faktoren ab, darunter emotionale Verfassung, körperliches Befinden, persönliche Präferenzen, Abneigungen, Wertvorstellungen sowie die individuelle Risikobereitschaft, und kann sich je nach Situation verändern. Sie ist besonders dann hilfreich, wenn nicht alle relevanten Informationen verfügbar sind und trotzdem eine Entscheidung getroffen werden muss.

Solche unbewussten Entscheidungen eignen sich hingegen weniger für die Erstellung logischer Abläufe, die für Dritte nachvollziehbar sein müssen und bei denen die Gewichtungen von Präferenzen oder Prioritäten eindeutig und gleichbleibend sein sollten.

Als Beispiel, wie Erfahrungswerte im Gehirn eines Menschen gebildet werden, kann dafür das künstliche neuronale Netzwerk als Modell dienen. Das künstliche neuronale Netzwerk (KNN) Orientiert sich an der Molekularbiologie des Gehirns und zeigt, wie das menschliche Gehirn durch wiederholte Erfahrungen lernt. Das künstliche neuronale Netzwerk besteht aus vielen miteinander verbundenen Einheiten, sogenannten Neuronen. Zwischen diesen Neuronen verlaufen Pfade, über die Informationen weitergeleitet werden. Jedes Mal, wenn ein bestimmter Pfad genutzt wird, erhöht sich deren Gewichtung. Je häufiger eine Erfahrung gemacht wird, desto stärker wird der entsprechende Pfad ausgeprägt. Pfade, die selten genutzt werden, verlieren an Bedeutung und verschwinden mit der Zeit. Auf diese Weise entsteht ein Netzwerk aus bevorzugten Informationswegen, die auf wiederholten Erfahrungen beruhen. Mit zunehmender Anzahl an Erfahrungen kristallisieren sich Pfade heraus, die im Durchschnitt zu sinnvollen Entscheidungen führen. Die künstliche Intelligenz nutzt neuronale Netzwerke, um Muster in grossen Datenmengen zu erkennen und daraus Entscheidungen abzuleiten (Klüver, et al., 2024, pp. 189-190).

In diesem Fall jedoch kann ein Programm Entscheidungen, die vom Menschen als „sinnvoll“ oder „intuitiv“ bewertet werden, nicht eigenständig nachvollziehen, solange keine ausreichende Datenbasis vorhanden ist, um die Gewichtungen zu trainieren. Um dennoch eine Annäherung an die menschliche Entscheidungsfähigkeit zu ermöglichen, wird im Programm ein Entscheidungsnetzwerk verwendet. Im Gegensatz zum neuronalen Netzwerk, das durch Erfahrung lernt und die Pfade selbst gewichtet, basiert das Entscheidungsnetzwerk auf vordefinierten Gewichtsregeln. Dazu wird das Programm mit einem sogenannten Entscheidungsnetzwerk ausgestattet, um die Entscheidungsmöglichkeit nachzubilden. Die Priorisierung der Kriterien basiert auf dem Ansatz der somatischen Marker, wobei jedem Pfad eine Gewichtung zugewiesen wird. Diese Gewichtungen sollen konstant und nachvollziehbar bleiben, damit die Entscheidungslogik nicht nur reproduzierbar ist, sondern auch für andere Personen transparent bleibt. Im Gegensatz zur menschlichen Intuition, die individuell variieren kann, greift ein technisches System auf klar definierte und unveränderliche Gewichtungen zurück, um konsistente und überprüfbare Entscheidungen zu treffen.

Mit dem entwickelten Programm soll nicht nur lediglich ein beliebiger Bauablauf generiert werden, sondern ein Ablauf, der optimiert ist und einen Mehrwert für die Bauplanung bietet. Der grösste Nutzen wäre dann gegeben, wenn das Programm in der Lage ist, ein absolutes Optimum zu berechnen, beispielsweise die kürzeste Bauzeit bei gleichzeitig minimalen Kosten oder eine gleichmässige Auslastung des verfügbaren Personals über die gesamte Projektdauer.

Die Berechnung eines absoluten Optimums setzt jedoch voraus, dass sämtliche möglichen Varianten von Bauabläufen ausgerechnet werden. Aufgrund der exponentiell steigenden Anzahl an Kombinationsmöglichkeiten und der damit verbundenen Rechenzeit ist eine vollständige Durchrechnung aller Varianten mit den derzeit verfügbaren technischen Mitteln kaum realisierbar. Um dennoch eine Teilmenge potenziell optimaler Abläufe zu identifizieren, wird in diesem Kapitel erläutert, wie das Programm unter diesen Einschränkungen Entscheidungen trifft. Zunächst wird die Problematik der Variantenanzahl und der Rechenzeit analysiert. Anschliessend wird erläutert, wie sich das Optimierungsproblem durch die Einführung von Prioritätswerten lösen lässt und wie diese Werte in das Entscheidungsnetzwerk integriert werden können.

4.5.4.1 Problematik der Variantenanzahl

Aufgrund der enormen Anzahl an möglichen Kombinationen ist es derzeit rechnerisch nicht möglich, das absolute Optimum zuverlässig zu finden. Die Software Alice verwendet den Random-Walk-Algorithmus, um Millionen potenzieller Ablaufvarianten zufällig zu generieren, mit dem Ziel, eine optimale Lösung zu finden. Dennoch können selbst bei einer so grossen Anzahl nicht alle Varianten systematisch geprüft werden. Bei Projekten mit hunderten Bauteilen und zahlreichen Abhängigkeiten steigt die Anzahl möglicher Ablaufvarianten exponentiell an, was die Berechnung eines absoluten Optimums aktuell unmöglich macht.

Die exponentielle Zunahme der Variantenanzahl lässt sich anhand eines vereinfachten Beispiels verdeutlichen. Betrachtet werden vier identische Wände, die nach dem Bau einer Decke errichtet werden können. Es bestehen keine gegenseitigen Blockierungen, ausreichend Material und Personal sind vorhanden und es besteht die Möglichkeit, alle vier Wände gleichzeitig zu bauen. Die vier Wände in den Farben Rot, Orange, Gelb und Rosa sind unten auf dem Bild ersichtlich.



Abbildung 45 Auswahlmöglichkeit der als nächst zu bauenden Wände. Von links nach rechts: Rot, Orange, Gelb, Rosa.

4.5.4.1.1 Berechnung

Im Berechnungskapitel wird die Herleitung zur Anzahl der Permutationen dargestellt, bzw. die Anzahl möglicher Kombinationen, Elemente in einer Reihenfolge anzuordnen. Dabei wird zwischen rein seriellen Anordnungen und Kombinationen aus seriellen und parallelen Anordnungen unterschieden (Tittmann, 2019, p. 2).

4.5.4.1.1.1 Serielle Anordnungsmöglichkeiten

Werden ausschliesslich serielle Anordnungen betrachtet, lässt sich die Anzahl der Anordnungsmöglichkeiten mittels der kombinatorischen Fakultätsfunktion berechnen.

$$n! = 4! = 24$$

(Tittmann, 2019, p. 3)

Für vier Wände ergeben sich somit 24 unterschiedliche Anordnungsmöglichkeiten, wenn sie strikt nacheinander und in jeweils unterschiedlicher Reihenfolge gebaut werden. In der folgenden Abbildung sind die verschiedenen Varianten dargestellt. Die Wände sind farblich gekennzeichnet und die Reihenfolge wird durch nummerierte Pfeile verdeutlicht.

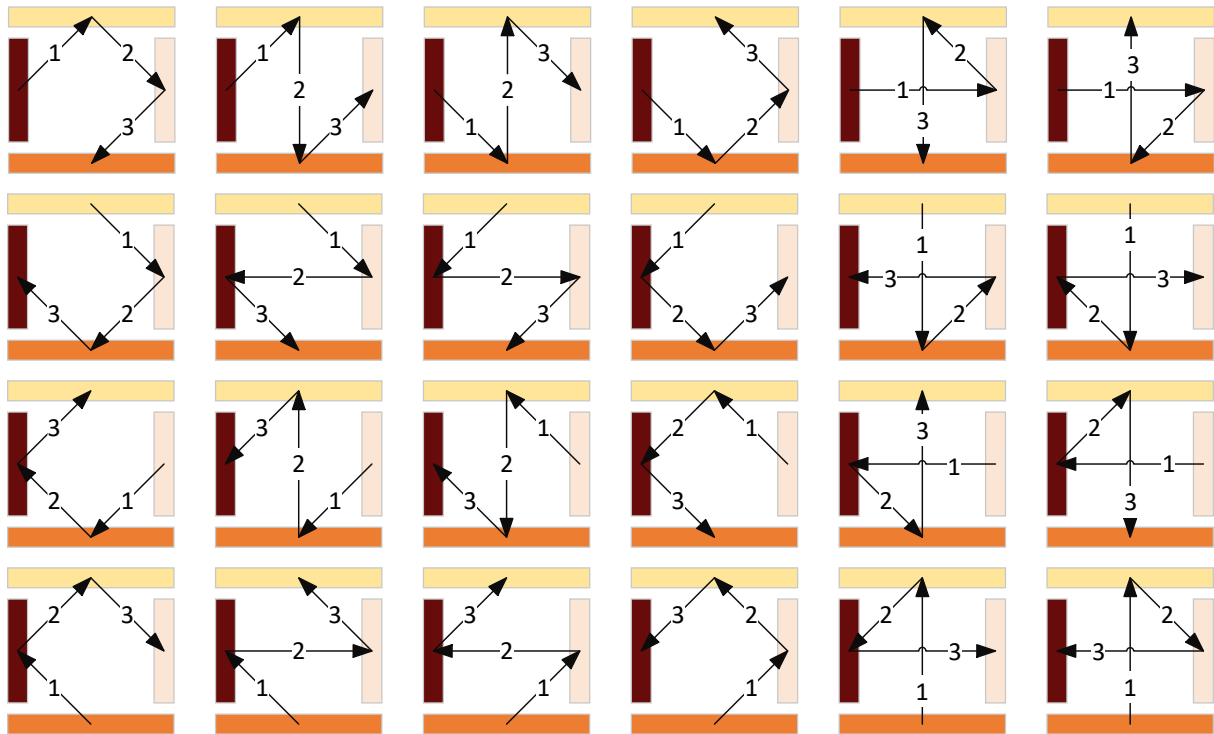


Abbildung 46 – 24 Serielle Anordnungsmöglichkeiten

4.5.4.1.1.2 Parallele und Serielle Anordnungsmöglichkeiten

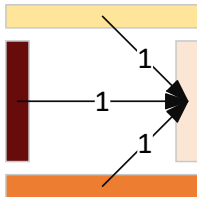
Werden neben den seriellen auch parallele Anordnungen berücksichtigt, müssen sowohl Anordnungsmöglichkeiten als auch die Partitionierungen der Elemente miteinbezogen werden. Partitionen bezeichnen die Anzahl der Möglichkeiten, eine Gesamtmenge in Teilmengen zu zerlegen, ohne die Reihenfolge zu berücksichtigen (Tittmann, 2019, p. 16).

Diese Teilmengen sind in unserem Fall Gruppen von Bauteilen, die parallel ausgeführt werden können. Ein Beispiel hierfür sind die Partitionen der Wände in (Rot, Orange, Gelb) und (Rosa). Diese Partition bedeutet, dass die Wände in Rot, Orange und Gelb gleichzeitig gebaut werden können, während die Wand in Rosa separat erstellt wird. Die Partition selbst berücksichtigt keine Anordnung zwischen den Teilgruppen, sondern erst durch die Permutation wird die Anordnung festgelegt.

Beispielsweise ergeben sich für die Partitionen (Rot, Orange, Gelb) und (Rosa) zwei mögliche Anordnungsmöglichkeiten:

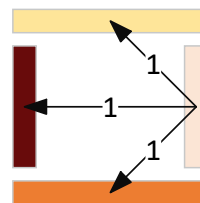
1. Anordnungsmöglichkeit

(Rot, Orange, Gelb) → (Rosa)



2. Anordnungsmöglichkeit

(Rosa) → (Rot, Orange, Gelb)



Zur Berechnung der Anzahl möglicher Partitionen kann die Formel der Bell-Zahl herangezogen werden. Die resultierende Bell-Zahl gibt anschliessend an, wie viele Partitionen mit einer Anzahl von n -Elementen möglich sind. Eine geschlossene Formel zur Berechnung existiert nicht und stattdessen muss die Bellsche Zahl rekursiv berechnet werden (Tittmann, 2019, p. 20).

Formel zur Berechnung der Bell-Zahl

$$B_{n+1} = \sum_{k=0}^n \binom{n}{k} B_k$$

Es gilt $n \geq 0$, $B_0 = 1$

Berechnung von vier Wänden

$$B_4 = \sum_{k=0}^3 \binom{3}{k} B_k$$

Für vier Wände gilt: $n + 1 = 4$ da $B_0 = 1$ ist

Iteration: $\binom{3}{0} = \binom{3}{0} = 1, \quad B_k = B_0 = 1$

Iteration: $\binom{3}{1} = \binom{3}{1} = 3, \quad B_k = B_1 = 1$

Iteration: $\binom{3}{2} = \binom{3}{2} = 3, \quad B_k = B_2 = 2$

Iteration: $\binom{3}{3} = \binom{3}{3} = 1, \quad B_k = B_3 = 5$

Folglich:

$$\begin{aligned} B_4 &= \sum_{k=0}^3 \binom{3}{k} B_k = B_0 + B_1 + B_2 + B_3 \\ &= \binom{3}{0} \cdot 1 + \binom{3}{1} \cdot 1 + \binom{3}{2} \cdot 2 + \binom{3}{3} \cdot 5 = 1 \cdot 1 + 3 \cdot 1 + 3 \cdot 2 + 1 \cdot 5 = 15 \end{aligned}$$

Im Beispiel mit vier Wänden ergibt sich daraus eine Gesamtanzahl von **15 Partitionen**.

Innerhalb dieser Partitionen können diese Teilgruppen in jeder beliebigen Reihenfolge angeordnet werden. Eine Liste der möglichen Teilmengen und der Anzahl Anordnungsmöglichkeiten ist in der untenstehenden Tabelle gegeben:

	Partitionen	Gruppenanzahl	Varianten
1	() () () ()	4	$4! = 24$
2	( ) () ()	3	$3! = 6$
3	() ( ) ()	3	$3! = 6$
4	() () ( )	3	$3! = 6$
5	( ) () ()	3	$3! = 6$
6	( ) () ()	3	$3! = 6$
7	() ( ) ()	3	$3! = 6$
8	( ) ( )	2	$2! = 2$
9	( ) ( )	2	$2! = 2$
10	( ) ( )	2	$2! = 2$
11	() (  )	2	$2! = 2$
12	() (  )	2	$2! = 2$
13	() (  )	2	$2! = 2$
14	() (  )	2	$2! = 2$
15	(   )	1	$1! = 1$

Tabelle 13 Darstellung aller möglichen Partitionen mit vier Wänden

Um die Gesamtanzahl der Anordnungsmöglichkeiten zu bestimmen, müssen die einzelnen Anordnungsmöglichkeiten innerhalb jeder Partition berücksichtigt und anschliessend summiert werden. Anstatt die Anzahl der Anordnungsmöglichkeiten für jede einzelne Partition separat zu berechnen und zu summieren, kann die Bellsche Zahl direkt in die Berechnungsformel der Stirling-Zahlen zweiter Art integriert werden.

Funktion Bell-Zahlen als Summe mit den Stirling-Zahlen zweiter Art: (Tittmann, 2019, p. 16)

$$\text{Anzahl Anordnungsmöglichkeiten} = \sum_{i=1}^{B_n} k_i!$$

Dabei sind:

B_n : die Bell-Zahl für n Elemente

k_i : die Anzahl der Gruppen in der i-ten Gruppierung

$k_i!$: die Anzahl der möglichen Anordnungsmöglichkeit dieser Gruppen

$$B_4 = 15 \\ \sum_{i=1}^{B_4} k_i! = 24 + 6 + 6 + 2 + 6 + 6 + 2 + 2 + 1 + 2 + 6 + 2 + 2 + 6 + 2 = 75$$

4 Bauteile → 75 Anordnungsmöglichkeiten

5 Bauteile → 541 Anordnungsmöglichkeiten

6 Bauteile → 4'683 Anordnungsmöglichkeiten

Insgesamt sind für 4 Wände mit einer seriellen und parallelen Anordnung 75 Anordnungsmöglichkeiten und mit 6 Bauteilen sogar 4'683 Anordnungsmöglichkeiten möglich. Mit jedem hinzugefügten Bauteil steigt die Anzahl exponentiell. Eine bildliche Darstellung aller 75 möglichen Anordnungsmöglichkeiten ist im *Anhang 4 Anordnungsmöglichkeiten* ersichtlich.

4.5.4.1.1.3 Varianten pro Bauobjekt

In einem realistischeren Berechnungsbeispiel mit einem Gebäude wird angenommen, dass pro Geschoss 60 Wände ausgeführt werden. Diese Wände verteilen sich auf drei Decken-etappen, wobei jede Etappe etwa 20 Wände umfasst. Eine der Regeln besagt, dass die Decke vollständig erstellt sein muss, bevor die darauf befindlichen Wände gebaut werden können. Zusätzlich wird berücksichtigt, dass aufgrund der räumlichen Einschränkung nicht alle Wände gleichzeitig gebaut werden können. Es wird angenommen, dass jeweils nur die Hälfte der Wände, also 30 Wände pro Geschoss, gleichzeitig ausgeführt werden kann.



Abbildung 47 Beispiel eines Geschossmodells mit 20 Wänden pro Etappe

Berechnung

Die Decken können in beliebiger Anordnung erstellt werden:

Permutationen für Decken $3! = 6$

Die Wände haben ebenfalls keine feste Anordnung und können parallel wie auch seriell gebaut werden:

Permutationen von 30 Wänden: $B_{30} = 846'749'014'511'809'332'450'147 = 8.47 \cdot 10^{23}$

Die Decke muss vor den Wänden gebaut werden und ihre Anordnung ist unabhängig von der Anordnung der Wände:

Permutationen für Decken und Wände: $3! \cdot 45! = 6 \cdot 8.42 \cdot 10^{23} = 5.05 \cdot 10^{82}$

Angenommen, das Bauprojekt besteht aus einem Erdgeschoss und zwei weiteren Obergeschossen. Somit steigt die Anzahl möglicher Anordnungsmöglichkeiten für eine

Permutationen für 3 weitere Geschosse: $3 \cdot 5.05 \cdot 10^{82} = 15.2 \cdot 10^{82}$

15'156'000'000'000'000'000'000'000 oder auch 15.2 Tredezilliarden genannt.

Die exponentielle Zunahme der Anzahl Anordnungsmöglichkeiten ergibt sich derzeit alleinig aus der Vielzahl an Bauteilen, deren möglichen Gruppierungen (Partitionen), den Permutationen innerhalb dieser Gruppen sowie den Abhängigkeiten zwischen den Geschossen.

Bereits bei der alleinigen Betrachtung der Bauteilanzahl führt dies zu einem exponentiell anwachsenden Lösungsraum, der sich im Tredezilliardenbereich bewegt. Neben dieser Komplexität kommen weitere Einflussgrößen hinzu, die den Lösungsraum zusätzlich erweitern. Dazu zählen beispielsweise die variable Anzahl des Personals, die verfügbare Ressourcenmenge, die Abhängigkeiten und Interaktionen verschiedener Systemprodukte sowie zeitliche, örtliche, saisonale und tätigkeitsbezogene Leistungswerte. Jeder zusätzliche Parameter wirkt als Multiplikationsfaktor auf die Anzahl der möglichen Ablaufvarianten. Wird die Berechnung beispielsweise mit einer variablen Anzahl an Arbeitskräften durchgeführt, vervielfacht sich die Variantenanzahl mit jeder Iteration.

Berechnung der Varianten mit:

1 Arbeitsgruppe (12 Personen):	$1 \cdot 15.2 \cdot 10^{82}$
2 Arbeitsgruppen (12, 24 Personen):	$2 \cdot 15.2 \cdot 10^{82}$
3 Arbeitsgruppen (12, 24, 36 Personen):	$3 \cdot 15.2 \cdot 10^{82}$

4.5.4.2 Optimierungen

4.5.4.2.1 Zeitproblem in der Datengenerierung

Mit jedem zusätzlichen Bauteil oder jedem neuen Abhängigkeitsparameter steigt die Anzahl der möglichen Kombinationen exponentiell.

Selbst wenn ein leistungsfähiger Rechner eine Variante pro Sekunde prüfen könnte, entspricht die vollständige Durchrechnung aller Varianten in etwa:

→ 15'156'000'000'000'000'000'000'000 Sekunden

→ 480'593'607'305'936'073 Jahre = 480 Billionen Jahre

Selbst wenn ein Hochleistungsrechner eine Variante in nur einer Millisekunde berechnen könnte, würde sich die Gesamtrechnenzeit dennoch auf über 480 Millionen Jahre belaufen. Die Komplexität des Lösungsraums macht eine vollständige Berechnung des absoluten Optimums daher praktisch unmöglich. Zum Vergleich: Die aktuelle Eigenentwicklung des Programms benötigt rund fünf Sekunden, um eine einzige Variante zu berechnen.

4.5.4.2.2 Algorithmen für NP-schwere Probleme

Die Bestimmung des absoluten Optimums setzt voraus, dass sämtliche möglichen Varianten komplett berechnet und miteinander verglichen werden, was zurzeit nicht realisierbar ist.

In der theoretischen Informatik wird diese Problemstellung als NP-schweres Problem bezeichnet. NP-schwere Probleme zeichnen sich dadurch aus, dass keine bekannte Lösungsmethode existiert, mit der sich die optimale Lösung in polynomieller Zeit berechnen lässt (Nondeterministic Polynomial time). Die Rechenzeit steigt mit zunehmender Problemgrösse exponentiell an. Das bedeutet, dass selbst bei moderater Komplexität die Anzahl der zu prüfenden Varianten schnell immense Grössenordnungen erreicht. Aus diesem Grund stellt die Entwicklung einer Software mit einer absoluten Ablaufoptimierung eine erhebliche Herausforderung dar (Vanhoucke & Bredael, 2022, p. 54).

Mit der gleichen Problematik musste sich die Software Alice befassen und hat daher den Random-Walk-Algorithmus integriert. Der Random-Walk-Algorithmus ist kein Optimierungsalgorithmus im klassischen Sinne, sondern ist ein rein explorativer Mechanismus. Der Algorithmus erstellt in kurzer Zeit eine grosse Anzahl möglicher Varianten, ohne dass bestimmte Prioritäten vorliegen. Ziel ist es, durch zufällige Durchläufe eine Lösung zu finden, die möglichst nahe am Optimum liegt. Der Random Walk gehört zu den heuristischen Verfahren. Heuristische Algorithmen liefern nicht zwingend das absolute Optimum, aber eine ausreichende Lösung in vertretbarer Zeit, indem sie vereinfachte Regeln oder Zufallsvarianten nutzen. (Hall, et al., 2021, p. 2)

Metaheuristische Algorithmen sind jedoch deutlich leistungsfähiger. Metaheuristische Algorithmen sind übergeordnete Suchverfahren, die mehrere Heuristiken kombinieren, um die Qualität der Lösungen zu verbessern. Sie sind besonders geeignet, um komplexe Probleme wie NP-schwere Aufgaben zu lösen, bei denen klassische Methoden aufgrund der benötigten Rechenzeit nicht umsetzbar sind. Im Gegensatz zu rein zufälligen Suchmethoden lernen Metaheuristiken mit jeder Iteration dazu und optimieren die Ergebnisse schrittweise.

Metaheuristiken orientieren sich oft an der Natur und verwenden diese als Inspiration für effiziente Suchstrategien. Darunter fallen unter anderem der genetische Algorithmus oder der Ameisenalgorithmus. Der genetische Algorithmus beruht auf dem Konzept der natürlichen Selektion, bei dem vorteilhafte Eigenschaften durch Mutation über Generationen hinweg weitervererbt werden.

Der Ameisenalgorithmus hingegen ist vom Schwarmverhalten der Ameisen bei der Nahrungssuche inspiriert. Obwohl es eine Vielzahl möglicher Wege auf einem sehr grossen Gebiet gibt, sind Ameisen in der Lage, die kürzeste Strecke zwischen ihrem Nest und der Nahrungsquelle zu finden. Sie erreichen dies, indem sie auf ihren Wegen Pheromone abgeben. Je mehr Pheromone vorhanden sind, desto höher ist die Wahrscheinlichkeit, dass andere Ameisen diesen Weg wählen. Existieren beispielsweise zwei unterschiedlich lange Wege von der Futterquelle zum Nest, so werden diese in etwa gleich oft genutzt. Ameisen kehren jedoch auf kürzeren Wegen schneller zurück, was zu einem stärkeren Anstieg der Pheromonkonzentration auf diesem Weg führt, wodurch sich diese Route als effizienteste durchsetzt. Der Ameisenalgorithmus wird oft für Bus-, Müllabfuhr- oder Postrouten angewendet, um die Transportzeit zu minimieren, während gleichzeitig alle Stationen angesteuert werden müssen.

Der Vorteil metaheuristischer Verfahren liegt darin, dass nicht sämtliche möglichen Varianten berechnet werden müssen. Nach einer Streuung in den ersten Iterationen fokussiert sich der Algorithmus auf die besseren Lösungen und optimiert diese in den nächsten Iterationen kontinuierlich. Der Ansatz dazu wurde von den Wissenschaftlern Mario Vanhoucke und Dries Bredael untersucht. Ihr Fokus lag in der "Resource-Constrained Project Scheduling Problem" (RCPSP) einem ressourcenbeschränkten prozessbasierten Optimierungsproblem.

In der Analyse wurden zehn verschiedene Optimierungsalgorithmen anhand von 4'550 Versuchsdatensätze verglichen. Ziel war es, die Balance zwischen korrekter Bauteilreihenfolge, Einhaltung und Optimierung der vorgegebenen Bauzeit sowie der Rechenzeit zu bewerten. Die Ergebnisse zeigten, dass mehrere Algorithmen unter unterschiedlichen Bedingungen als optimal gelten können, doch die drei leistungsfähigsten erwiesen sich als der Genetische Algorithmus, die Partikelschwarmoptimierung sowie der Ameisenschwarm Algorithmus, vor allem in Kombination mit prioritätsbasierten Entscheidungsverfahren (Vanhoucke & Bredael, 2022, p. 63).

In isolierter Anwendung zeigten sich die Algorithmen zwar als effizient, schnitten jedoch nicht viel besser ab als andere Algorithmen. In Verbindung mit den Prioritätsregeln (Priority-rule-based algorithm) wurden jedoch signifikant bessere Ergebnisse erzielt. Der prioritätsbasierte Algorithmus ist ein heuristischer Algorithmus, ähnlich wie der Random-Walk-Algorithmus. Der Unterschied besteht jedoch darin, dass der prioritätsbasierte Algorithmus klar festgelegte Optimierungsziele besitzt und die Ausführungsreihenfolge kontrolliert.

Dadurch steigt die Qualität der Lösungen und der manuelle Prüfaufwand sinkt. Daher kann auch eine reduzierte Anzahl an Varianten generiert werden, um eine ebenso effektive Lösung zu finden.

Bereits im Jahr 1982 haben I. Kurtulus und E. W. Davis grundlegende Prioritätsregeln zur Lösung des RCPSP entwickelt und deren Leistungsfähigkeit analysiert. Diese Regeln bildeten die Basis für viele nachfolgende Studien, die sich mit der Weiterentwicklung solcher Heuristiken in ressourcenbeschränkten Ablaufplanungen beschäftigten.

Im Jahr 2015 wurde erstmals ein Ansatz veröffentlicht, bei dem Genetische Algorithmen mit Prioritätsregeln kombiniert wurden, um das RCPSP effizienter zu lösen. (Vázquez, E. P, et al., 2015). Dieser Ansatz wurde von Mario Vanhoucke und seinem Forschungsteam weiterentwickelt und in seiner Auswertung als einer der effizientesten Algorithmen für Bauablaufoptimierungen nachgewiesen.

Der Schwerpunkt dieser Thesis liegt zunächst in der Implementierung dieser Prioritätswerte. Aufgrund der zeitlichen Einschränkungen wird der genetische Algorithmus nicht mehr vollständig implementiert und getestet. Obwohl ein Algorithmus dieser Art die Möglichkeit bietet, eine grössere Anzahl von Varianten zu berechnen, ist die Implementierung von Prioritätswerten von höherer Relevanz, da sie der menschlichen Entscheidungslogik näherkommt. Durch die Verwendung von Prioritätswerten wird der Suchraum eingeschränkt und es werden zwar weniger, aber dafür sinnvollere Varianten generiert, im Gegensatz zu einer zufälligen Suche. Mit der Erkenntnis, dass der genetische Algorithmus in Verbindung mit Prioritätsregeln gegenwärtig die leistungstärkste Lösung darstellt, wurde mit diesem Vorhaben eine solide Grundlage geschaffen, um den genetischen Algorithmus als zukünftige Erweiterung in das Programm zu integrieren.

4.5.4.2.3 Multikriterielle Optimierung

Bevor die einzelnen Prioritätswerte definiert werden können, muss zunächst geklärt werden, was unter einer optimalen Lösung eines Bauablaufs zu verstehen ist. In vielen Fällen wird ein absolutes Optimum angestrebt, beispielsweise die minimale Projektdauer. Eine vom Programm generierte Variante mag aus Sicht eines Algorithmus effizient erscheinen, kann jedoch für einen Menschen nicht sinnvoll sein.

Beispiele für solche nicht sinnvollen Varianten wurden im vorherigen *Kapitel Entscheidungsschwierigkeiten* erläutert, wie etwa die weit voneinander entfernten Wände, die vollständig eingekesselten Bauteile oder das seitlich hochgeführte Gebäude. Menschen bewerten Abläufe nicht ausschliesslich nach einem einzelnen Kriterium wie Zeit, sondern beziehen intuitiv weitere Kriterien mit ein, wie etwa die gleichmässige Auslastung von Personal und Ressourcen, die Vermeidung von Überlastungsspitzen oder die Einhaltung von logistischen Rahmenbedingungen. Obwohl diese Kriterien von Menschen oft unbewusst berücksichtigt sind, sind sie essenziell, damit das Programm eine menschlich nachvollziehbare und brauchbare Entscheidung treffen kann.

Wenn bei der Bewertung von Varianten mehrere Kriterien gleichzeitig berücksichtigt werden, entsteht nicht nur ein einzelnes Optimum, sondern es können sich mehrere gleichwertige Optima entwickeln. Diese Menge wird als pareto-optimale Lösungen bezeichnet und befindet sich auf der sogenannten roten Paretofront. (Seitz & Grabe, 2018, p. 167)

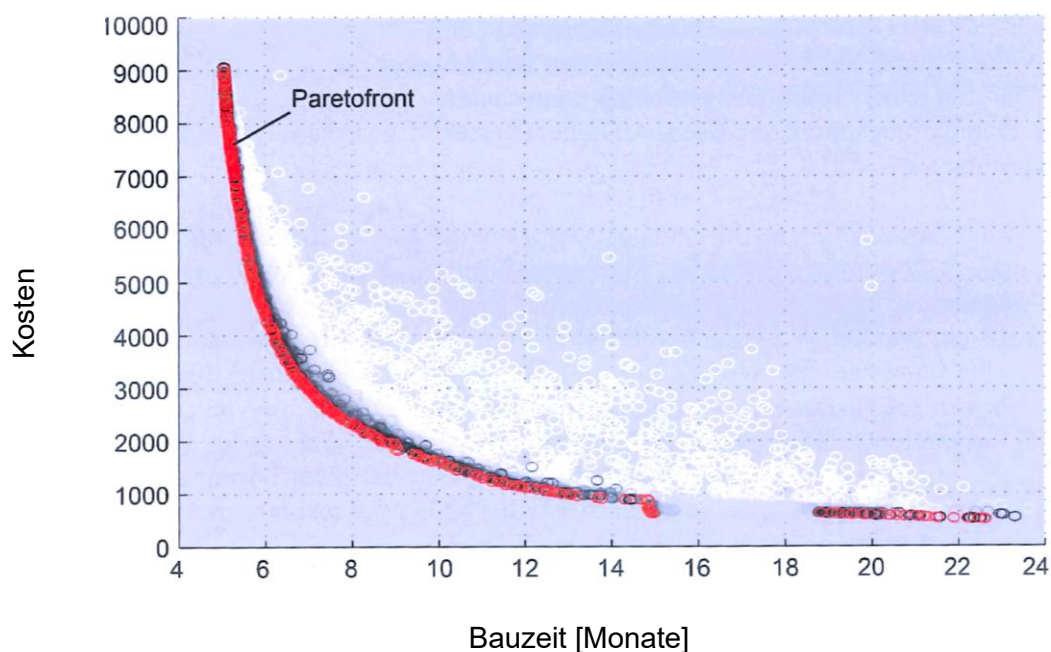


Abbildung 48 Beispiel der Paretofront zur multikriteriellen Optimierung von Kosten und Bauzeit (modifiziert von Abb.1 (Seitz & Grabe, 2018, p. 169))

In der Abbildung 48 werden die Kriterien Kosten und Bauzeit gegenübergestellt. Jeder Punkt im Diagramm repräsentiert eine Variante eines Bauablaufs. Die Paretofront umfasst jene Varianten, bei denen keine Verbesserung eines Kriteriums möglich ist, ohne das andere zu verschlechtern. Befindet sich ein Punkt auf dieser Front, so gilt die Variante als eine der optimalen Lösungen. Das Vorgehen wird als multikriterielle Optimierung bezeichnet. Anstatt nur ein einzelnes Kriterium wie die minimale Projektdauer zu optimieren, ermöglicht dieser Ansatz die gleichzeitige Berücksichtigung mehrerer Kriterien, um Lösungen zu finden (Seitz & Grabe, 2018, p. 168).

Die Auswahl der Kriterien für die Achsen in einem Optimierungsdiagramm ist nicht auf Kosten und Bauzeit beschränkt. Sie kann um weitere Parameter erweitert werden, wie den Personalbedarf, die Anzahl benötigter Schalungsflächen oder die Anzahl eingesetzter Kräne.

In der Praxis wird häufig betont, dass jede Baustelle individuell sei und sich grundlegend von anderen unterscheide. Diese Aussage trifft jedoch nicht auf technische Abhängigkeiten zu, die durch Gravitation, Ressourcenverfügbarkeit und räumliche Einschränkungen gegeben sind. Die tatsächliche Individualität eines Bauprojekts ergibt sich einerseits aus der Produktvarianz, aber auch aus der Priorisierung der Kriterien, also den Prioritätswerten, die von den jeweiligen Projektbeteiligten gesetzt werden.

Was für den Bauherrn von zentraler Bedeutung ist, wie die Minimierung der Kosten, kann für die Bauführung zur gegebenen Zeit weniger relevant sein als eine gleichmässige Auslastung des Personals oder die logistische Machbarkeit. Die Prioritätswerte sollen dabei eine Annäherung an die menschliche Intuition sein und als maschinelle Entscheidungslogik dienen. Damit diese Priorisierungen in das Programm implementiert werden können, müssen sie zunächst identifiziert und festgelegt werden.

4.5.5 Prioritätswerte

Prioritätswerte sind Informationen, die sich aus den Eigenschaften und Abhängigkeiten der Bauteile ergeben. Dazu zählen beispielsweise die Anzahl benötigter Materialien zur Herstellung eines Bauteils, die Anzahl von Nachfolgern oder die Anzahl von blockierten Nachbarn. Diese Werte allein definieren jedoch noch nicht, welches Bauteil als nächstes ausgeführt werden soll. Hierfür kommen Prioritätsregeln zum Einsatz. Diese Regeln definieren, welche Kriterien bei der Entscheidungsfindung stärker gewichtet werden und somit eine höhere Relevanz für die Auswahl des nächsten Bauteils erhalten. Das Programm steuert seine Entscheidungen aufgrund dieser Regeln und bestimmt daraus die Reihenfolge der Bauteile.

Hohe Priorität für Bauteile mit:

- Hoher Anzahl Nachfolger
- Hoher Anzahl blockierte Nachbarn

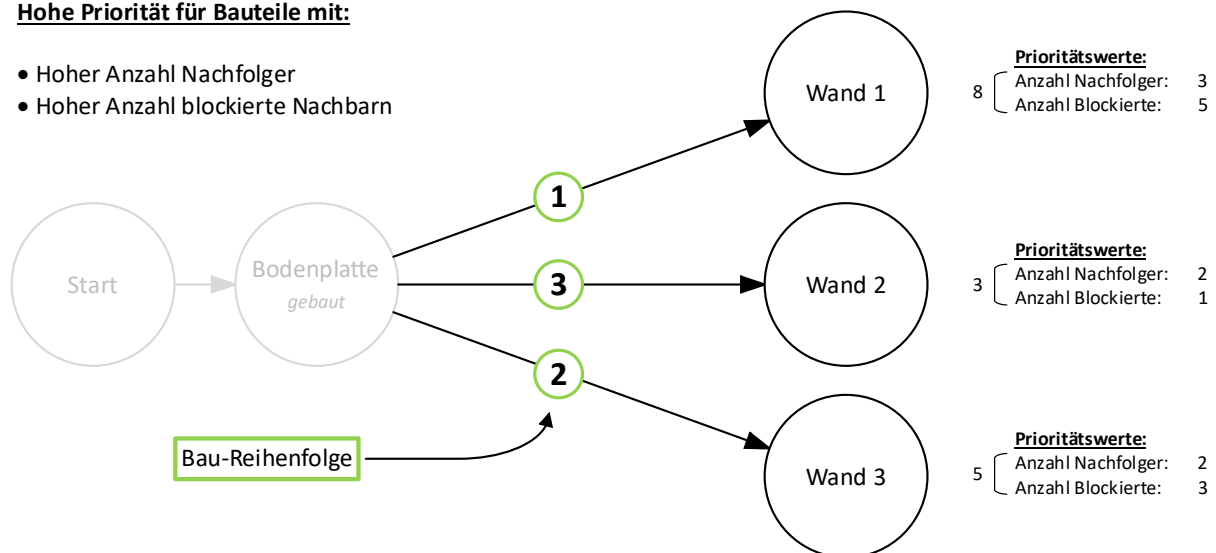


Abbildung 49 Wie Prioritätsregeln die Baureihenfolge bestimmen

Als methodischer Ansatz für die Priorisierung im Bauablaufprogramm werden die Prioritätswerte verwendet, die ursprünglich von (Lova & Tormos, 2001) definiert und später von (Vanhoucke & Van Eynde, 2020) weiterentwickelt wurden.

Sie ermöglichen eine vergleichende Bewertung anhand quantitativer Merkmale. Allerdings berücksichtigen die Werte von Vanhoucke nicht die räumliche oder logische Koordination zwischen den Bauteilen. In diesem Zusammenhang werden für die Programmimplementierung zusätzliche Prioritätswerte eingeführt, wie die räumliche Distanz zwischen Bauteilen und die

Menge an benötigter Schalung und Beton. Diese Werte sind relevant, da sie direkt mit der Ressourcenauslastung auf der Baustelle verknüpft sind und für eine gleichmässige Verteilung der Ressourcen bei der Priorisierung erforderlich sind.

Folgende Prioritätswerte werden daher noch zusätzlich zur Liste ergänzt:

Angepasste Prioritätswerte von

(Vanhoucke & Van Eynde, 2020, pp. 310-311)

Bauzeit pro Bauteil
Anzahl zugeordneter Arbeitsaktivitäten
Anzahl von Nachfolgern
Maximale Dauer auf dem kritischen Pfad
Minimale Dauer auf dem kritischen Pfad
Maximaler möglicher Puffer

Zusätzliche Prioritätswerte

Anzahl blockierte Nachbarn
Baustartpunkt
Distanz zum nächsten Bauteil
Anzahl benötigtes Personal
Anzahl benötigter Schalung
Anzahl benötigter Beton
IFC-Typ

Die Gewichtung der Prioritätswerte muss je nach Projektbeteiligten anschliessend individuell angepasst werden. Im Programm werden die Prioritätswerte so in das Entscheidungsnetzwerk eingebunden, dass sie variabel veränderbar und erweiterbar sind. Ein Vorschlag für die Regeln der Prioritätswerte wird im *Kapitel 6.3 Inputdaten* der Auswertungen gegeben.

4.5.5.1 Gewichtung der Prioritätswerte

4.5.5.1.1 Definition brauchbarer Bauablauf

Die automatisierte Erstellung von Bauabläufen wirft eine zentrale Frage auf:

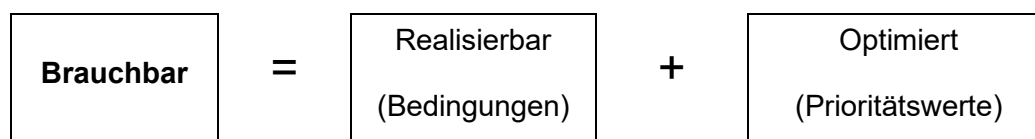
Ab welchem Punkt ist ein Ablauf nicht nur technisch korrekt, sondern auch praktisch brauchbar?

Ein Bauablauf ist dann brauchbar, wenn er unter den gegebenen Bedingungen sowohl bautechnisch realisierbar als auch zeitlich optimiert ist. Die bautechnische Realisierbarkeit bedeutet, dass der Ablauf unter Einhaltung physikalischer Gesetzmässigkeiten, der Ressourcenverfügbarkeit und der räumlichen Gegebenheiten umgesetzt werden kann. Diese Voraussetzung allein reicht jedoch nicht aus, um den Ablauf als brauchbar zu bewerten. Realisierbare, aber suboptimale Abläufe sind in den Beispielen *aus Kapitel 4.5.3 Entscheidungsschwierigkeiten* erkennbar. Weitere Beispiele dazu sind der zufällige Bau einer Wand auf dem Baufeld oder die Verwendung eines einzelnen Schalungselements für eine Wand, wodurch der Bauprozess unterbrochen wird, solange die Schalung gebunden ist. Obwohl diese Vorgehensweisen grundsätzlich realisierbar sind, erweisen sie sich nicht als zeitlich optimal. Die Priorisierung eines einzelnen Prioritätswerts erscheint auf den ersten Blick als ein logischer und zielführender Schritt. In der klassischen Terminplanung gilt der kritische Pfad als zentrale Steuereinheit. Bauteile entlang dieses Pfades werden bevorzugt und möglichst früh eingeplant. Doch gerade diese intuitive Vorgehensweise kann in manchen Fällen zu problematischen Ablaufvarianten führen. Ein Beispiel dafür ist das im Kapitel Entscheidungsschwierigkeiten beschriebene Szenario, bei dem eine Gebäudeseite vollständig fertiggestellt wird, während die andere Seite kaum begonnen ist. Solche Situationen entstehen, wenn die Priorisierung ausschliesslich auf den kritischen Pfad ausgerichtet ist, der in diesem Fall entlang der ersten Hälfte des Gebäudes verläuft.

Diese Beispiele zeigen, dass ein einzelner Prioritätswert in der Ablaufgenerierung nicht isoliert betrachtet werden darf. Eine ausgeglichene Gewichtung mehrerer Parameter ist entscheidend, um Bauabläufe zu erzeugen, die sowohl realisierbar als auch optimiert sind.

Ein brauchbarer Bauablauf vereint daher zwei Qualitäten:

Er ist realisierbar und zugleich optimiert.



Damit das Programm einen brauchbaren Ablauf generieren kann, müssen zunächst die realisierbaren Parameter (Bedingungen) erfüllt sein. Diese Parameter bilden die primäre Voraussetzung für das Programm. Die Optimierung (Prioritätswerte) hingegen basiert auf zusätzlichen, optionalen Anforderungen, die es der Software ermöglichen, Varianten hinsichtlich Zeit, Ressourcen und Ablauflogik zu verbessern.

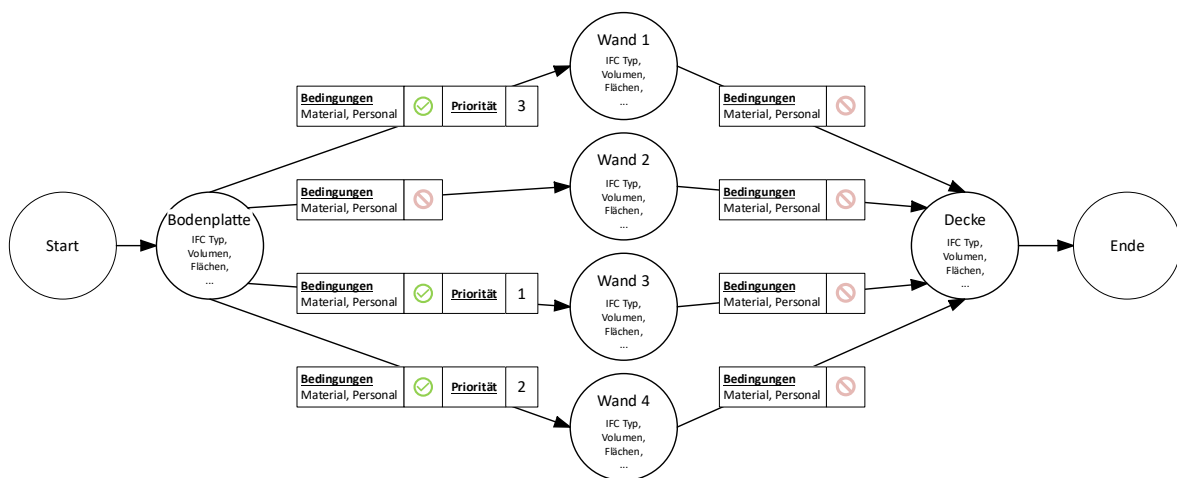


Abbildung 50 Prioritätswerte in der Ansicht des Netzwerkes

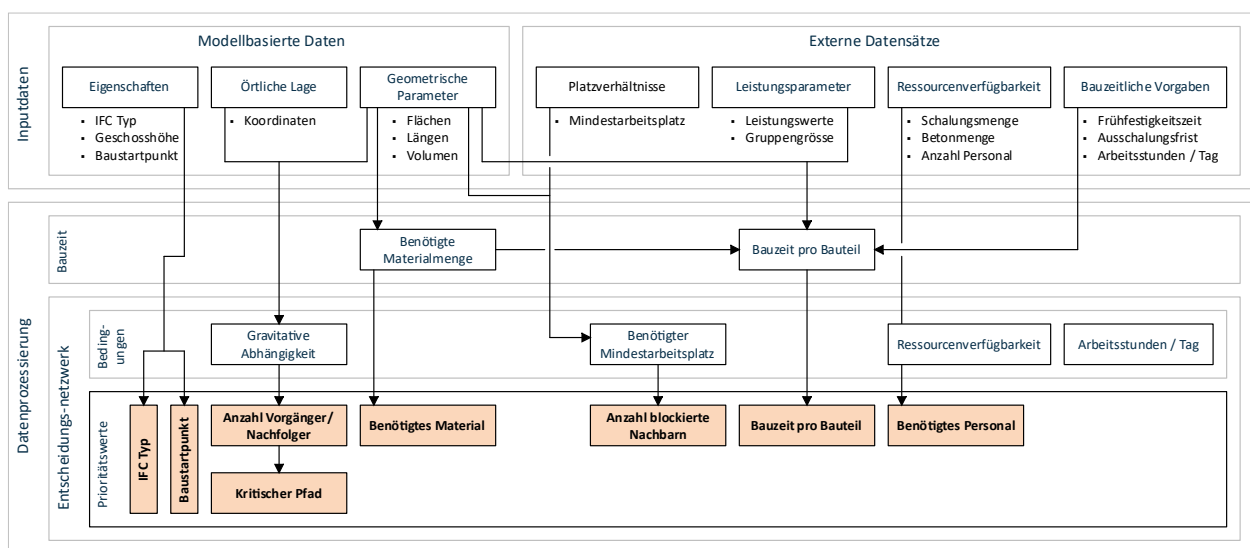


Abbildung 51 Prioritätswerte in der Ansicht der Programmausführung

4.5.6 Entscheidungsnetzwerk

Nachdem alle Komponenten definiert und vorbereitet sind, kann nun das vollständige Entscheidungsnetzwerk aufgebaut werden. Das Entscheidungsnetzwerk besteht aus drei zentralen Komponenten: den Elementen des Netzwerks (Bauteile), den Bedingungen (gewichtete Kanten) und den Prioritätswerten (Priorisierung der gewichteten Kanten). Von jedem Bauteil führen potenziell Verbindungen zu allen anderen Bauteilen, die unter Berücksichtigung der bestehenden Abhängigkeiten als nächstmögliche Schritte infrage kommen. An diesen Kanten sind sämtliche Informationen hinterlegt, die für die Ausführung des nächsten Bauteils erforderlich sind.

4.5.6.1 Knoten

Die Knoten im Netzwerk enthalten sämtliche Informationen zum jeweiligen Element.

Allgemeine Elementinformationen	
Identifikationsnummer	Eindeutige Kennung des Elementes innerhalb des Entscheidungsnetzwerks
GUID	Globale Identifikation des Elementes zur Verknüpfung mit dem digitalen Modell
Element (CAD)	CAD-Objekt, das mit dem Netzwerk verknüpft ist, um Interaktionen mit dem Modell zu ermöglichen
Bauteilname	Bezeichnung des Bauteils, die nicht eindeutig ist, jedoch für Menschen besser erkennbar sind
IFC-Typ	Klassifikation des Bauteils gemäss IFC-Standard
RGB-Farbe	Farbwert zur visuellen Darstellung des Bauteils in der Interaktionsoberfläche
Geometriebezogene Informationen	
Koordinaten	Ortung des Elementes im Raum (xmin, xmax, ymin, ymax, zmin, zmax)
Zentrumspunkt	Geometrischer Mittelpunkt des Elementes zur Distanzermittlung
Geschosshöhe	Numerische Höhenangabe zur Geschosszuordnung, da Geschossnamen nicht eindeutig sind
Abhängigkeitsbezogene Informationen	
Mindestarbeitsplatz	Erforderlicher Mindestplatz zur Ausführung des Elementes
BoundingBox des Elements	

Boundingbox mit vertikalem Offset	Erweiterte Boundingbox in z-Richtung zur Ermittlung gravitativer Abhängigkeiten und Mindestarbeitsplatzes
Boundingbox mit horizontalem Offset	Erweiterte Boundingbox in xy-Ebene zur Ermittlung gravitativer Abhängigkeiten und Mindestarbeitsplatzes
Vorgängerelemente	Alle Elemente, die vor dem aktuellen Element fertiggestellt sein müssen
Nachfolgerelemente	Alle Elemente, die nach Fertigstellung freigegeben werden können
Blockierte Elemente	Elemente, die während der Bearbeitung des aktuellen Elementes blockiert sind
Kritisches Element	Kennzeichnung, ob das Element Teil des kritischen Pfads ist
Materialberechnungen	
Volumen	Berechnetes Volumen des Elementes zur Ermittlung des Materialbedarfs
Vertikale Flächen	Berechnete vertikale Flächen zur Materialermittlung
Horizontale Flächen	Berechnete horizontale Flächen zur Materialermittlung
Benötigte Schalfläche	Benötigte Schalfläche aufgrund des IFC-Typs
Benötigte Bewehrung	Benötigter Bewehrungsbedarf aufgrund des IFC-Typs
Benötigter Beton	Benötigte Betonmenge basierend auf dem Volumen
Leistungswerte und Personalbedarf	
Leistungswert Scharbeiten	Leistungswert pro Arbeiter für Schalungsarbeiten
Leistungswert Bewehrungsarbeiten	Leistungswert pro Arbeiter für Bewehrungsarbeiten
Leistungswert Betonierarbeiten	Leistungswert pro Arbeiter für Betonierarbeiten
Personalbedarf Scharbeiten	Benötigte Anzahl Arbeitskräfte für Schalungsarbeiten
Personalbedarf Bewehrungsarbeiten	Benötigte Anzahl Arbeitskräfte für Bewehrungsarbeiten
Personalbedarf Betonierarbeiten	Benötigte Anzahl Arbeitskräfte für Betonierarbeiten
Zeitbezogene Informationen	
Dauer Scharbeiten	Ausführungsdauer der Schalungsarbeiten pro Arbeitsgruppe

Dauer Bewehrungsarbeiten	Ausführungsdauer der Bewehrungsarbeiten pro Arbeitsgruppe
Dauer Betonierarbeiten	Ausführungsdauer der Betonierarbeiten pro Arbeitsgruppe
Dauer HKSL-Arbeiten	Zusätzliche Dauer für haustechnische Arbeiten in Abhängigkeit des IFC-Typs
Frühfestigkeitszeit	Dauer, bis die nächstmöglichen Arbeiten auf dem aktuellen Element möglich sind nach der Betonage
Ausschalfristen	Dauer bis zur Entfernung der Schalung nach der Betonage
Gesamtdauer	Gesamte Bauzeit des Bauteils inklusive aller Arbeitsschritte und Ausschalfrist

4.5.6.2 Kanten

Die Kanten stellen die möglichen Übergänge zwischen Bauteilen dar und beeinflussen, abhängig von den daran verknüpften Informationen, die Entscheidungslogik des Programms. Dabei werden zwei getrennte Informationsgruppen mit den Kanten verknüpft. Einerseits Parameter zur Prüfung der im *Kapitel 4.3.2.4 Ressourcenverfügbarkeit* beschriebenen Einschränkungen, andererseits Parameter zur Priorisierung gemäss den im *Kapitel 4.5.5 Prioritätswerte* definierten Kriterien.

4.5.6.2.1 Parameter zu den Bedingungen

Die Informationsgruppe der Bedingungen dient der Prüfung, ob ein Bauteil zum aktuellen Zeitpunkt ausführbar ist.

Abhängigkeitsbezogene Informationen	
Vorgängerstatus (ja/nein)	Zeigt an, ob das aktuelle Element ein direkter Vorgänger des Zielelementes und das Zielelement nach der Fertigstellung freigeben
Nachfolgerstatus (ja/nein)	Zeigt an, ob das aktuelle Element ein direkter Nachfolger des Zielelementes ist und nach dessen Fertigstellung freigegeben wird
Blockierungsstatus (ja/nein)	Zeigt an, ob das aktuelle Element während seiner Ausführung das Zielelement blockiert
Geschosshöhe	Dient zur Prüfung von Ausführungsrestriktionen, z. B. sicherheitsrelevante Höhenbegrenzungen

Ressourcenbezogene Informationen	
Personalbedarf Schalarbeiten	Anzahl benötigter Arbeitskräfte für die Schalungsarbeiten am Zielelement
Personalbedarf Bewehrungsarbeiten	Anzahl benötigter Arbeitskräfte für die Bewehrungsarbeiten am Zielelement
Personalbedarf Betonierarbeiten	Anzahl benötigter Arbeitskräfte für die Betonierarbeiten am Zielelement
Benötigte Schalfläche	Benötigte Schalung zur Erstellung des Zielelementes
Benötigte Bewehrung	Benötigte Bewehrung zur Erstellung des Zielelementes
Benötigter Beton	Benötigte Betonmenge zur Erstellung des Zielelementes

4.5.6.2.2 Parameter zur Priorisierung

Die Informationsgruppe der Prioritätswerte bestimmt aus der Gruppe der ausführbaren Bauteile, welches Bauteil aufgrund der eingestellten Priorisierung als nächstes ausgeführt werden soll.

Kritischer Pfad (ja/nein)	Zeigt an, ob das Zielelement Teil des kritischen Pfads ist
Bauzeit des Elementes	Dauer zur Ausführung des Zielelementes
Anzahl Nachfolgeelemente	Anzahl aller Elemente, die durch die Fertigstellung des Zielbauteils freigeschaltet werden
Anzahl Vorgängerelemente	Anzahl aller Elemente, die vor dem Zielbauteil abgeschlossen sein müssen
Anzahl blockierte Elemente	Anzahl aller Elemente, die während der Ausführung des Zielbauteils blockiert sind
IFC-Typ	Zur Priorisierung von IFC-Typen
Distanz zum Startpunkt	Entfernung des Zielelementes zum definierten Bauanfangspunkt
Distanz zum nächsten Element	Entfernung des Zielelementes zum aktuellen Element

4.5.6.3 Funktionsweise Entscheidungsnetzwerk

Mit dem Aufbau des Entscheidungsnetzwerks wird die Grundlage geschaffen, um verschiedene Bauablaufvarianten automatisch zu generieren. Neben den Informationen im Netzwerk wird für jeden Ablauf übergeordnet eine verfügbare Ressourcenmenge festgelegt.

Die Erstellung einer Ablaufvariante erfolgt über eine rekursive Iteration, die in die folgenden Schritte gegliedert ist:

1. Freischaltung ausführbarer Bauteile unter Berücksichtigung der Bedingungen:

Alle Bauteile, die die definierten Bedingungen erfüllen, werden in die "Gruppe zur Baufreigabe" aufgenommen.

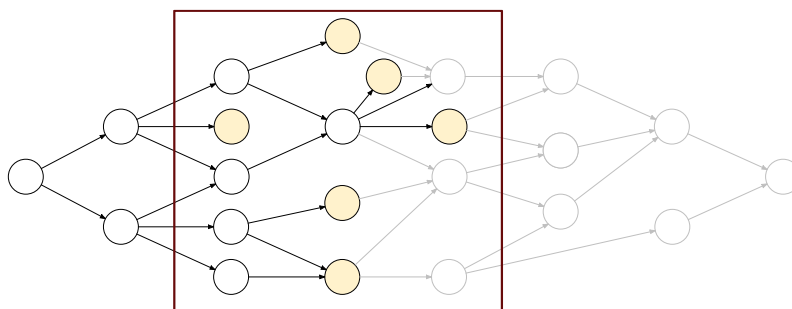


Abbildung 52 Beispielhafte Visualisierung der Limitierung im Netzwerk

2. Priorisierung der freigegebenen Bauteile:

Die Bauteile in der Gruppe werden anhand vordefinierter Prioritätskriterien bewertet und in eine Ausführungsreihenfolge gebracht.

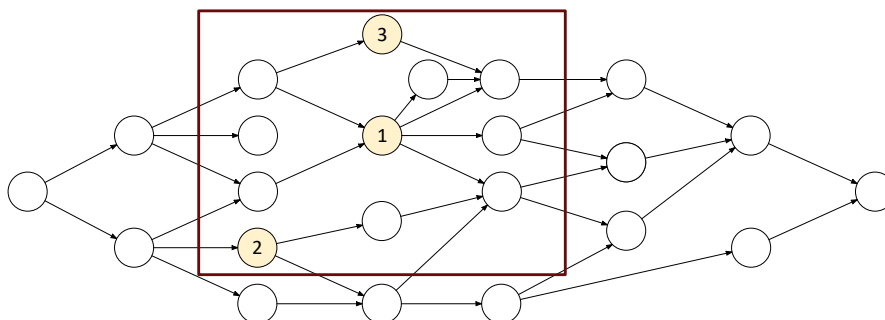


Abbildung 53 Priorisierung im Netzwerk

3.1 Ausführung eines Bauteils:

Wird ein Bauteil zur Ausführung ausgewählt, wird auf Basis der zugeordneten Dauer und der eingesetzten Ressourcen bestimmt, wann Personal und Schalung wieder verfügbar sind.

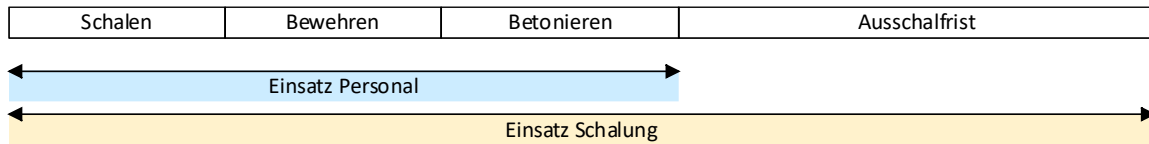


Abbildung 54 Einsatzblöcke eines Bauteils

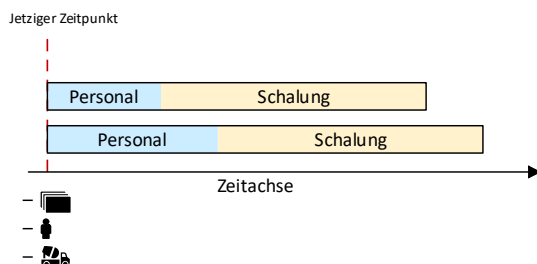


Abbildung 55 Ressourcenzuweisung zweier Bauteile

3.2 Blockierung von Bauteilen:

Bauteile, die durch die Ausführung des gewählten Elements blockiert werden, werden aus der "Gruppe zur Baufreigabe" entfernt.

3.3 Iterationsschritt

Innerhalb von Schritt 3 werden die Bauteile gemäss der Prioritätsreihenfolge ausgeführt, bis die jeweiligen Limitierungen erreicht sind oder keine freigegebenen Bauteile mehr vorhanden sind. Können mehrere Bauteile in diesem Schritt ausgeführt werden, so erfolgt deren Bau parallel.

4. Freigabe von Ressourcen und blockierten Bauteilen

Nach Abschluss eines Bauteils werden die gebundenen Ressourcen, blockierten Bauteile und Nachfolger freigegeben.

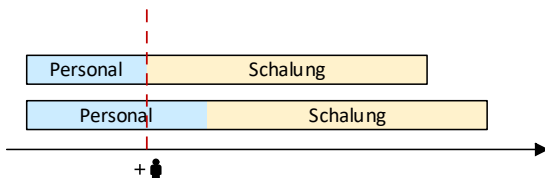


Abbildung 56 Ressourcenfreigabe des Personals

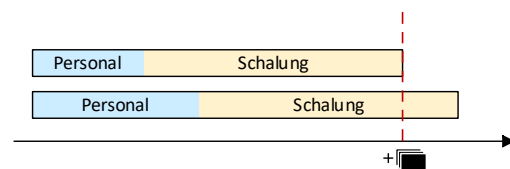


Abbildung 57 Ressourcenfreigabe der Schalung

Der Prozess startet erneut mit dem ersten Schritt und die Iteration wird fortgesetzt, bis alle Bauteile verarbeitet wurden.

Für Bauteile, die als direkter Nachfolger ihres eigenen Vorgängers ausgeführt werden, muss Folgendes beachtet werden: Bauteile, die direkt auf ein fertiggestelltes Element folgen, dürfen erst gebaut werden, wenn die erforderliche Frühfestigkeitszeit des vorherigen Bauteils erreicht ist.

Nächstes Bauteil ist kein direkter Nachfolger

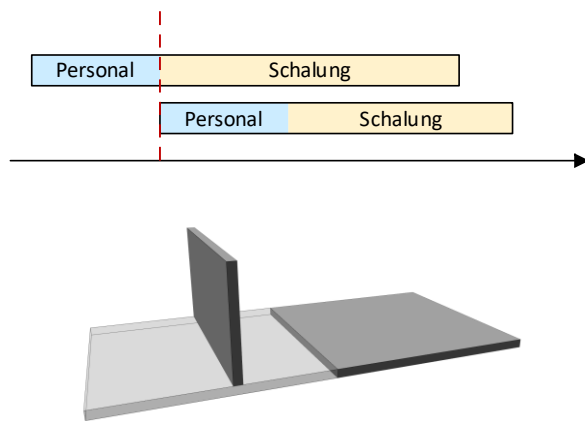


Abbildung 58 Aufeinanderfolge nicht direkter Nachfolger

Nächstes Bauteil ist direkter Nachfolger

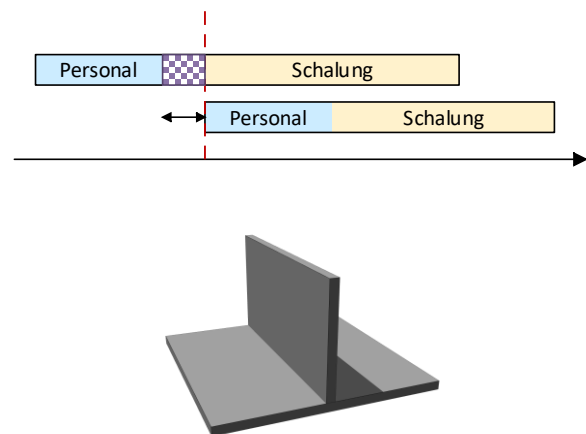


Abbildung 59 Aufeinanderfolge direkter Nachfolger

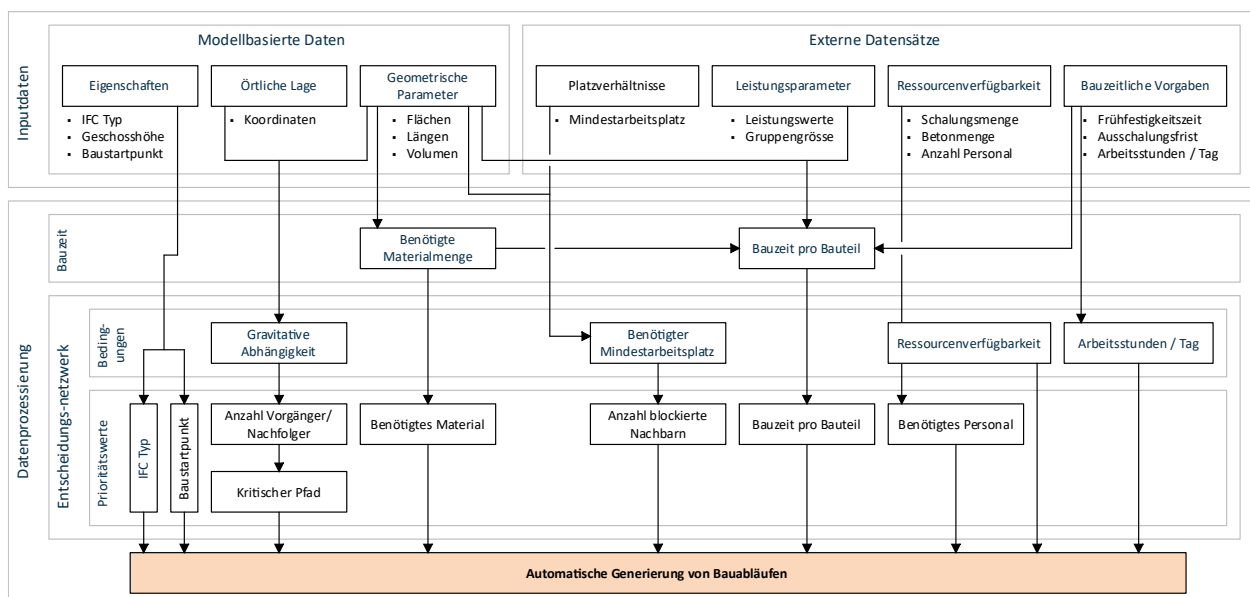


Abbildung 60 Vollständige Übersicht der Datenprozessierung

4.6 Output

Die Erstellung eines Bauprogramms stellt in der Praxis häufig eine Herausforderung dar, insbesondere im Hinblick auf die transparente Darstellung der zeitlichen und ressourcentechnischen Zusammenhänge. Diese Transparenz ist nicht nur für die Person relevant, die das Programm erstellt, sondern auch für alle weiteren Beteiligten, die den Bauablauf nachvollziehen und die Entscheidungsprozesse verstehen müssen.

Der Output des Programms soll dem Benutzer daher das Verständnis dieser Zusammenhänge ermöglichen. Die Implementierung des Benutzerfensters soll eine Entscheidungsgrundlage bieten, um eine geeignete Ablaufvariante auszuwählen und bei Bedarf weitere Varianten mit geänderten Eingabewerten zu generieren.

Voraussetzung dafür ist eine übersichtliche Darstellung des Bauablaufs sowie eine nachvollziehbare Ansicht der Berechnungen und Zusammenhänge. Der Output umfasst zwei Darstellungsformen: erstens ein Paretofront-Diagramm, das alle berechneten Varianten visualisiert, und zweitens eine detaillierte Übersicht des Bauablaufs für eine ausgewählte Variante.

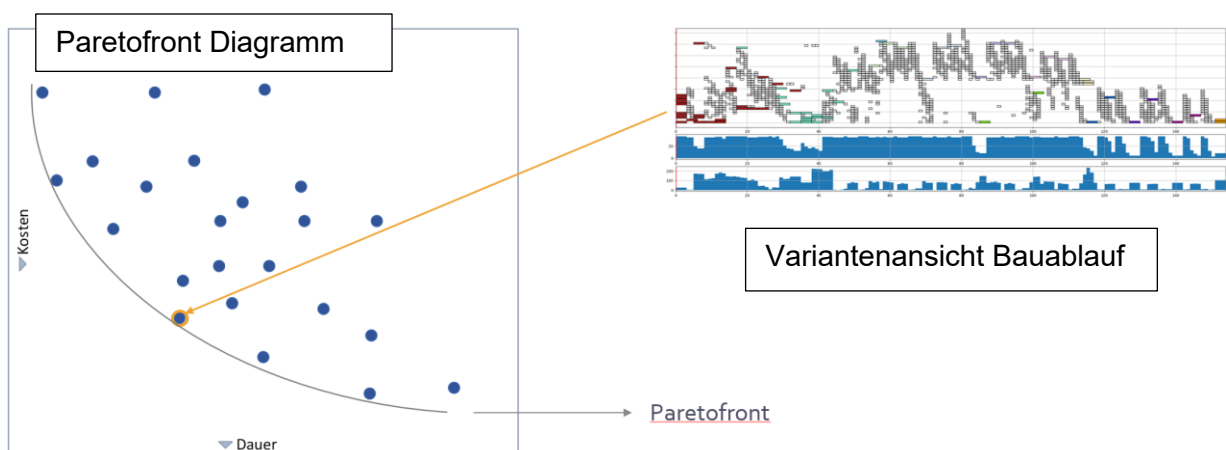


Abbildung 61 Dialog zwischen dem Benutzerfenster Paretofront-Diagramm und der Variantenansicht

4.6.1 Paretofront Diagramm

Das Punktdiagramm mit der Paretofront bietet eine Übersicht über alle berechneten Varianten. Die Achsen des Diagramms repräsentieren die Kriterien Kosten und Dauer. Jede Variante wird als einzelner Punkt dargestellt, wobei die Position durch die Gesamtdauer der Ausführung und die variablen Gesamtkosten bestimmt wird. Diese Ansicht dient als erste Filterstufe, um die Anzahl auszuwertender Ablaufvarianten zu reduzieren. Varianten, die bestimmte Anforderungen nicht erfüllen, wie etwa die maximale Bauzeit oder ein vorgegebenes Kostenlimit, können über das Diagramm visuell ausgeschlossen werden. Varianten auf der Paretofront zeichnen sich durch ein optimales Verhältnis beider Kriterien aus. Die Auswahl einer Variante entlang der Paretofront gewährleistet somit eine der optimalen Lösungen (siehe Abbildung 63). Diese Arbeitsmethode reduziert die Anzahl der zu bewertenden Optionen erheblich und spart Zeit bei der Entscheidungsfindung.

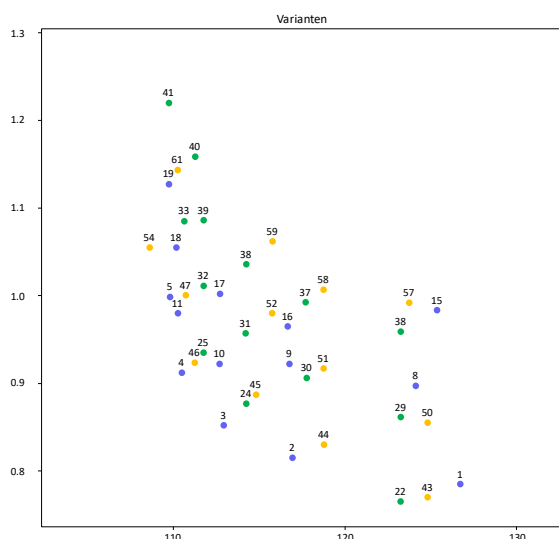


Abbildung 62 Varianten dargestellt im Punktdiagramm

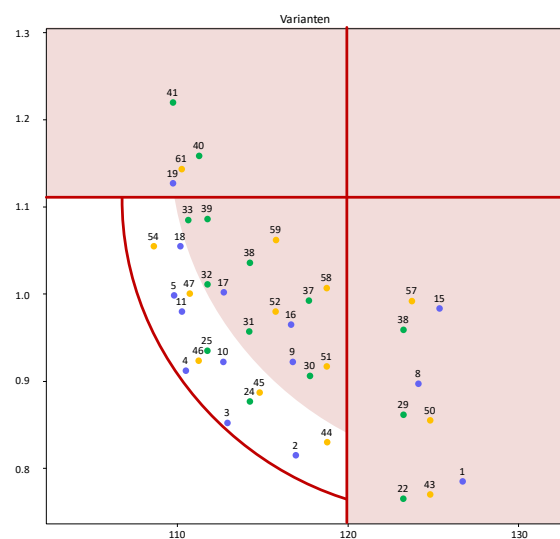


Abbildung 63 Eingrenzung der Varianten

Das Diagramm ist interaktiv gestaltet und stellt eine direkte Verbindung zwischen der Übersicht aller Varianten und den Detailinformationen her. Jeder Punkt im Diagramm ist ein Interaktionselement und ist mit der jeweiligen Variante verknüpft. Ein Klick auf einen Punkt öffnet somit die Detailansicht zum Bauprogramm der ausgewählten Variante.

Diese direkte Verknüpfung zwischen Übersicht und Detailansicht soll den Benutzer:innen dabei unterstützen, effizient geeignete Varianten zu identifizieren und verschiedene Varianten miteinander vergleichen zu können. Des Weiteren können die zugrunde liegenden Kennwerte wie Bauzeit, Kosten und Ressourcenauslastung überprüft werden, ohne lange Listen durchsuchen zu müssen.

4.6.2 Variantenansicht

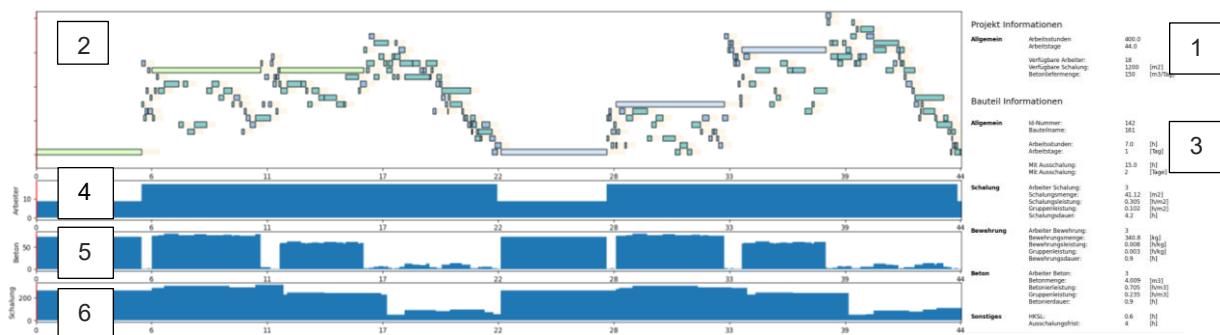


Abbildung 64 Benutzerfenster zur Übersicht der generierten Variante

Wird eine Variante aus dem Paretofront-Diagramm ausgewählt, öffnet sich das Benutzerfenster mit dem Bauablauf als modifiziertes Gantt-Diagramm und weiteren Informationen zur Variante. Dieses Fenster bietet eine strukturierte Übersicht über die relevanten Informationen zur ausgewählten Variante und gliedert sich in fünf Hauptbereiche:

- (1) Übergreifende Informationen zur Variante, (2) Modifiziertes Gantt-Diagramm des Bauablaufs, (3) Detailansicht eines Bauteils, (4) Ansicht Personalbedarf, (5) Ansicht Schalungsbedarf und (6) Ansicht Betonbedarf.

4.6.2.1 Übergreifende Informationen zur Variante

In der Ansicht der übergreifenden Informationen sind die ausschlaggebenden Kennwerte einer Variante aufgelistet. Dazu gehört die Gesamtdauer der Ausführung, die täglichen Arbeitsstunden sowie die Limitierungen der Ressourcenkapazitäten. Diese Limitierungseinstellungen zeigen wie viel Schalung, Beton und Personal für das Projekt verfügbar ist und unter welchen Rahmenbedingungen die Variante entstanden ist.

Die Bauzeit in Stunden oder Tagen definiert die Projektdauer, während die Lohnstunden die gesamten Arbeitsstunden des eingesetzten Personals abbilden. Auf Basis der Lohnstunden werden die Personalkosten berechnet. Die Miete der Schalungssysteme wird hingegen über die Bauzeit kalkuliert. Da Materialkosten in der Regel unabhängig von der Projektdauer konstant bleiben, sind ausschliesslich die zeitabhängigen Kosten für Personal und Schalung entscheidend. Die Summe dieser beiden Kosten ergibt wiederum die Kosten, die im Paretofront-Diagramm angezeigt werden.

4.6.2.2 Modifiziertes Gantt-Diagramm

Die Darstellung des Bauablaufs erfolgt in Form eines interaktiven, modifizierten Gantt-Diagramms. Im Gegensatz zur klassischen Darstellung liegt die Zeitachse ausschliesslich horizontal auf der y-Achse, während die x-Achse die einzelnen Bauteile zeigt. Diese Anordnung wurde so gewählt, dass ein vollständiger Überblick ohne horizontales Scrollen möglich ist.

In herkömmlichen Gantt-Diagrammen wird meist nur der Zeitblock der Arbeitstätigkeiten des Personals dargestellt, bzw. die Phase, in der das Personal aktiv beschäftigt ist. Diese Information bildet zwar die wichtigsten Arbeitsschritte bei der Realisierung eines Bauteils, lässt jedoch keine Rückschlüsse auf die Nutzung der Schalung und deren zeitliche Bindung zu. Die hier verwendete Darstellung geht einen Schritt weiter: Sie berücksichtigt zusätzlich die Ausschallfristen und macht damit die Verfügbarkeit der Schalung transparent nachvollziehbar.

In der Abbildung 65 sind die Arbeitsstunden des Personals in der Farbe des Bauteils in Grau visualisiert und die Zeit der Schalungsnutzung bzw. der anschliessenden Ausschallfrist in Beige. Mit dieser erweiterten Anzeige wird ersichtlich, weshalb bestimmte Bauteile nicht sofort ausgeführt werden können. Sie zeigt beispielsweise, wann ein Bauteil auf die Freigabe der Schalung warten muss oder warum Wände in der Nähe einer noch eingeschalteten Wand nicht begonnen werden dürfen.

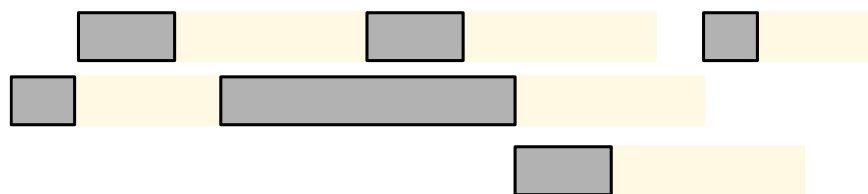


Abbildung 65 Darstellung Arbeitsschritt des Personals in Grau und die Ausschallfrist in Beige

Der Bauablauf in Form des Gantt-Diagramms ist ebenfalls interaktiv. Jedes Bauteil in dieser Ansicht ist ein Interaktionselement und selektierbar. Die Bauteile sind direkt mit dem CAD-Modell verknüpft und bilden somit eine Brücke zwischen Gantt-Diagramm und Modell. Bei der Auswahl eines Bauteils wird dieses im CAD-Modell hervorgehoben. Gleichzeitig erscheinen in der rechten Informationsspalte die wichtigsten Kennwerte des ausgewählten Bauteils. In der folgenden Abbildung ist die Selektion eines Bauteils im Gantt-Diagramm dargestellt, zusammen mit der Hervorhebung des entsprechenden Elements in der CAD-Umgebung.

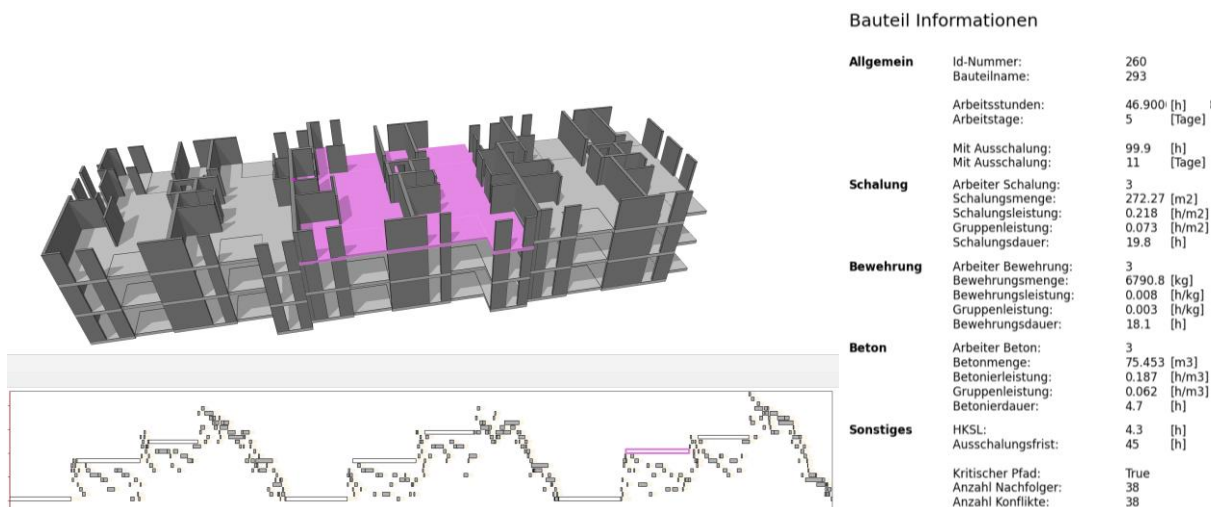


Abbildung 66 Selektion eines Bauteils im interaktiven Gantt-Diagramm und Hervorhebung des Bauteils in der CAD-Umgebung

4.6.2.3 Bauteil Detailansicht

Wird ein Bauteil selektiert, erscheinen die wichtigsten Kennwerte zur Bauzeitberechnung in der Detailansicht des Bauteils. Diese Informationen bilden die Grundlage der zeitlichen Berechnungen und erhöhen die Nachvollziehbarkeit.

Diese Informationen sind unterteilt in:

Allgemeine Informationen	Bauzeit und Identifizierung des Bauteils
Daten zur Schalungsarbeit	Personalbedarf, Menge, Leistungswerte und Dauer
Daten zur Bewehrungsarbeit	Personalbedarf, Menge, Leistungswerte und Dauer
Daten zur Betonierarbeit	Personalbedarf, Menge, Leistungswerte und Dauer
Sonstiges	Ausschalungsfrist Frühfestigkeitszeit HLKSE [%] Dauer HLKSE-Arbeiten Puffer [%]

4.6.2.4 Ressourcenbedarf

Unterhalb der Bauprogrammansicht befindet sich die grafische Darstellung der Ressourcenverteilung über die gesamte Bauzeit. Die Ressourcen Schalung, Beton und Personal werden tageweise in Form eines Balkendiagramms dargestellt.

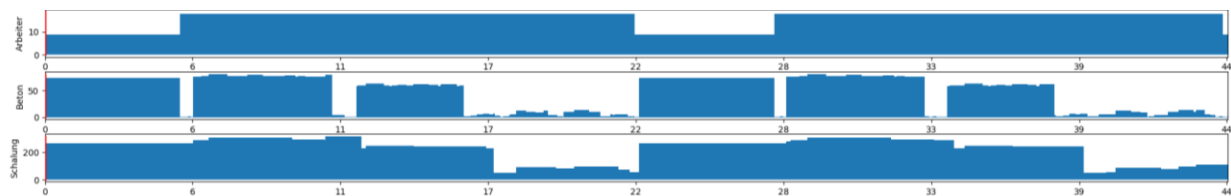


Abbildung 67 Ansicht Ressourcenbedarf Schalung, Beton und Personal

Diese Visualisierung ermöglicht eine Erkennung der Kapazitätsauslastungen über die gesamte Projektlaufzeit. Sobald die maximal verfügbaren Mengen einer Ressource erreicht sind, wird dies deutlich sichtbar und kann mit dem darüberliegenden Bauablauf verglichen werden. Über die Detailinformationen zu den Bauteilen lässt sich zudem nachvollziehen, welches Element für die jeweilige Ressourcenbindung verantwortlich ist.



Abbildung 68 Schwankungen in der Schalungsnutzung

Durch die Möglichkeit, die obere Kapazitätsgrenze individuell anzupassen, kann die Ressourcenauslastung über die gesamte Projektdauer gezielt gesteuert werden. Dies ist insbesondere dann hilfreich, wenn starke Schwankungen in der Ressourcennutzung auftreten, die zu ineffizienten Bauphasen oder Engpässen führen könnten. In der folgenden Abbildung wird ein Beispiel für solche Schwankungen dargestellt.

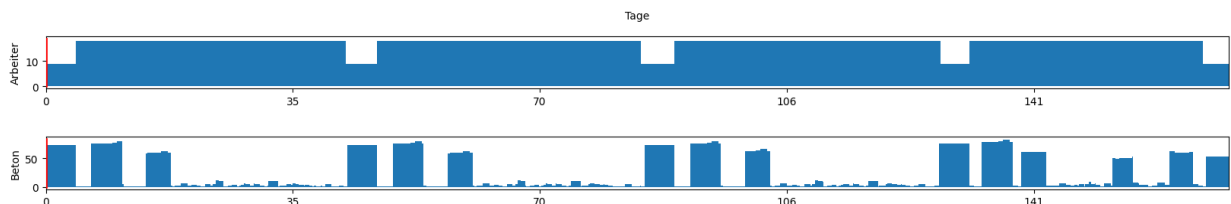


Abbildung 69 Starke Auslastung des Personals mit starken Schwankungen in der Betonnutzung

5 Modellvoraussetzungen

Damit das Programm zuverlässig eingesetzt werden kann, müssen bestimmte modellbezogene Voraussetzungen erfüllt sein. Die Voraussetzungen lassen sich in zwei zentrale Kategorien gliedern: Zum einen existieren erforderliche Voraussetzungen, die zwingend notwendig sind, damit das Programm korrekt funktioniert. Die erforderlichen Voraussetzungen werden durch die Zusammenstellung der Bauzeit und die Bedingungen vorgegeben. Zum anderen gibt es optionale Voraussetzungen, die der Optimierung des Bauprogramms dienen. Diese optionalen Voraussetzungen werden über die Prioritätswerte definiert.

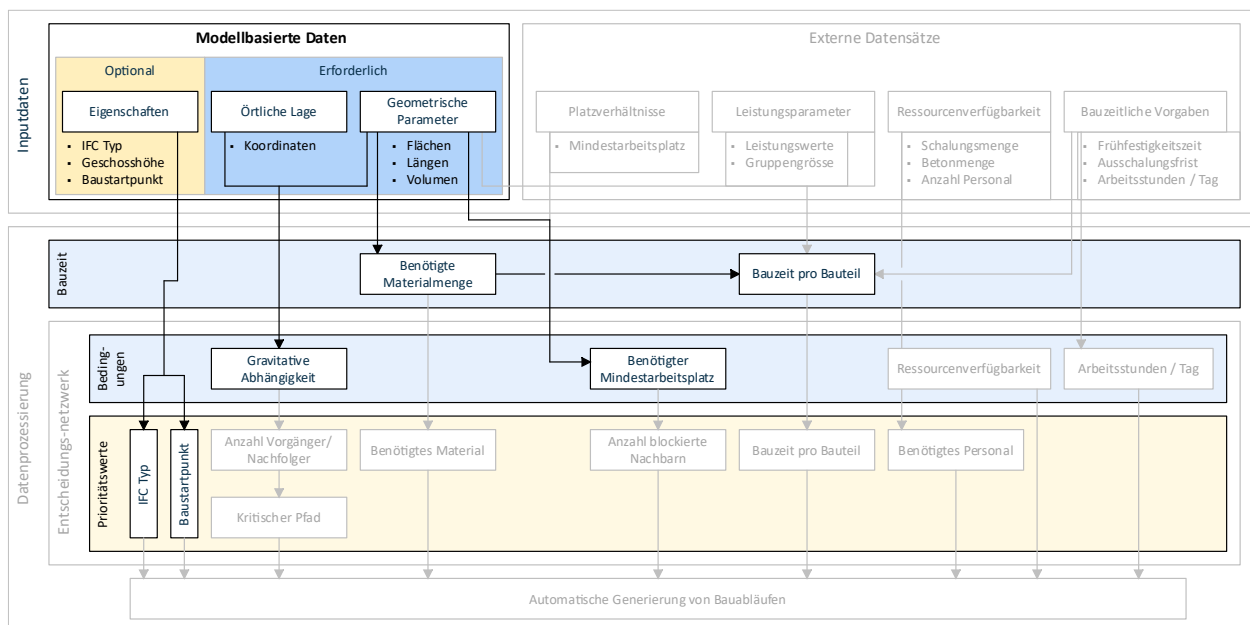


Abbildung 70 Geometrische Informationen für die erforderlichen und Eigenschaftsinformationen für optionale Voraussetzungen

5.1 Erforderliche Voraussetzungen

Keine räumlich kollidierenden Bauteile:

Bauteile dürfen sich nicht überschneiden oder räumlich kollidieren, da dies zu Fehlern bei der Analyse der Mindestarbeitsfläche sowie bei gravitationsbasierten Berechnungen führt.

Vollständig geschlossene Flächen:

Alle Flächen müssen geschlossen sein, sodass die Bauteile als Volumenkörper erkannt werden. Offene Geometrien führen zu fehlerhaften Mengenberechnungen und inkorrektur Erkennung der gravitativen Abhängigkeiten.

Korrekte Lagerung der Bauteile:

Für die Erkennung gravitativer Abhängigkeiten wurde eine Toleranz von 10 cm definiert. Innerhalb dieses Bereichs werden Bauteile noch als aufeinanderliegend interpretiert. Überschreiten Bauteile diese Toleranz, gelten sie als "schwebend" oder Starterbauteil, was die automatische Analyse gravitativer Abhängigkeiten verhindert.

Plausible Volumenwerte:

Bei parametrischen Elementen wie Treppen kann es zu verfälschten Volumenwerten kommen. In solchen Fällen ist es erforderlich, die Bauteile in standardisierte Volumenkörper zu überführen. Die Interpretation der Volumenkörper hängt jedoch von der verwendeten Software ab.

5.2 Optionale Voraussetzungen

Korrekte IFC-Typen:

Das Programm unterstützt aktuell die IFC-Typen *IfcFooting*, *IfcWall*, *IfcSlab*, *IfcBeam* und *IfcColumn*. Nur Bauteile, die diesen Typen zugeordnet sind, erhalten die passenden Leistungswerte und Ressourcen. Werden falsche Typen verwendet, kann das Programm zwar weiterhin ausgeführt werden, jedoch mit inkorrekten Leistungswerten.

Geschosshöhen:

Die Geschosse sollten mit den entsprechenden Höhenangaben hinterlegt sein. Diese Information wird genutzt, um die Einhaltung der SUVA-Richtlinien zu prüfen, nach denen nicht mehr als eine bestimmte Anzahl offener Geschosse gleichzeitig gebaut werden darf. Fehlen diese Angaben oder befinden sich mehrere Geschosse auf derselben Höhe, interpretiert das Programm sie als ein einziges Geschoss und kann die Limitierung nicht korrekt berücksichtigen.

Betonage-Etappe:

Jedes Bauteil repräsentiert eine Betonier-Etappe, d. h. was in einem einzelnen Arbeitsgang betoniert wird. Für jedes einzelne Bauteil werden die Berechnungen für Schalung, Ausschalfrist, blockierte Nachbarelemente und Abbindezeit separat durchgeführt. Werden die Etappengrößen nicht bereits im Modell vorgegeben, kann dies dazu führen, dass die berechnete Bauzeit und der Ablauf von der tatsächlichen Ausführung abweichen.

6 Resultate

Die Auswertung des entwickelten Programms erfolgte im Rahmen dieser Arbeit anhand eines einzigen vollständigen Bauprojekts. Für eine umfassende Validierung und Kalibrierung wäre eine grössere Anzahl an Projekten erforderlich. Während der Implementierungsphase wurden zwar wiederholt einzelne Abschnitte verschiedener Bauprojekte getestet, doch diese Tests dienten ausschliesslich der Überprüfung von Standardwerten und der Funktionslogik. Eine vollständige Analyse eines kompletten Bauprojekts wurde erstmals im Zuge dieser Thesis durchgeführt. Aufgrund der zeitlichen Begrenzung der Thesis beschränkte sich die Untersuchung auf ein Projekt. Trotz dieser Einschränkung liefert die Analyse bereits erste Erkenntnisse über die Praxistauglichkeit des Programms.

6.1 Ausführungsprojekt Schärenmoos

Das Ausführungsprojekt umfasst die Wohnüberbauung K4 Schärenmoos in Zürich, realisiert im Auftrag des Bauherrn Luegisland. Der Rohbau wird von der Marti Bauunternehmung AG Zürich ausgeführt und befindet sich bereits in der abschliessenden Phase (Baugenossenschaft Luegisland Zürich, 2024).

Für die Ausführung wurde ein BIM-Modell bereitgestellt, das als Grundlage für die Mengenermittlung diene. Es handelt sich dabei um ein Hochbauprojekt mit dem Schwerpunkt auf der Stahlbetonbauweise. Der Anteil an Fertigbauelementen ist gering und die Bauteile weisen eine übliche Geometrie auf, die häufig eingesetzt wird. Daher können für die Berechnung der Bauzeiten Standardwerte verwendet werden, was den Vergleich mit dem Terminprogramm vereinfacht.

Die Wohnüberbauung besteht aus zwei Gebäuden A und B. Das Gebäude A wurde Mitte Oktober 2025 fertiggestellt, während für Gebäude B der Abschluss für Ende November 2025 vorgesehen ist. Für die Validierung wurde ausschliesslich Gebäude A nach Abschluss der Ausführung herangezogen, um aussagekräftige Vergleichswerte zu erhalten.

Die aktuellen Ausführungsdaten sind im Terminplan dokumentiert, einschliesslich der verwendeten Mengen und der einzelnen Bauetappen (siehe *Anhang 5*). Dadurch ermöglicht dieses Projekt einen direkten Vergleich zwischen den im Modell berechneten Bauzeiten und den tatsächlich realisierten Bauabläufen.

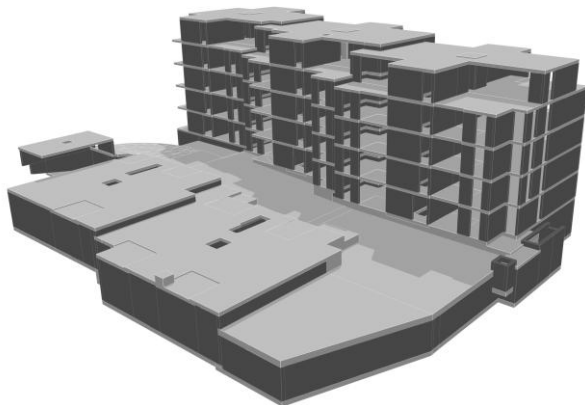


Abbildung 71 Schärenmoos Gebäude A

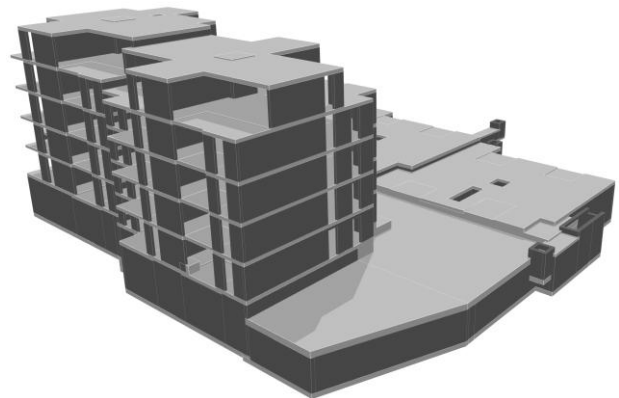


Abbildung 72 Schärenmoos Gebäude B

6.2 Vorgehen

Vor Beginn der Auswertung wurde das Modell an die vorausgesetzten Anforderungen angepasst. In Zusammenarbeit mit dem Bauführer wurden sämtliche Eingabedaten und Annahmen definiert, die als Grundlage für die Variantenbildung dienten. Um die Auswirkungen unterschiedlicher Prioritätsgewichtungen sichtbar zu machen, wurden eine Vielzahl Varianten mit verschiedenen Kombinationen generiert. Der Bauführer prüfte die Varianten und entschied sich für jene, die er als besonders praxisnah einstufte. Diese Auswahl legte schliesslich die Gewichtung der Prioritätswerte fest. Aufbauend auf dieser Regel wurden unter Berücksichtigung der variablen Inputwerte erneut sechs Varianten erzeugt.

Ziel war es, durch die verschiedenen Szenarien eine belastbare Aussage über die Auswirkungen unterschiedlicher Einflussfaktoren auf Bauzeit und Ablauf treffen zu können. Die Validierung der Ergebnisse erfolgte durch den Abgleich der berechneten Dauer mit dem effektiven Bauprogramm. Die daraus resultierenden Abweichungen wurden auf Gebäude-, Geschoss- und Bauteilebene analysiert.

6.3 Inputdaten

6.3.1 Statische Inputdaten

Aus dem Terminprogramm der Ausführung können folgende Informationen entnommen werden: Während der Intensivphase werden pro Tag maximal 150 m³ Beton eingebaut und gleichzeitig bis zu 1'200 m² Schalungsfläche pro Gebäude verwendet. Die tägliche Arbeitszeit beträgt 9 Stunden, von 08:00 bis 17:00. Aufgrund der angegebenen Lohnstunden können pro Gebäude mit zwei Arbeitsgruppen gerechnet werden. Die Anzahl der eingesetzten Arbeitskräfte variiert während der gesamten Bauzeit zwischen 15 und 21 Personen. Da das Programm nur einen festen Wert für die Personalverfügbarkeit zulässt, wurde ein Mittelwert von 18 Personen angenommen.

Statische Inputdaten:

- Materialmenge: aus dem Modell
- Etappierung der Decken: im Modell vorgegeben
- Arbeitsstunden pro Tag: 9 Stunden
- Betonliefermenge pro Tag: 150 m³
- Schalungsfläche pro Gebäude: 1'200 m²
- Personal: 18 Personen
- Ausschaltungsfrist Decken: 5 Tage
- Ausschaltungsfrist Wände: ½ Tag (nächster Tag)
- Leistungswerte: angenommene Werte aus der Praxis (durchschnittlicher Wert liegt bei SBV-Werten für mittelgrosse Baustellen)

6.3.2 Variable Inputdaten

Neben den fest definierten Eingabewerten, die vom Bauführer vorgegeben wurden, gab es auch variable Parameter, die sich nicht direkt in Zahlen fassen lassen. Ein Beispiel hierfür ist die Zeit für HLKSE-Arbeiten sowie der Pufferfaktor. Der Bauführer lieferte hierzu eine Annahme von 20%. Für die erste Auswertung wurde mit dem Pufferfaktor von 20 % gerechnet. Für die weiteren Analysen wurde dieser Wert variabel angepasst, um die Auswirkungen unterschiedlicher Szenarien sichtbar zu machen. Durch die Simulation mehrerer Varianten kann das Programm zeigen, wie empfindlich die Bauzeit auf solche Schwankungen reagiert.

Variable Inputdaten:

Puffer (HLKSE + Produktivitätsverlust): 0 – 20 %

Gruppengrösse pro Arbeitsschritt: 3 oder optimale Zusammensetzung

Da sowohl die HLKSE-bezogene Dauer als auch der Produktivitätsverlust als Faktoren auf die Arbeitszeit wirken, werden sie in dieser Betrachtung zu einem gemeinsamen Zeitfaktor zusammengeführt.

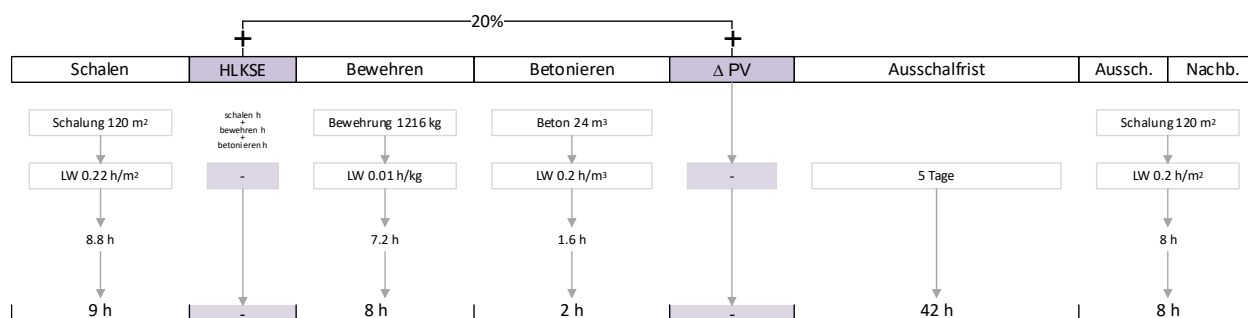


Abbildung 73 Prozentualer Zeitfaktor von 20% mit HLKSE + Produktivitätsverlust

6.3.3 Abgrenzungen

In der Analyse werden Abgrenzungen vorgenommen, um die Vergleichbarkeit der Terminzeiten sicherzustellen. Der Fokus liegt auf den Bauelementen aus Beton, die vor Ort ausgeführt werden. Zusätzlich zu den Mauerwerkswänden werden sämtliche Fertigbauteile von der Berechnung ausgeschlossen. Da es sich nur um eine geringe Anzahl an Bauteilen handelt, haben diese durch den nachträglichen Einbau nur einen geringen Einfluss auf die Terminplanung. Durch diesen Ausschluss kann eine vergleichbare Bewertung der Betonbauzeiten sichergestellt werden.

6.4 Auswertung

Für die Auswertung wurde zunächst die Gesamtdauer des Bauablaufs ermittelt, um eine übergeordnete Betrachtung zu ermöglichen. Ergänzend dazu erfolgte eine Detailbetrachtung der Dauer in einzelne Etappen und Bauteile, wie es bei der Erstellung eines Terminplans üblich ist. Diese kategorisierte Auswertung erlaubt eine gezielte Analyse der Ursachen möglicher Abweichungen und zeigt, an welchen Stellen die grössten Unterschiede zwischen den berechneten und den tatsächlichen Werten auftreten.

Für die erste Auswertung wurden folgende variable Inputdaten eingesetzt:

- Puffer (HLKSE + Produktivitätsverlust): 20%
- Gruppengrösse pro Arbeitsaktivität: 3 Schaler, 3 Eisenleger, 3 Betonierer

6.4.1 Gesamtbetrachtung

Die Gesamtbetrachtung beginnt mit den strukturierten Geschossen in der linken Spalte. Diese gliedert sich in zwei Ebenen: zuoberst die übergeordnete Darstellung des gesamten Gebäudes, gefolgt von der Detailbetrachtung einzelner Etappen auf Geschossebene. Die mittlere Spalte enthält die Zeitwerte aus dem effektiven Terminplan, während die Spalte „Programmdauer“ die berechneten Zeitwerte aus dem digitalen Modell und dem Ablaufprogramm abbildet. Ganz rechts wird die Abweichung zwischen den berechneten und den tatsächlichen Zeitwerten dargestellt.

Bezeichnung	Terminplan Dauer [Tage]	Programm Dauer [Tage]	Differenz [Tage]
Gebäude A	119	128	9
Erdgeschoss	40	43	3
Wände Etappe 1	8	6	-2
Decke Etappe 1	6	6	0
Wände Etappe 2	8	9	1
Decke Etappe 2	6	7	1
Wände Etappe 3	8	5	-3
Decke Etappe 3	6	6	0
1. Obergeschoss	39	52	13
Wände Etappe 1	8	5	-3
Decke Etappe 1	6	7	1
Wände Etappe 2	8	7	-1
Decke Etappe 2	6	6	0
Wände Etappe 3	7	5	-2
Decke Etappe 3	6	5	-1

Bezeichnung	Terminplan Dauer [Tage]	Programm Dauer [Tage]	Differenz [Tage]
2. Obergeschoss	38	59	21
Wände Etappe 1	8	12	4
Decke Etappe 1	6	6	0
Wände Etappe 2	8	8	0
Decke Etappe 2	6	7	1
Wände Etappe 3	8	6	-2
Decke Etappe 3	6	6	0
3. Obergeschoss	40	45	5
Wände Etappe 1	8	12	4
Decke Etappe 1	6	5	-1
Wände Etappe 2	8	7	-1
Decke Etappe 2	6	5	-1
Wände Etappe 3	9	8	-1
Decke Etappe 3	6	5	-1
Attika	37	36	-1
Wände Etappe 1	6	15	9
Decke Etappe 1	6	6	0
Wände Etappe 2	7	9	2
Decke Etappe 2	6	6	0
Wände Etappe 3	7	8	1
Decke Etappe 3	6	4	-2

Tabelle 14 Zeitdifferenz über das Gesamte Bauprojekt

Um die Zahlen verständlich zu interpretieren, werden gezielt einzelne Werte aus der Tabelle 14 herausgegriffen und separat analysiert. Den Einstieg bildet die Betrachtung der Dauer für das Gebäude A.

6.4.1.1 Gebäude A

Bei der Betrachtung des gesamten Gebäudes ergibt sich eine Differenz von 9 Tagen zwischen der effektiven Dauer von 119 Tagen und der berechneten Programmdauer von 128 Tagen. Dies entspricht einer Abweichung von +8%. Der ermittelte Wert liegt damit innerhalb des erwarteten Toleranzbereichs, der in der Bauausführung typischerweise bei rund 10% angenommen wird.

Bezeichnung	Terminplan	Programm	Differenz	Abweichung
Gebäude A	119	128	9	8%

Tabelle 15 Zeitdifferenz von Gebäude A

6.4.1.2 Geschossebene

Auffälliger sind die Differenzen auf Geschossebene: Im ersten Obergeschoss beträgt die Zeitdifferenz 13 Tage, im zweiten Obergeschoss sogar 21 Tage. Diese Werte entsprechen einer Abweichung von 33% beziehungsweise 55% und weisen auf grössere Abweichungen hin.

Bezeichnung	Terminplan	Programm	Differenz	Abweichung
Erdgeschoss	40	43	3	8%
1. Obergeschoss	39	52	13	33%
2. Obergeschoss	38	59	21	55%
3. Obergeschoss	40	45	5	13%
Attika	37	36	-1	-3%

Tabelle 16 Zeitdifferenz über die Geschossebenen

Vor der Interpretation dieser Abweichungen lohnt sich jedoch ein vertiefter Blick auf die Detailbetrachtung einzelner Etappen.

6.4.1.3 Etappen- und Bauteilebene

Bei der Analyse der Wandetappen zeigt sich, dass die Differenzen zwar zwischen den einzelnen Arbeitsschritten variieren, sich jedoch im Mittel ausgleichen. Aufgrund der geringen Gesamtdauer einzelner Etappen führen bereits kleine Differenzen zu hohen prozentualen Abweichungen, doch im Mittel ergibt sich nur eine Differenz von +0.4 Tagen, was einer durchschnittlichen Abweichung von rund 8 % entspricht.

Geschoss	Bezeichnung	Terminplan	Programm	Differenz	Abweichung
EG	Wände Etappe 1	8	6	-2	-25%
	Wände Etappe 2	8	9	1	13%
	Wände Etappe 3	8	5	-3	-38%
1.OG	Wände Etappe 1	8	5	-3	-38%
	Wände Etappe 2	8	7	-1	-13%
	Wände Etappe 3	7	5	-2	-29%
2.OG	Wände Etappe 1	8	12	4	50%
	Wände Etappe 2	8	8	0	0%
	Wände Etappe 3	8	6	-2	-25%
3.OG	Wände Etappe 1	8	12	4	50%
	Wände Etappe 2	8	7	-1	-13%
	Wände Etappe 3	9	8	-1	-11%
Attika	Wände Etappe 1	6	15	9	150%
	Wände Etappe 2	7	9	2	29%
	Wände Etappe 3	7	8	1	14%
Total				0.4	8%

Tabelle 17 Zeitdifferenz auf Etappen- und Bauteilebene

Die Differenz von +0.4 Tagen weist darauf hin, dass das Programm eine längere Ausführungsdauer für die Wände berechnet hat, als im effektiven Terminplan vorgesehen war. Dies lässt vermuten, dass entweder die im Modell hinterlegten Leistungswerte für die Wandarbeiten konservativ angesetzt oder zusätzliche Pufferzeiten einkalkuliert wurden, die in der realen Ausführung nicht benötigt wurden.

Bei der Analyse der Deckenetappen zeigen sich nochmals geringere Abweichungen als bei den Wandetappen.

Geschoss	Bezeichnung	Terminplan	Programm	Differenz	Abweichung
EG	Decke Etappe 1	6	6	0	0%
	Decke Etappe 2	6	7	1	17%
	Decke Etappe 3	6	6	0	0%
1.OG	Decke Etappe 1	6	7	1	17%
	Decke Etappe 2	6	6	0	0%
	Decke Etappe 3	6	5	-1	-17%
2.OG	Decke Etappe 1	6	6	0	0%
	Decke Etappe 2	6	7	1	17%
	Decke Etappe 3	6	6	0	0%
3.OG	Decke Etappe 1	6	5	-1	-17%
	Decke Etappe 2	6	5	-1	-17%
	Decke Etappe 3	6	5	-1	-17%
Attika	Decke Etappe 1	6	6	0	0%
	Decke Etappe 2	6	6	0	0%
	Decke Etappe 3	6	4	-2	-33%
Total				-0.2	-3%

Innerhalb eines Geschosses zeigen die einzelnen Etappen zwar leichte Schwankungen, doch im Mittel gleichen sich die Differenzen weitgehend aus. Ein möglicher Grund dafür liegt in der Terminplanung, bei der für jede Deckenetappe eine gleichbleibende Dauer angesetzt wurde, obwohl die modellbasierten Daten unterschiedliche Geometrien und Volumina aufweisen. So besitzt Deckenetappe 1 ein Volumen von 64 m³, Deckenetappe 2 von 65 m³ und Deckenetappe 3 lediglich 50 m³.

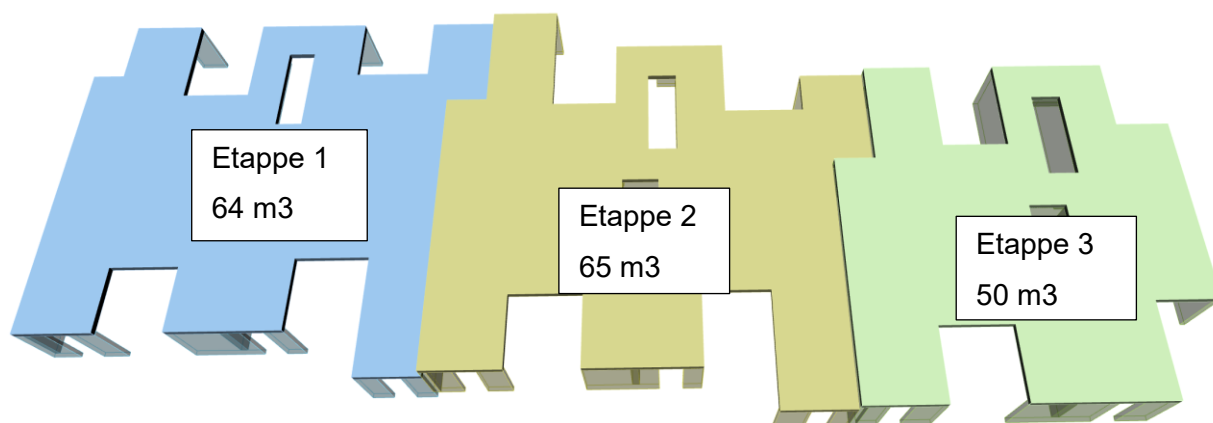


Abbildung 74 Unterschiedliche Etappengrössen im Bauprojekt

Trotz dieser Unterschiede ergibt sich über alle Deckenetappen hinweg ein nahezu ausgeglichenes Ergebnis. Die durchschnittliche Abweichung beträgt lediglich -0.2 Tage, was einer relativen Differenz von -3 % entspricht. Dieser Wert zeigt, dass das Programm eine etwas kürzere Ausführungsdauer für die Deckenerstellung berechnet hat, als sie tatsächlich auf der Baustelle umgesetzt wurde. Daraus lässt sich ableiten, dass die im Modell hinterlegten Leistungswerte für die Deckenarbeiten minimal ambitionierter angesetzt wurden. Die geringe Abweichung in der Detailbetrachtung einzelner Bauteile spricht jedoch für eine insgesamt hohe Übereinstimmung zwischen den hinterlegten Leistungsannahmen und den realen Ausführungsbedingungen.

6.4.2 Analyse und Diskussion der Auswertung

Durch die Gegenüberstellung der Detailwerte mit den Gesamtwerten kann ermittelt werden, ob die Abweichungen auf fehlerhafte Leistungsannahmen oder auf die Anordnung der Bauteile zurückzuführen sind. Treten signifikante Differenzen auf der Ebene einzelner Bauteile auf, deutet dies auf ungenaue Leistungswerte hin. Stimmen die Detailwerte hingegen mit dem effektiven Terminplan überein, während die Gesamtdauer variiert, liegt die Ursache in der Abfolge der Bauteile.

Die Detailbetrachtung der Bauteilgruppen zeigt deutlich, dass sich die modellierten Leistungswerte im Rahmen der praktischen Erwartungen bewegen. Besonders auffällig sind die vorher beschriebenen Diskrepanzen auf Geschossebene.

Während die Gesamtbetrachtung des Gebäudes lediglich eine Abweichung von 9 Tagen aufweist, summieren sich die Differenzen innerhalb der Geschosse auf rund 40 Tage. Diese Diskrepanz wirft Fragen zur Bauabfolge auf und lässt sich durch einen Vergleich der Terminpläne visuell nachvollziehen.

Im konventionellen Terminplan sind die Etappen kompakt dargestellt und zeitlich eng beieinander angeordnet. Die Ausführung erfolgt dort in maximal zwei parallelen Etappen. Im digitalen Ablaufprogramm hingegen werden die Bauteile innerhalb einer Etappe stärker über die Zeit verteilt. Diese Streuung entsteht durch die prioritätsbasierte Auswahl der Bauteile, wodurch mehrere Etappen parallel ausgeführt werden.

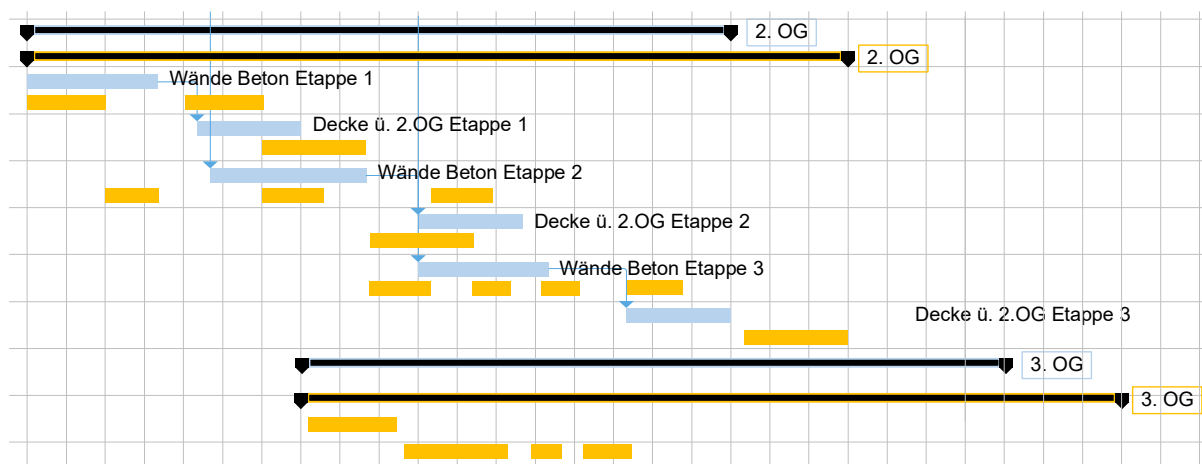


Abbildung 75 Beispiel Streuung der Wandetappen. Ausführung (Blau), Programmgeneriert (Orange)

Die längere Zeitspanne in der Geschossdarstellung des Programms bedeutet nicht, dass die gesamte Bauzeit verlängert wurde. Vielmehr zeigt sie eine feinere Verteilung der Arbeitsschritte, die auf eine differenzierte Ablauflogik zurückzuführen ist. Die Analyse der Geschosse eignet sich daher vor allem zur Untersuchung der Bauteilreihenfolge, jedoch nicht zur präzisen Bewertung der Gesamtdauer und Leistungswerte. Für belastbare Aussagen zur Bauzeit ist die Betrachtung auf Gebäude- und Bauteilebene wesentlich aussagekräftiger.

6.4.3 Analyse mit variablen Parametern

Damit eine vollständige und belastbare Auswertung gewährleistet ist, wurden die variablen Inputwerte nicht nur dokumentiert, sondern zusätzlich variiert. Aufbauend auf dem bisherigen Vorgehen wurden vier weitere Auswertungen durchgeführt, die unterschiedliche Werte für den Pufferfaktor im Bereich HLKSE sowie den Produktivitätsverlust berücksichtigen. Ergänzt wird diese Reihe durch eine zusätzliche Auswertung, die unabhängig von den Standardannahmen erstellt wurde, um die methodische Flexibilität des Modells zu demonstrieren.

6.4.3.1 Pufferfaktor (HLKSE und Produktivitätsverlust)

Die weiteren Varianten wurden mit verschiedenen Pufferfaktoren ausgewertet. Zur Analyse wurden vier zusätzliche Varianten mit Pufferwerten von 0, 5, 10 und 15% berechnet. Ziel dieser Variation war es, die Auswirkungen unterschiedlicher Pufferzeiten auf die Gesamtdauer der Bauausführung zu untersuchen.

Die nachfolgende Tabelle 18 mit den fünf Varianten ist in drei Blöcke unterteilt:

Inputdaten

Im ersten Block werden verwendete Inputdaten zur Variantenerstellung angegeben. Dazu zählen beispielsweise die Anzahl eingesetzter Arbeitskräfte sowie die jeweils verwendeten Pufferfaktoren, anhand derer sich die Varianten voneinander unterscheiden.

Differenz in Tagen

Im zweiten Block wird in der obersten Zeile die jeweilige Gesamtdauer angegeben. Direkt darunter folgen die Abweichungen zwischen dem ursprünglich geplanten Terminwert und den berechneten Werten der einzelnen Varianten. Als Referenz dient die erste Auswertung, die als Variante 1 bezeichnet wird. Analog zur Erstausswertung wurden die durchschnittlichen Abweichungen sowohl geschossweise als auch etappenweise ermittelt und dargestellt.

Differenz in Prozent

Im dritten Block wird die prozentuale Abweichung angegeben, die den genannten Differenzen in Tagen entspricht. So zeigt sich beispielsweise, dass Variante 2 eine Differenz von 4 Tagen zum ursprünglichen Terminplan aufweist, was einer relativen Abweichung von 3% entspricht.

			Terminplan	Variante 1	Variante 2	Variante 3	Variante 4	Variante 5	
Inputdaten	Anzahl Personal		18	18	18	18	18	18	
	Verfügbare Schalung		1200	1200	1200	1200	1200	1200	
	Betonliefermenge		150	150	150	150	150	150	
	Puffer [%]		-	20	15	10	5	0	
	Arbeitsgruppe pro Task		3	3	3	3	3	3	
Totale Bauzeit			Gebäude A	119	128	123	118	113	107
Differenz Tage	Ø Differenz [Tage]	Gebäude A		9	4	-1	-6	-12	
	Ø Differenz [Tage]	Geschosse		8	6	4	2	0	
	Ø Differenz [Tage]	Wände		0	0	0	-1	-1	
	Ø Differenz [Tage]	Decken		0	-1	-1	-1	-1	
Differenz %	Ø Differenz [%]	Gebäude A		8%	3%	-1%	-5%	-10%	
	Ø Differenz [%]	Geschosse		21%	16%	10%	6%	1%	
	Ø Differenz [%]	Wände		8%	7%	-1%	-6%	-11%	
	Ø Differenz [%]	Decken		-3%	-10%	-12%	-17%	-20%	

Tabelle 18 Zeitdifferenz von Varianten mit unterschiedlichen Pufferfaktoren

Besonders aufschlussreich ist die Variante 3 mit einem Pufferfaktor von 10%. In dieser Variante beträgt die Differenz zum effektiven Terminprogramm lediglich einen Tag. Unter der Annahme, dass die Leistungswerte realitätsnah sind, lässt sich daraus ableiten, dass ein Puffer von 10% erforderlich war, um die tatsächliche Bauzeit zu erreichen.

Das Gebäude wurde vom 28. April bis zum 16. Oktober 2025 realisiert. Um die Zusammensetzung des Pufferfaktors besser nachvollziehen zu können, werden die beiden Einflussgrößen Produktivitätsverlust und HLKSE getrennt betrachtet. Für den Produktivitätsverlust können die Werte für Temperatur und Lichtverhältnisse aus der *Tabelle 12* aus dem *Kapitel 4.4.1.1.1 Produktivitätsverlust* herangezogen werden.

Der durchschnittliche Produktivitätsverlust über die Monate April bis Oktober beträgt 1.3% für Temperatur und 1.2% für die Lichtverhältnisse. Insgesamt beträgt der kombinierte Produktivitätsverlust 2.5%. Daraus lässt sich schliessen, dass für HLKSE ein Puffer von rund 8.5% berücksichtigt wurde. Durch die Aufteilung lässt sich erkennen, wie stark jeder Faktor zu den Pufferwerten beiträgt und wie sich zukünftige Projekte präziser definieren lassen.

Beispielsweise kann für vergleichbare Projekte künftig ein Pufferfaktor von 2.5% für produktivitätsbedingte Einflüsse und 8.5% für HLKSE angenommen werden.

6.4.3.1.1 Zusammenhang Pufferfaktor und Bauzeit

Eine weitere relevante Erkenntnis ergibt sich aus dem nicht-linearen Zusammenhang zwischen Pufferfaktor und Bauzeitverkürzung. Zwischen Variante 1 und Variante 3 liegt eine Differenz von 10% im Pufferfaktor. Eine proportionale Reduktion der Bauzeit wäre zu erwarten, doch tatsächlich beträgt die Verkürzung lediglich 7.8%.

$$\text{Prozentuale Abweichung} = \frac{(\text{Dauer Variante 1}) - (\text{Dauer Variante 3})}{(\text{Dauer Variante 1})} = \frac{128 - 118}{128} = 7.8\%$$

Ein ähnliches Bild zeigt sich beim Vergleich von Variante 1 und Variante 5. Obwohl der Pufferfaktor von 20% auf 0% reduziert wurde, verkürzt sich die Bauzeit lediglich um 16.4%.

$$\text{Prozentuale Abweichung} = \frac{(\text{Dauer Variante 1}) - (\text{Dauer Variante 5})}{(\text{Dauer Variante 1})} = \frac{128 - 107}{128} = 16.4\%$$

Diesen nicht-linearen Zusammenhang lässt sich dadurch erklären, dass die prozentualen Anpassungen ausschliesslich auf die personalabhängigen Arbeitsschritte angewendet werden. Fixe Zeitwerte wie die Ausschaltungsfrist bleiben unverändert und blockieren weiterhin den Schalungseinsatz. Dadurch entsteht eine natürliche Begrenzung der Optimierungseffekte.

6.4.3.2 Unlimitierte Ressourcen

Diese natürliche Begrenzung der Optimierungseffekte lässt sich anhand einer hypothetischen Auswertung unter der Annahme unbegrenzter Ressourcen veranschaulichen. In dieser Variante wurden Einschränkungen wie Personalverfügbarkeit und produktivitätsbedingte Verluste nicht berücksichtigt. Dennoch zeigt die Simulation, dass selbst mit unlimitierten Bedingungen rund 68 Arbeitstage erforderlich sind.

	Terminplan	Variante ∞
Anzahl Personal		unlimitiert
Verfügbare Schalung		unlimitiert
Betonliefermenge		unlimitiert
Puffer [%]		20
Arbeitsgruppe pro Task		3
Totale Bauzeit Gebäude A	119	68

Tabelle 19 Variante mit unlimitierten Ressourcen

Diese Zahl verdeutlicht, dass neben Ressourcen auch gravitative Abhängigkeiten, räumliche Einschränkungen und bauphysikalische Vorgaben die Bauzeit mitbestimmen. Beispielsweise kann die Ausschallfrist nicht beschleunigt werden, ohne qualitative Einbussen zu riskieren. Schalungsspiessen blockieren zudem die parallele Ausführung benachbarter Wände, da sie erst nach Ablauf der Ausschallungsfrist entfernt werden können. Mit dem eingesetzten Programm lassen sich solche komplexen Abhängigkeiten sichtbar machen und analysieren, was bisher aufgrund des hohen Zeitaufwands kaum durchgeführt wurde.

7 Diskussion und Ausblick

Ein zentrales Thema dieser Arbeit ist die Entwicklung einer technischen Grundlage für die Automatisierung der Bauablaufplanung. Die Analyse hat gezeigt, dass die Datenqualität in der Ausschreibungsphase häufig unvollständig ist und die Modellstrukturen stark variieren. Wenn eine Software in dieser frühen Phase umfangreiche Eingaben erfordert, entstehen hohe Informationskosten, die wirtschaftlich kaum vertretbar sind. Gleichzeitig führen ungenaue Terminpläne aus der Ausschreibung später in der Ausführung zu Verzögerungen, Konflikten und erheblichen Kostensteigerungen.

Vor diesem Hintergrund wurde ein Ansatz entwickelt, der auf minimalen Geometrieinformationen basiert und dennoch aussagekräftige Ergebnisse liefert. Diese Strategie reduziert den Aufwand für die Modellvorbereitung erheblich und schafft eine Balance zwischen Genauigkeit und Wirtschaftlichkeit. Die klare Trennung zwischen Bedingungen, die die technische Realisierbarkeit sicherstellen, und Prioritätswerten, die der Optimierung dienen, zeigt, dass das Programm auch ohne umfangreiche Zusatzdaten funktioniert. Hinterlegte Informationen wie Leistungswerte und Mindestarbeitsflächen müssen nicht manuell eingegeben werden, wodurch der Benutzeraufwand deutlich sinkt. Die einzige Voraussetzung ist die geometrische Korrektheit des Modells.

Zeitersparnis bei der Terminplanerstellung

Darauf aufbauend eröffnet das Programm die Möglichkeit, eine Vielzahl von Szenarien in kürzester Zeit zu simulieren. Fragen, die bisher Tage oder Wochen für die Erstellung eines Terminplans erforderten, lassen sich nun in Sekunden beantworten: Wie verändert sich die Bauzeit, wenn eine Decke in zwei statt drei Etappen betoniert wird? Welche Auswirkungen hat eine höhere Personalanzahl bei begrenzter Schalungsfläche? Ist die vom Bauherrn vorgegebene Bauzeit realistisch? Wie wirkt sich eine Betonanlage vor Ort auf die Terminplanung aus?

Solche Varianten können ohne den üblichen Aufwand erstellt werden, was bisher zwei bis drei Wochen in Anspruch nahm. Aus eigener Erfahrung der Verfasserin dauert die Erstellung einer detaillierten Ablaufvariante mit herkömmlichen Methoden mindestens eine Woche, während das Programm eine Variante in rund fünf Sekunden berechnet. Dieser Zeitgewinn eröffnet neue Möglichkeiten: Anstatt wertvolle Ressourcen in die Erstellung eines Bauprogramms zu investieren, das immer wieder dieselben Regeln verwendet, kann die Zeit in die Optimierung der Bauprozesse fließen.

Wenn das Programm beispielsweise zeigt, dass die geplante Bauzeit nicht eingehalten werden kann, lassen sich alternative Methoden prüfen. Systeme, die die Ausschallfrist von fünf bis sieben Tagen auf drei Tage reduzieren, könnten erhebliche Vorteile bringen. Doch auch diese Lösungen verursachen Kosten. Mit dem Programm lässt sich vorab simulieren, ob eine verkürzte Ausschallfrist tatsächlich den gewünschten Zeitgewinn bringt oder ob andere Faktoren die Limitierung darstellen. So können Investitionen gezielt bewertet werden.

Einschränkungen

Trotz dieser Vorteile bestehen noch Einschränkungen. Im Moment sind nur eine begrenzte Anzahl Bauteile und nur das Betonmaterial im Programm hinterlegt. In weiteren Ergänzungen können weitere Bauteile und Materialien hinzugefügt werden. Des Weiteren ist die Personalanzahl im Programm über die gesamte Projektdauer statisch definiert. Das bedeutet, dass während des gesamten Bauablaufs immer die gleiche Anzahl an Arbeitskräften eingeplant wird. In der Realität ist dies jedoch selten der Fall. Normalerweise verändert sich die Personalstärke im Verlauf des Projekts: Zu Beginn sind oft weniger Personen erforderlich, da vorbereitende Arbeiten wie Fundament- oder Erdarbeiten weniger Ressourcen benötigen.

In der Hauptphase, wenn mehrere Gewerke parallel arbeiten, steigt die Anzahl deutlich an, um den Baufortschritt zu beschleunigen. Gegen Ende des Projekts reduziert sich die Personalanzahl wieder, da nur noch Restarbeiten und Detailleistungen ausgeführt werden. Diese dynamische Anpassung der Personalressourcen ist ein wichtiger Faktor für die Effizienz und Wirtschaftlichkeit eines Bauprojekts. Eine Funktion, die Zeitabschnitte mit variabler Personalanzahl berücksichtigt, würde die Praxisnähe des Programms erheblich steigern.

Ein weiterer Punkt betrifft die Betonier-Etappen, die derzeit vom Benutzer manuell festgelegt werden müssen. Das Programm verändert das Modell nicht, sondern liest lediglich Daten aus. Der Grund liegt in der Vielzahl an Einflussfaktoren, die die optimale Etappengrösse bestimmen. Zu den wichtigsten Einflussfaktoren gehören die statischen Anforderungen, um die Stabilität des Bauwerks während der Ausführung sicherzustellen. Zu grosse Etappen können zu unzulässigen Verformungen oder Belastungen führen. Das Programm berechnet aus dem Modell keine Statik. Selbst Statik-Softwares haben zurzeit Schwierigkeiten, mit einem vereinfachten geometrischen Modell die korrekte Statik zu evaluieren. Eine Integration einer solchen Methode würde einen erheblichen Aufwand erfordern. Des Weiteren müsste die räumliche Lage in Zusammenhang mit allen umliegenden Bauteilen berechnet werden.

Eng begrenzte Arbeitsflächen oder komplizierte Zugangswege können die maximale Etappen- gröösse einschränken. Das Programm kontrolliert die Bauteile nur auf Kollision, aber verfolgt über das ganze Projekt nicht den Zugangsweg oder Laufpassagen für das Personal. Für die Optimierung der Etappengrössen müssten die eingesetzten Schalungssysteme und deren Ab- messungen hinterlegt werden. Diese hängen jedoch sehr von der Baustelle und der Unterneh- mensgruppe ab. Die Berechnung müsste nicht nur die optimale Etappengrösse bestimmen, sondern auch die Auswirkungen auf den gesamten Bauablauf simulieren.

Dies erfordert rekursive Algorithmen und eine hohe Rechenleistung, insbesondere bei grossen Projekten. Die Vielzahl an Einflussfaktoren und die dynamische Natur dieser Parameter ma- chen die Automatisierung komplex, weshalb diese Automatisierung nicht in die Arbeit und Pro- grammierung einfluss. Eine Möglichkeit wäre, die Funktion der automatischen Etappierung los- gelöst zu implementieren. So werden die Modellbearbeitung und Änderungen nicht im selben Schritt gemacht, wie die Berechnungen und es besteht keine Gefahr, dass bei jeder Berech- nung das Modell verändert wird. Darüber hinaus ist die Anwendung des Programms von der verwendeten CAD-Software abhängig. Damit die Daten aus dem Modell gelesen werden kön- nen, ist die Nutzung einer CAD-Software erforderlich. Diese Abhängigkeit stellt einen Nachteil dar, da sie die Flexibilität des Programms einschränkt und jede CAD-Software Geometrien leicht unterschiedlich interpretiert.

Reihenfolge der Bauteile

Der Kern des Systems liegt im Entscheidungsnetzwerk, das anhand von Prioritätswerten die Reihenfolge der Bauteile bestimmt. Je nach Gewichtung dieser Werte können Entscheidungen entstehen, die von menschlicher Intuition abweichen. Eine detaillierte Analyse der Auswirkun- gen dieser Gewichtungen wurde in dieser Arbeit nicht durchgeführt. Klar ist jedoch: Um die menschliche Entscheidungslogik besser abzubilden, sind mehr Prioritätswerte erforderlich. Hier- für müssten zusätzliche Daten verfügbar sein, idealerweise aus Modellen, die nach der Ausfüh- rung mit tatsächlichen Leistungswerten ergänzt werden.

Nachkalkulation

Die Nachkalkulation bleibt jedoch ein kritisches Thema, da sie im Unternehmensalltag oft ver- nachlässigt wird. Obwohl die Nachkalkulation ein entscheidender Schritt ist, um reale Leistungs- werte, Kosten und Zeitaufwände aus abgeschlossenen Projekten zu erfassen und für zukünftige Planungen nutzbar zu machen, wird sie in der Praxis häufig vernachlässigt.

Der Hauptgrund liegt im fehlenden unmittelbaren Nutzen für das Unternehmen: Die Nachkalkulation bringt keinen direkten Gewinn, sondern dient der langfristigen Verbesserung von Prozessen und der Genauigkeit zukünftiger Kalkulationen. In einem Umfeld, in dem Zeitdruck und Ressourcenknappheit dominieren, wird dieser langfristige Vorteil oft zugunsten kurzfristiger Projektabschlüsse ignoriert. Die Nachkalkulation erfordert zusätzlichen Aufwand, denn die Daten müssen gesammelt, geprüft und strukturiert werden, was Zeit und Personal bindet.

Da diese Arbeit nicht unmittelbar zur Fertigstellung des Projekts beiträgt, wird sie häufig als „nicht dringend“ eingestuft. Die Vernachlässigung der Nachkalkulation hat direkte Auswirkungen auf die Qualität der Datenbasis für automatisierte Systeme. Ohne verlässliche Ist-Daten können Prioritätswerte und Leistungskennzahlen im Entscheidungsnetzwerk nur auf theoretischen Annahmen beruhen. Eine konsequente Nachkalkulation würde nicht nur die Transparenz erhöhen, sondern auch die Grundlage für datengetriebene Optimierungen schaffen.

Einbindung eines künstlichen neuronalen Netzwerks

Langfristig bietet das Entscheidungsnetzwerk die Möglichkeit, zu einem lernenden System ausgebaut zu werden. Mit zunehmender Datenbasis könnte es sich in Richtung eines neuronalen Netzwerks entwickeln, das Entscheidungen nicht nur regelbasiert, sondern datengetrieben trifft. Je häufiger bestimmte Pfade gewählt werden, desto höher würde ihre Gewichtung, was eine dynamische Anpassung der Prioritäten ermöglicht. Sollte jedoch die Datenbasis für ein neuronales Netzwerk nicht ausreichen, kann als Übergangslösung ein genetischer Algorithmus eingesetzt werden. Genetische Algorithmen sind besonders geeignet, wenn Optimierung gefragt ist, aber keine ausreichenden Daten für maschinelles Lernen vorliegen. Sie können die Lücke zwischen statischen Regeln und datengetriebener KI überbrücken und so die Effizienz des Systems deutlich steigern.

Realität vs. Optimierung

Ein Spannungsfeld bleibt bestehen: Soll die Realität möglichst exakt abgebildet werden oder soll die Optimierung im Vordergrund stehen? Je stärker die Realität nachgebildet wird, desto geringer ist der Spielraum für Optimierungen. Wenn das Ziel darin besteht, die Realität möglichst exakt abzubilden, werden alle Parameter so modelliert, wie sie auf der Baustelle tatsächlich auftreten. Das bedeutet, dass die Planung die gleichen Einschränkungen und Begrenzungen übernimmt und dadurch die maximale Flexibilität einschränkt. Optimierung bedeutet hingegen, bewusst von der Realität abzuweichen, um bessere Ergebnisse zu erzielen.

Die Herausforderung besteht darin, eine Balance zu finden. Das Modell muss genügend Realitätsnähe bieten, um praktikable Ergebnisse zu liefern, aber gleichzeitig flexibel genug bleiben, um Optimierungen zu ermöglichen. Ein Ansatz ist die Trennung zwischen Bedingungen, die die technische Realisierbarkeit sicherstellen, und Prioritätswerten, die für die Optimierung genutzt werden. So können Varianten berechnet werden, die innerhalb der Grenzen der Realisierbarkeit liegen, aber dennoch unterschiedliche Strategien zur Effizienzsteigerung prüfen.

Eine Optimierung ist erst dann sinnvoll, wenn die Basisbedingungen für realistische Bauprogramme vollständig definiert sind. Erst ab diesem Punkt kann eine automatisierte Berechnung von Millionen Varianten einen echten Mehrwert bieten, um so nahe wie möglich an ein absolutes Optimum zu gelangen. Denn dann sind die Ergebnisse nicht nur theoretisch optimal, sondern auch praktisch umsetzbar.

Entscheidungshilfe und Nachvollziehbarkeit

Doch auch hier besteht weiterhin das Problem, dass die Vielzahl an Varianten immer noch manuell vom Benutzer ausgewertet werden muss. Die Software soll jedoch nicht die Arbeit des Planers ersetzen, sondern als unterstützendes Werkzeug dienen. Die Entscheidung, welches Bauprogramm optimal ist, soll weiterhin der Benutzer treffen. Transparenz und Nachvollziehbarkeit stehen im Vordergrund, sodass die Berechnungslogik jederzeit überprüfbar bleibt. Damit können auch Dritte die Ergebnisse nachvollziehen, und Bauprogramme werden einheitlich und regelbasiert erstellt.

Aktuell sind nur minimale Informationen im Modell hinterlegt, wie Bautyp und Baustartpunkt. Mehr Daten würden die Genauigkeit erhöhen, aber auch den Aufwand und die Qualitätsanforderungen steigern. Der Ansatz des Programms ist daher, mit minimalen Geometrieanforderungen auszukommen und zusätzliche Informationen als optionale Optimierungsparameter zu integrieren. So kann das System schrittweise erweitert werden, ohne die Einstiegshürde zu erhöhen.

Langfristiges Ziel

Das übergeordnete Ziel ist klar: Die Lücke zwischen Ausschreibung und Ausführung soll kleiner werden. Je präziser die Terminplanung in frühen Phasen ist, desto früher können Konflikte erkannt und gelöst werden, bevor sie in der Bauphase zu erheblichen Mehrkosten führen. Damit wird nicht nur die Planung effizienter, sondern auch die Ausführung sicherer und verlässlicher.

8 Fazit

Das entwickelte Programm zeigt, wie digitale Tools die Erstellung von Bauablaufplänen unterstützen können. Es übernimmt zeitintensive, wiederkehrende Arbeitsschritte und deckt dabei Bedingungen ab, die bisher manuell geprüft werden mussten. Dennoch bleibt die Software ein unterstützendes Werkzeug und ersetzt nicht die planerische Verantwortung. Ziel ist nicht die Erstellung eines vollständigen Terminplans auf Knopfdruck, sondern die Bereitstellung einer fundierten Entscheidungsgrundlage, die den Planungsprozess beschleunigt und transparenter macht.

Durch die Nutzung digitaler Modelle können deutlich mehr Informationen berücksichtigt werden, ohne dass zusätzliche manuelle Eingaben erforderlich sind. Dies reduziert den Aufwand erheblich und ermöglicht eine schnelle Analyse verschiedener Szenarien und stellt einen klaren Fortschritt gegenüber bisherigen Methoden dar. Dennoch fehlen weiterhin zahlreiche Bedingungen, um ein vollständig realistisches Bauprogramm zu generieren.

Aktuell funktioniert das Programm für typische Rohbauelemente im Hochbau und für das Material Ortbeton. Die Abhängigkeiten basieren derzeit auf statischen Regeln und die Qualität der Ergebnisse hängt stark von den eingegebenen Leistungswerten ab. Die Anwendung des Programms kann jedoch hoffentlich dazu beitragen, die Motivation zur systematischen Erfassung von Daten für die Nachkalkulation zu steigern und somit Optimierungspotenziale besser zu nutzen.

Trotz dieser Grenzen bietet das Programm eine solide Grundlage für Weiterentwicklungen. Besonders die Architektur des Programms erlaubt eine einfache Erweiterung um zusätzliche Funktionen. Weitere Regelsätze, Bauteile und Materialien bis hin zur Integration von KI-basierten Datensätzen sind denkbar, um die Entscheidungslogik dynamisch anzupassen und die menschliche Intuition besser nachzubilden. Damit eröffnet sich ein breites Potenzial für zukünftige Optimierungen und eine datenbasierte Weiterentwicklung der Bauablaufplanung.

Danksagung

Diese Arbeit ist für mich mehr als nur ein wissenschaftliches Projekt, denn auf ihrem Entwicklungspfad wurden neugierige Gespräche geführt und unzählige kreative Ideen mit zwei Menschen geteilt, denen ich diese Arbeit widme: Jörg Amport und Patrick Walther.

Der erste Denkanstoss entstand, als Jörg Amport und Patrick Walther auf einem Symposium zum ersten Mal von der Anwendung der Paretofront und der multikriteriellen Optimierung in Bezug auf Baugrundsetzungen hörten. Sofort erkannten sie die Verbindung zu Bauprogrammen und deren multikriteriellen Zielen. Als Spezialisten für Digitalisierung und BIM sahen sie das Potenzial, digitale Modelle mit automatisierten Optimierungsverfahren zu verbinden. Aus dieser spontanen Begeisterung entstand die Frage, warum es bislang keine Software gibt, die Bauprogramme automatisch aus digitalen Modellen generiert. Diese Frage gab den Anstoss der Ursache auf den Grund zu gehen und führte schliesslich zur Eigenentwicklung des Programms und damit zu meiner Arbeit.

Patrick Walther prägte insbesondere die frühe Entwicklungsphase dieses Projektes. Zusammen mit ihm als Entwicklungskollege und technischem Sparringpartner entstand das Grundgerüst des Codes. Als die Automatisierung an ihre Grenzen stiess, entstanden Gespräche über die unermessliche Berechnungszeit und die Grenzen intuitiver, menschlicher Entscheidungen. Auch Diskussionen über die Unendlichkeit und die Frage, ob das absolute Optimum je in unserer Lebenszeit noch vollständig berechnet werden kann oder ob ein Quantencomputer dafür benötigt wird, haben die Arbeit beeinflusst. Der Code wurde nicht mehr gemeinsam mit Patrick finalisiert, doch da Zeit bekanntlich relativ ist, hoffe ich, dass in einem anderen Paralleluniversum der Code dort zusammen mit ihm vollendet wurde.

Mein besonderer Dank geht vor allem an Jörg Amport, der mich als Spezialist und Visionär auf seinem Gebiet mit Ideen und kreativen Ansätzen inspiriert hat. Er war nicht nur mein fachlicher Experte, sondern auch mein Mentor und unterstützte mich zudem auf persönlicher und mentaler Ebene. Ohne seine Begleitung und Ermutigung wäre dieses Werk nicht entstanden.

Zitate und Referenzen

Achermann, M. & Ismael, R., 2021. *Modelling of Spatial Constraint in BIM*, Zürich: ETH Zürich.

ALICE Technologies Inc., 2025. *alicetechnologies*. [Online]

Available at: <https://www.alicetechnologies.com/pricing>

[Zugriff am 30 September 2025].

ALICE Technologies Inc., 2025. *alicetechnologies*. [Online]

Available at: <https://support.alicetechnologies.com/hc/en-us/articles/360009793354-Logic-Ties>

[Zugriff am 30 September 2025].

Arapı, I. & Gagliano, M., 2019. *Von konventioneller Terminplanung*, Brugg: Fachhochschule Nordwestschweiz.

BauG (Baugesetz des Kantons Bern), 2024. Art. 22, Abs. 3, Bern: s.n.

Baugenossenschaft Luegisland Zürich, 2024. <https://bg-luegisland.ch/scharenmoosstrasse>. [Online]

Available at: <https://bg-luegisland.ch/scharenmoosstrasse>

[Zugriff am 20 September 2025].

Betsch, T., Funke, J. & Plessner, H., 2011. *Allgemeine Psychologie (Denken – Urteilen, Entscheiden, Problemlösen)*. Heidelberg: Springer Verlag.

Bricks SA, 2025. *Jakob Quartier*. [Online]

Available at: <https://jakob-quartier.ch>

[Zugriff am 20 September 2025].

buildingSMART International, 2024. *IFC 4.3.2 Documentation buildingSMART International*. [Online]

Available at:

<https://standards.buildingsmart.org/IFC/RELEASE/IFC4/FINAL/HTML/schema/ifcrepresentationresource/lexical/ifcshaperepresentation.htm>

[Zugriff am 03 Oktober 2025].

Buresova, K., 2023. *Meeting with Sales-Team - Alice Technologies (Transkription: siehe Anhang)* [Interview] (1 März 2023).

Cadwork AG, 2025. Cadwork. [Online]
Available at: <https://07.cadwork.ch/de>
[Zugriff am 21 September 2025].

Cadwork AG, 2025. OpenLexocad. [Online]
Available at: <https://www.openlexocad.com>
[Zugriff am 21 September 2025].

ChatGPT, 2025. persönliche Kommunikation [Interview] (19 September 2025).

Chuck Eastman, P. T. R. S. K. L., 2011. *BIM Handbook: A Guide to Building Information Modeling for Owners, Managers, Designers, Engineers and Contractors*. s.l.: John Wiley & Sons.

Copilot, 2025. persönliche Kommunikation [Interview] (19 September 2025).

Damasio, A. R., Tranel, D. & Damasio, H. C., 1991. *Somatic Markers and the Guidance of Behavior*. In: A. L. Benton, Hrsg. *Frontal Lobe Function and Dysfunction*. Oxford: Oxford University Press, pp. 217-226.

De Vries, B. & Harink, J. M., 2005. *Generation of a construction planning from a 3D CAD model*. *Automation in Construction*, 16(1), pp. 13-18.

Diestel, R., 2010. *Graph Theory*. New York: Springer-Verlag.

DIN Deutsches Institut für Normung, 1988. *DIN 1045:1988-07 Beton und Stahlbeton – Bemessung und Ausführung*, Berlin: DIN Deutsches Institut für Normung e. V..

Doukari, O., Seck, B. & Greenwood, D., 2022. *The Creation of Construction Schedules in 4D BIM: A Comparison of Conventional and Automated Approaches*. *Buildings*, Band 12(8), p. Art. 1145.

Girmscheid, G., 2004. *Kostenkalkulation und Preisbildung in Bauunternehmen*. Bern: Baufachverlag.

Hall, D. M., Custovic, I., Sriram, R. & Chen, Q., 2021. *Teaching generative construction scheduling: Proposed curriculum design*. *Advanced Engineering Informatics*, Band 51.

Hofstadler, C., 2007. *Logistik im Baubetrieb — Feinplanung für die Stahlbetonarbeiten*. In: *Bauablaufplanung und Logistik im Baubetrieb*. Berlin: Springer-Verlag, p. 383–412.

Hofstadler, C., 2014. *Produktivität im Baubetrieb*. Heidelberg: Springer.

Hofstadler, C., 2022. *Projektvorlaufzeit und Bauzeit*. 1 Hrsg. Graz, Österreich: Springer Vieweg Wiesbaden.

I. Kurtulus & E. W. Davis, 1982. *Multi-Project Scheduling: Categorization of Heuristic Rules Performance*. In: *Management Science*. s.l.:INFORMS, pp. 161-172.

Irnich, S. & Desaulniers, G., 2005. *Shortest Path Problems with Resource Constraints*. In: *Column Generation*. Springer: Boston, pp. 33-65.

Kerstin Hausknecht, T. L., 2016. *BIM-Kompendium: Building Information Modeling als neue Planungsmethode*. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag.

Kim, H., Anderson, K., Lee, S. & Hildreth, J., 2013. *Generating construction schedules through automatic data extraction*. *Automation in Construction*, Band 35, pp. 285-295.

Klüver, C., Klüver, J. & Schmidt, J., 2024. *Modellierung komplexer Prozesse durch naturanaloge Verfahren (Künstliche Intelligenz und Künstliches Leben)*. 4 Hrsg. Essen, Deutschlang: Springer Verlag.

Knowledge Base - ALICE, 2025. *alicetechnologies - Key Functionality*. [Online]
Available at: <https://support.alicetechnologies.com/hc/en-us/categories/25275886074647>
[Zugriff am 03 Oktober 2025].

Lova, A. & Tormos, P., 2001. *Analysis of scheduling schemes and*. In: K. Academic, Hrsg. *Annals of Operations Research*. Spanien: Springer, pp. 263-286.

MeteoSchweiz, 2024. *Meteo Schweiz Normwert-Karten*. [Online]
Available at: <https://www.meteoschweiz.admin.ch/service-und-publikationen/applikationen/ext/climate-norm-maps-public.html#https%3A%2F%2Fservice.meteoswiss.ch%2Fproductbrowser%2FproductDisplay%2Fclimate-norm-maps-public%3Flang=de&cg1.parameter=Sabs&cg1.normalPeriod=1991>
[Zugriff am 20 September 2025].

Morkos, R., 2014. *Operational Efficiency Frontier: Visualizing, Manipulating, and Navigating the Construction Scheduling State Space with Precedence, Discrete, and Disjunctive Constraints*, Stanford University: s.n.

Niederlinski, A., 2011. *A Gentle Guide to Constraint Logic Programming via ECLiPSe*. 1 Hrsg. Poland: Economic University in Katowice.

Olemedia & iStock, 2020. *Artificial Intelligence digital concept illustrate of modern internet technology*. s.l.:s.n.

Schweizerischer Baumeisterverband, 2024. *Erläuterung Standard-Analysen SBV 2025*. [Online] Available at: https://shop.baumeister.ch/shop/document_download.php?document=20-07-27_Standardanalysen_de.pdf [Zugriff am 21 September 2025].

Schweizerischer Baumeisterverband, 2025. *Standard-Analysen Hochbau*, s.l.: s.n.

Seitz, K.-F. & Grabe, J., 2018. *Einsatzmöglichkeiten der multikriteriellen Optimierung im digitalen Bauen*. In: J. Grabe, Hrsg. *Digitale Infrastruktur & Geotechnik*. Hamburg: Technische Universität Hamburg, pp. 167-179.

Stark, J. & Wicht, B., 2013. *Dauerhaftigkeit*. 2 Hrsg. Weimar, Deutschland: Springer Verlag.

Tittmann, P., 2019. *Abzählen von Objekten*. In: *Einführung in die Kombinatorik*. Heidelberg: Springer Spektrum Berlin, pp. 1-35.

Vanhoucke, M. & Bredael, D., 2022. *Multi-project scheduling: A benchmark analysis of metaheuristic algorithms on various optimisation criteria and due dates*. In: R. Slowinski, Hrsg. *European Journal of Operational Research*. London: Elsevier, pp. 54-75.

Vanhoucke, M. & Van Eynde, R., 2020. *Resource-constrained multi-project scheduling: benchmark datasets*. In: E. Burke, Hrsg. *Journal of Scheduling*. Belgien: Springer, pp. 301-325.

Vázquez, E. P, Calvo, M. P & Ordóñez, P. M., 2015. *Learning process on priority rules to solve the RCMPSP*. In: A. Kusiak, Hrsg. *Journal of Intelligent Manufacturing*. s.l.:Springer, pp. 123-138.

Vogt, P., 2025. *Kalkulation von Baupreisen und Vergabe von Bauleistungen*. 1 Hrsg. Mülheim an der Ruhr: Springer Verlag.

Wagenhofer, A., 1990. *Informationskosten*. In: *Informationspolitik im Jahresabschluss*. Heidelberg: Physica Heidelberg, pp. 36-60.

Wei, P., Feng Zhao, Xiaofeng, H. & Jinshu, S., 2012. *A Fast Algorithm to Find All-Pairs Shortest Paths in Complex Networks*. In: N. U. o. D. T. School of Computer, Hrsg. *Procedia Computer Science* 9. Changsha, Hunan, 410073, China: Elsevier Ltd., pp. 557-566.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 Zeitdifferenz der Erfahrungswerte von Ausschreibung und Ausführung bei einer 10 m langen Wand	17
Abbildung 2 ALICE - Eingabe Arbeitsaktivitäten und Leistungswert (Knowledge Base - ALICE, 2025)	23
Abbildung 3 ALICE - Eingabe benötigtes Material (Knowledge Base - ALICE, 2025)	23
Abbildung 4 Beispiel eines Deckenabsatzes, bei dem die semantischen Regeln fehlerhaft sein könnten	24
Abbildung 5 wie in CAD-Software Flächen eine Innen- und Aussenseite zugewiesen werden	26
Abbildung 6 Beispiel, wie Flächen in einer IFC-Datei ohne Solid-Volumen dargestellt werden	26
Abbildung 7 Modell einer Wandschalung und eines Gerüsts	30
Abbildung 8 Variante 1 – Wandbau in einer möglichen Reihenfolge	31
Abbildung 9 Variante 2 - Wandbau in leicht veränderter Reihenfolge	31
Abbildung 10 Möglichkeit zwei aufeinanderfolgende Wände zu errichten	32
Abbildung 11 Betrachtung der Aufteilung zwischen Makro- und Mikroebene	36
Abbildung 12 Einflüsse auf die Produktivität (Hofstadler, 2014, p. 18)	38
Abbildung 13 Einflüsse auf die Leistung (Hofstadler, 2014, p. 44)	38
Abbildung 14 Einflüsse auf den Aufwandswert (Hofstadler, 2014, p. 44)	38
Abbildung 15 Einflüsse auf die Bauzeit – eigene Darstellung in Anlehnung nach Abb. 3.4, 3.17 und 3.18 von (Hofstadler, 2014, pp. 18, 44)	39
Abbildung 16 Datenflussmodell der Eigenentwicklung	41
Abbildung 17 Aufteilung der Inputdaten zwischen Modell und externen Datensätzen	43
Abbildung 18 Erforderliche und optionale modellbasierte Inputdaten	43
Abbildung 19 Datenprozessierung der geometrischen Modelldaten	44
Abbildung 20 Translation der Stützegeometrie für die Kollisionsprüfung	46
Abbildung 21 Realitätsgetreue Modellierung	47
Abbildung 22 Vereinfachte Modellierung	47
Abbildung 23 Kollisionsprüfung mit horizontaler Translation	47
Abbildung 24 Gravitative Abhängigkeit durch Pfeile dargestellt	47
Abbildung 25 Darstellung des Mindestarbeitsplatzes mittels Boundingbox und Offset	48
Abbildung 26 Externe Datensätze als Inputdaten	49
Abbildung 27 Kennwerte für eine Decke nach SBV NPK 241.661.113	52
Abbildung 28 Auswirkung der Frühfestigkeitszeit bei einer Decke mit einer Wand als direkter Nachfolger	58

Abbildung 29 Datenprozessierung - Berechnung der Bauzeit eines Bauteils	60
Abbildung 30 Zusammenstellung der Bauzeit durch die Arbeitstätigkeiten und bauzeitlichen Vorgaben	61
Abbildung 31 Einsatzblöcke von Personal und Schalung	62
Abbildung 32 Produktivitätsverluste durch Umgebungseinflüsse	62
Abbildung 33 Produktivitätsverlust ΔPV als Faktor auf die Arbeitsstunden	63
Abbildung 34 Datenprozessierung mit dem Entscheidungsnetzwerk	68
Abbildung 35 Netzwerk mit Knoten und Kanten in Zusammenhang von Bauteilen	69
Abbildung 36 Netzwerk mit gewichteten Knoten	70
Abbildung 37 Netzwerk mit gewichteten Kanten	71
Abbildung 38 Bedingungen im Entscheidungsnetzwerk	72
Abbildung 39 Netzwerk mit einer erfüllten Bedingung	72
Abbildung 40 Korrekte Anzeige der Pfade zwischen den Bauteilen	73
Abbildung 41 Nächstmögliche Abfolge nach dem Bau einer Bodenplatte	75
Abbildung 42 Zufälliger Bau einer Wand unter Einhaltung der Bedingungen	76
Abbildung 43 Blockierung der Wände im Inneren	76
Abbildung 44 seitlich isolierter Bau eines Gebäudes	76
Abbildung 45 Auswahlmöglichkeit der als nächst zu bauenden Wände. Von links nach rechts: Rot, Orange, Gelb, Rosa.	80
Abbildung 46 – 24 Serielle Anordnungsmöglichkeiten	81
Abbildung 47 Beispiel eines Geschossmodells mit 20 Wänden pro Etappe	85
Abbildung 48 Beispiel der Paretofront zur multikriteriellen Optimierung von Kosten und Bauzeit (modifiziert von Abb.1 (Seitz & Grabe, 2018, p. 169))	90
Abbildung 49 Wie Prioritätsregeln die Baureihenfolge bestimmen	92
Abbildung 50 Prioritätswerte in der Ansicht des Netzwerkes	95
Abbildung 51 Prioritätswerte in der Ansicht der Programmausführung	95
Abbildung 52 Beispielhafte Visualisierung der Limitierung im Netzwerk	100
Abbildung 53 Priorisierung im Netzwerk	100
Abbildung 54 Einsatzblöcke eines Bauteils	101
Abbildung 55 Ressourcenzuweisung zweier Bauteile	101
Abbildung 56 Ressourcenfreigabe des Personals	101
Abbildung 57 Ressourcenfreigabe der Schalung	101
Abbildung 58 Aufeinanderfolge nicht direkter Nachfolger	102
Abbildung 59 Aufeinanderfolge direkter Nachfolger	102

Abbildung 60 Vollständige Übersicht der Datenprozessierung	102
Abbildung 61 Dialog zwischen dem Benutzerfenster Paretofront-Diagramm und der Variantenansicht	103
Abbildung 62 Varianten dargestellt im Punktediagramm	104
Abbildung 63 Eingrenzung der Varianten	104
Abbildung 64 Benutzerfenster zur Übersicht der generierten Variante	105
Abbildung 65 Darstellung Arbeitsschritt des Personals in Grau und die Ausschalfrist in Beige	106
Abbildung 66 Selektion eines Bauteils im interaktiven Gantt-Diagramm und Hervorhebung des Bauteils in der CAD-Umgebung	107
Abbildung 67 Ansicht Ressourcenbedarf Schalung, Beton und Personal	108
Abbildung 68 Schwankungen in der Schalungsnutzung	108
Abbildung 69 Starke Auslastung des Personals mit starken Schwankungen in der Betonnutzung	108
Abbildung 70 Geometrische Informationen für die erforderlichen und Eigenschaftsinformationen für optionale Voraussetzungen	109
Abbildung 71 Schärenmoos Gebäude A	112
Abbildung 72 Schärenmoos Gebäude B	112
Abbildung 73 Prozentualer Zeitfaktor von 20% mit HLKSE + Produktivitätsverlust	114
Abbildung 74 Unterschiedliche Etappengrößen im Bauprojekt	120
Abbildung 75 Beispiel Streuung der Wandetappen. Ausführung (Blau), Programmgeneriert (Orange)	121

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 Gegenüberstellung der Erfahrungswerte aus Ausschreibung und Ausführung	15
Tabelle 2 Zeitdifferenz der Erfahrungswerte von Ausschreibung und Ausführung	16
Tabelle 3 Modifizierung der Tabelle 13 Mindestarbeitsfläche von (Achermann & Ismael, 2021, p. 21)	30
Tabelle 4 Modifizierte Darstellung von der Tabelle 14, Modelling of Spatial Constraint in BIM (Achermann & Ismael, 2021)	50
Tabelle 5 Umrechnung der Gruppenleistung zur Leistung pro Arbeiter	53
Tabelle 6 Berechnung der Betonier Zeit für unterschiedliche Gruppengrößen	53
Tabelle 7 Angewendete Leistungswerte	54
Tabelle 8 Angewendete Gruppengrößen	55
Tabelle 9 Optimierte Gruppengrößen für spezifische Arbeitstätigkeiten (Hofstadler, 2014)	55
Tabelle 10 Ausschallfrist eingeteilt nach Bauteilen und Zementklasse (DIN Deutsches Institut für Normung, 1988)	59
Tabelle 11 Sonnenstunden für die Monate Februar und März gemäss der Meteo Schweiz Datenbank	65
Tabelle 12 Produktivitätsverlust von Temperatur und Lichtverhältnissen über das gesamte Jahr	66
Tabelle 13 Darstellung aller möglichen Partitionen mit vier Wänden	83
Tabelle 14 Zeitdifferenz über das Gesamte Bauprojekt	116
Tabelle 15 Zeitdifferenz von Gebäude A	117
Tabelle 16 Zeitdifferenz über die Geschossebenen	117
Tabelle 17 Zeitdifferenz auf Etappen- und Bauteilebene	118
Tabelle 18 Zeitdifferenz von Varianten mit unterschiedlichen Pufferfaktoren	123
Tabelle 19 Variante mit unlimitierten Ressourcen	125

Anhang 1 - Zeitdifferenz 10m Wandlänge

Wandgeometrie			Task	Menge	Gruppen- grösse zur Gruppen- leistung	Gruppen- leistung	Leistung pro Gruppe	Leistung pro Arbeiter	Effektive Gruppengrösse	Effektive Leistung pro Gruppe	Dauer einzel	Dauer Gruppe	Tägliche Arbeits- stunden	Dauer einzeln Tag	Dauer Gruppe Tag	Dauer Ausschreibung	Dauer Ausführung	Differenz
			Einheit	LE	Anz. Arbeiter	LE/h	h/LE	h/LE	Anz. Arbeiter	h/LE	h	h	h/Tag	Tag	Tag	Wandlänge m / Tag	h	h
Höhe m	Länge m	Breite m	Task	-	-	-	1/Gruppenleistung	Gruppengrösse * (1/Gruppenleistung)	-	Leistung pro Arbeiter / Eff. Gruppengrösse	Leistung * Menge	Leistung * Menge	-	Dauer / tägliche Arbeitsstunden	Dauer / tägliche Arbeitsstunden			
Breite 0.15, variable Höhe																		
			Schalen	30.00	2.0	6.67	0.150	0.300	2.0	0.150	9.00	4.50	9.0	1.0	0.50			
			Bewehren	225.00	3.0	333.33	0.003	0.006	2.0	0.003	1.35	0.68	9.0	0.2	0.08			
			Betonieren	2.25	3.0	5.00	0.200	0.600	3.0	0.200	1.35	0.45	9.0	0.2	0.05			
1.5	10	0.15	Total								11.70	5.63		1.30	0.63	10.00	9.00	-3.38
			Schalen	40.00	2.0	13.00	0.077	0.300	2.0	0.150	12.00	6.00	9.0	1.3	0.67			
			Bewehren	300.00	3.0	225.00	0.004	0.006	2.0	0.003	1.80	0.90	9.0	0.2	0.10			
			Betonieren	3.00	3.0	6.30	0.159	0.600	3.0	0.200	1.80	0.60	9.0	0.2	0.07			
2.0	10	0.15	Total								15.60	7.50		1.73	0.83	10.00	9.00	-1.50
			Schalen	50.00	2.0	13.00	0.077	0.300	2.0	0.150	15.00	7.50	9.0	1.7	0.83			
			Bewehren	375.00	3.0	225.00	0.004	0.006	2.0	0.003	2.25	1.13	9.0	0.3	0.13			
			Betonieren	3.75	3.0	6.30	0.159	0.600	3.0	0.200	2.25	0.75	9.0	0.3	0.08			
2.5	10	0.15	Total								19.50	9.38		2.17	1.04	10.00	9.00	0.38
			Schalen	60.00	2.0	13.00	0.077	0.300	2.0	0.150	18.00	9.00	9.0	2.0	1.00			
			Bewehren	450.00	3.0	225.00	0.004	0.006	2.0	0.003	2.70	1.35	9.0	0.3	0.15			
			Betonieren	4.50	3.0	6.30	0.159	0.600	3.0	0.200	2.70	0.90	9.0	0.3	0.10			
3.0	10	0.15	Total								23.40	11.25		2.60	1.25	10.00	9.00	2.25
			Schalen	70.00	2.0	13.00	0.077	0.300	2.0	0.150	21.00	10.50	9.0	2.3	1.17			
			Bewehren	525.00	3.0	225.00	0.004	0.006	2.0	0.003	3.15	1.58	9.0	0.4	0.18			
			Betonieren	5.25	3.0	6.30	0.159	0.600	3.0	0.200	3.15	1.05	9.0	0.4	0.12			
3.5	10	0.15	Total								27.30	13.13		3.03	1.46	10.00	9.00	4.13
			Schalen	80.00	2.0	13.00	0.077	0.300	2.0	0.150	24.00	12.00	9.0	2.7	1.33			
			Bewehren	600.00	3.0	225.00	0.004	0.006	2.0	0.003	3.60	1.80	9.0	0.4	0.20			
			Betonieren	6.00	3.0	6.30	0.159	0.600	3.0	0.200	3.60	1.20	9.0	0.4	0.13			
4.0	10	0.15	Total								31.20	15.00		3.47	1.67	10.00	9.00	6.00
Breite 0.2, variable Höhe																		
			Schalen	30.00	2.0	13.00	0.077	0.300	2.0	0.150	9.00	4.50	9.0	1.0	0.50			
			Bewehren	300.00	3.0	225.00	0.004	0.006	2.0	0.003	1.80	0.90	9.0	0.2	0.10			
			Betonieren	3.00	3.0	6.30	0.159	0.600	3.0	0.200	1.80	0.60	9.0	0.2	0.07			
1.5	10	0.20	Total								12.60	6.00		1.40	0.67	10.00	9.00	-3.00
			Schalen	40.00	2.0	13.00	0.077	0.300	2.0	0.150	12.00	6.00	9.0	1.3	0.67			
			Bewehren	400.00	3.0	225.00	0.004	0.006	2.0	0.003	2.40	1.20	9.0	0.3	0.13			
			Betonieren	4.00	3.0	6.30	0.159	0.600	3.0	0.200	2.40	0.80	9.0	0.3	0.09			
2.0	10	0.20	Total								16.80	8.00		1.87	0.89	10.00	9.00	-1.00
			Schalen	50.00	2.0	13.00	0.077	0.300	2.0	0.150	15.00	7.50	9.0	1.7	0.83			
			Bewehren	500.00	3.0	225.00	0.004	0.006	2.0	0.003	3.00	1.50	9.0	0.3	0.17			
			Betonieren	5.00	3.0	6.30	0.159	0.600	3.0	0.200	3.00	1.00	9.0	0.3	0.11			
2.5	10	0.20	Total								21.00	10.00		2.33	1.11	10.00	9.00	1.00
			Schalen	60.00	2.0	13.00	0.077	0.300	2.0	0.150	18.00	9.00	9.0	2.0	1.00			
			Bewehren	600.00	3.0	225.00	0.004	0.006	2.0	0.003	3.60	1.80	9.0	0.4	0.20			
			Betonieren	6.00	3.0	6.30	0.159	0.600	3.0	0.200	3.60	1.20	9.0	0.4	0.13			
3.0	10	0.20	Total								25.20	12.00		2.80	1.33	10.00	9.00	3.00
			Schalen	70.00	2.0	13.00	0.077	0.300	2.0	0.150	21.00	10.50	9.0	2.3	1.17			
			Bewehren	700.00	3.0	225.00	0.004	0.006	2.0	0.003	4.20	2.10	9.0	0.5	0.23			
			Betonieren	7.00	3.0	6.30	0.159	0.600	3.0	0.200	4.20	1.40	9.0	0.5	0.16			
3.5	10	0.20	Total								29.40	14.00		3.27	1.56	10.00	9.00	5.00
			Schalen	80.00	2.0	13.00	0.077	0.300	2.0	0.150	24.00	12.00	9.0	2.7	1.33			
			Bewehren	800.00	3.0	225.00	0.004	0.006	2.0	0.003	4.80	2.40	9.0	0.5	0.27			
			Betonieren	8.00	3.0	6.30	0.159	0.600	3.0	0.200	4.80	1.60	9.0	0.5	0.18			
4.0	10	0.2	Total								33.60	16.00		3.73	1.78	10.00	9.00	7.00
Breite 0.25, variable Höhe																		
			Schalen	30.00	2.0	13.00	0.077	0.300	2.0	0.150	9.00	4.50	9.0	1.0	0.50			
			Bewehren	375.00	3.0	225.00	0.004	0.006	2.0	0.003	2.25	1.13	9.0	0.3	0.13			
			Betonieren	3.75	3.0	6.30	0.159	0.600	3.0	0.200	2.25	0.75	9.0	0.3	0.08			
1.5	10	0.25	Total								13.50	6.38		1.50	0.71	10.00	9.00	-2.63
			Schalen	40.00	2.0	13.00	0.077	0.300	2.0	0.150	12.00	6.00	9.0	1.3	0.67			
			Bewehren	500.00	3.0	225.00	0.004	0.006	2.0	0.003	3.00	1.50	9.0	0.3	0.17			
			Betonieren	5.00	3.0	6.30	0.159	0.600	3.0	0.200	3.00	1.00	9.0	0.3	0.11			
2.0	10	0.25	Total								18.00	8.50		2.00	0.94	10.00	9.00	-0.50
			Schalen	50.00	2.0	13.00	0.077	0.300	2.0	0.150	15.00	7.50	9.0	1.7	0.83			
			Bewehren	625.00	3.0	225.00	0.004	0.006	2.0	0.003	3.75	1.88	9.0	0.4	0.21			
			Betonieren	6.25	3.0	6.30	0.159	0.600	3.0	0.200	3.75	1.25	9.0	0.4	0.14			
2.5	10	0.25	Total								22.50	10.63		2.50	1.18	10.00	9.00	1.63
			Schalen	60.00	2.0	13.00	0.077	0.300	2.0	0.150	18.00	9.00	9.0	2.0	1.00			
			Bewehren	750.00	3.0	225.00	0.004	0.006	2.0	0.003	4.50	2.25	9.0	0.5	0.25			
			Betonieren	7.50	3.0	6.30	0.159	0.600	3.0	0.200	4.50	1.50	9.0	0.5	0.17			
3.0	10	0.25	Total								27.00	12.75		3.00	1.42	10.00	9.00	3.75
			Schalen	70.00	2.0	13.00	0.077	0.300	2.0	0.150	21.00	10.50	9.0	2.3	1.17			
			Bewehren	875.00	3.0	225.00	0.004	0.006	2.0	0.003	5.25	2.63	9.0	0.6	0.29			
			Betonieren	8.75	3.0	6.30	0.159	0.600	3.0	0.200	5.25	1.75	9.0	0.6	0.19			
3.5	10	0.25	Total								31.50	14.88		3.50	1.65	10.00	9.00	5.88
			Schalen	80.00	2.0	13.00	0.077	0.300	2.0	0.150	24.00	12.00	9.0	2.7	1.33			
			Bewehren	1000.00	3.0	225.00	0.004	0.006	2.0	0.003	6.00	3.00	9.0	0.7	0.33			
			Betonieren	10.00	3.0	6.30	0.159	0.600	3.0	0.200	6.00	2.00	9.0	0.7	0.22			
4.0	10	0.25	Total								36.00	17.00	</					

Anhang 2 - Meeting Sales-Team von Alice

Date: 01.03.2023

Time: 11:00

Participants: **Klara Buresova**

Enterprise Account Executive EMEA

lara@alicetechnologies.com

Thien-Phuoc Vo

thien-phuoc.vo@martiaq.ch

The meeting is summarized with the most significant key points

Klara Buresova:

Introduction to the Software Alice

- Founded in the year 2013 at Stanford
- Founder is René Morkos, CEO, Ph.D. Stanford
- Metrics: Reduction of project duration, labor and equipment cost savings
- User flow of the software: Load a model, define Rule Sets, explore scenarios

Questions and Answers

Pricing

1. What is the cost of using Alice Software? Is there a demo version available?

There is no Demo Version to use. In order for Alice to be used, construction projects typically need to have a construction value between 80 – 150 Mio. Dollars. A support team is then assigned to assist the project in implementing Alice and subsequently charges a fee equivalent to 10% of the project's total value as profit.

Model preparation

2. Are there any constraints associated with the model?

Model size constraints: File size < 1GB
Element count < 40'000 elements
Polygon count < 1 Mio. polygons

3. What kind of files can be imported

Currently only Revit and Navisworks files.

4. Is it possible to import properties, such as materials and crew numbers?

Yes, the properties can be seen in the viewer. However, they must be assigned in the software to use material and crew numbers for the calculation.

5. Therefore the input has to be done manually in Alice?

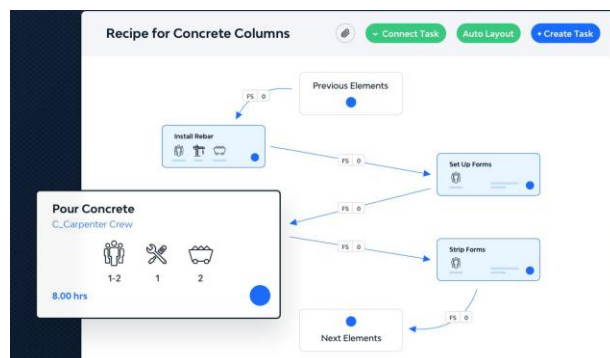
Correct, however once assigned, they can be assigned automatically to the same ifc-types again. For a faster assignment, it is possible to export, edit, and reimport a csv file.

Software

Receipts

6. How are the tasks assigned?

For each ifc type, a set of tasks can be assigned to each ifc-type, known as "receipts".



7. Do the receipts need to be assigned manually to every building element?

Yes, during the initial run-through.

Crews

8. Is it possible to assign multiple crews to a single task?

Yes

9. Can a task have a mixed crew, like formwork and concrete?

Yes, however, the defined task would always have a mixed crew for every building element, if assigned to that specific building element.

Predecessor

10. How does the automatic support determine the predecessor and successor?

Defined floors are used to perform a preliminary allocation and following that a rules with ifc-types are used to define predecessor and successor.

Is it possible to modify the relationships manually following the automatic support?

Yes, with zones. Zones can be used to group elements for defining predecessors and successors, or they can be defined to enforce spatial constraints.

11. Are the predecessors influenced by the zones?

No, they can be classified as spatial constraint zones and predecessor zones.

Metrics

12. Is it possible for the formwork surfaces to be automatically assigned, or must they be assigned using a formula?

In the initial runthrough, the formwork must be manually assigned to the ifc types.

13. What about slanted surfaces?

Yes. There are formulas for slanted surface areas.

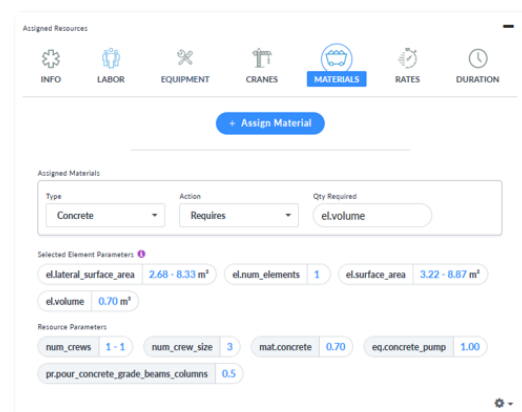
Possible formulas were shown

Schedule

14. Is it possible to partially recalculate a model?

For example, is it possible to compute only a part of the model if construction has already been going on for a month and a new schedule is needed?

Yes. However, the model may require a partial reconnection of the predecessors.



Anhang 3 - Leistungswerte SBV

Kleinbaustellen

				SBV 2025 - 241-A19 Kleinbaustellen					
Bauteil	NPK	Tasks	Einheit	Gruppengrösse	Leistung pro Gruppe [LE/h]	Leistungswert pro Gruppe [h/LE]	Leistungswert pro Arbeiter [h/LE]	Leistungswert pro Arbeiter Nebenarbeiten [h/LE]	Leistungswert pro Arbeiter Total [h/LE]
Fundamente	214.112	Schalung	m2	2.165	3.2	0.313	0.677	0.18	0.857
Fundamente	511.112	Bewehrung	kg	2.2	160	0.006	0.014		0.014
Fundamente	612.112	Betonierung	m3	2.925	5	0.200	0.585	0.2	0.785
Fundamente	218.112	Abschalung	m2	2	3.3	0.303	0.606	0.28	0.886
Bodenplatte	216.112	Schalung	m2	2.165	3.4	0.294	0.637	0.18	0.817
Bodenplatte	511.112	Bewehrung	kg	2.2	160	0.006	0.014		0.014
Bodenplatte	613.112	Betonierung + Nachbeh.	m3	3.04	6	0.167	0.507	0.3	0.807
Bodenplatte	218.112	Abschalung	m2	2	3.3	0.303	0.606	0.28	0.886
Wand	231.103	Schalung	m2	2.44	4.25	0.235	0.574	0.13	0.704
Wand	511.112	Bewehrung	kg	2.2	160	0.006	0.014		0.014
Wand	631.132	Betonierung + Nachbeh.	m3	2.86	3.7	0.270	0.773	0.25	1.023
Wand	235.111	Abschalung	m2	2	2.7	0.370	0.741	0.35	1.091
Stuetze	241.122	Schalung	m2	2.33	2.9	0.345	0.803	0.2	1.003
Stuetze	511.112	Bewehrung	kg	2.2	160	0.006	0.014		0.014
Stuetze	641.131	Betonierung + Nachbeh.	m3	2.75	2.1	0.476	1.310	0.6	1.910
Stuetze	248.112	Abschalung	m2	2.11	1.95	0.513	1.082	0.1	1.182
Decke	261.113	Schalung	m2	2.275	5.75	0.174	0.396	0.2	0.596
Decke	511.112	Bewehrung	kg	2.2	160	0.006	0.014		0.014
Decke	661.112	Betonierung + Nachbeh.	m3	4.1	7	0.143	0.586	0.153	0.739
Decke	268.211	Abschalung	m2	2.165	2.65	0.377	0.817	0.1	0.917
Balken	245.113	Schalung	m2	2.275	1.8	0.556	1.264	0.2	1.464
Balken	511.112	Bewehrung	kg	2.2	160	0.006	0.014		0.014
Balken	645.112	Betonierung + Nachbeh.	m3	4.025	5.15	0.194	0.782	0.2	0.982
Balken	248.112	Abschalung	m2	2.11	1.95	0.513	1.082	0.1	1.182

Mittelgrosse Baustellen

				SBV 2025 - 241-A19 Mittelgrosse Baustellen					
Bauteil	NPK	Tasks	Einheit	Gruppengrösse	Leistung pro Gruppe [LE/h]	Leistungswert pro Gruppe [h/LE]	Leistungswert pro Arbeiter [h/LE]	Leistungswert pro Arbeiter Nebenarbeiten [h/LE]	Leistungswert pro Arbeiter Total [h/LE]
Fundamente	214.112	Schalung	m2	2.22	3.6	0.278	0.617	0.15	0.767
Fundamente	511.112	Bewehrung	kg	0.33	300	0.003	0.001		0.001
Fundamente	612.112	Betonierung	m3	2.945	8	0.125	0.368	0.15	0.518
Fundamente	218.112	Abschalung	m2	2	3.3	0.303	0.606	0.28	0.886
Bodenplatte	216.112	Schalung	m2	2.22	3.7	0.270	0.600	0.15	0.750
Bodenplatte	511.112	Bewehrung	kg	0.33	300	0.003	0.001		0.001
Bodenplatte	613.112	Betonierung + Nachbeh.	m3	4.28	14	0.071	0.306	0.225	0.531
Bodenplatte	218.112	Abschalung	m2	2	3.3	0.303	0.606	0.28	0.886
Wand	231.103	Schalung	m2	0.495	6.25	0.160	0.079	0.11	0.189
Wand	511.112	Bewehrung	kg	0.33	300	0.003	0.001		0.001
Wand	631.132	Betonierung + Nachbeh.	m3	4.025	7.75	0.129	0.519	0.2	0.719
Wand	235.111	Abschalung	m2	2	2.7	0.370	0.741	0.35	1.091
Stuetze	241.122	Schalung	m2	0.385	9.5	0.105	0.041	0.35	0.391
Stuetze	511.112	Bewehrung	kg	0.33	300	0.003	0.001		0.001
Stuetze	641.131	Betonierung + Nachbeh.	m3	2.86	2.5	0.400	1.144	0.55	1.694
Stuetze	248.112	Abschalung	m2	2.11	1.95	0.513	1.082	0.1	1.182
Decke	261.113	Schalung	m2	0.22	8.5	0.118	0.026	0.13	0.156
Decke	511.112	Bewehrung	kg	0.33	300	0.003	0.001		0.001
Decke	661.112	Betonierung + Nachbeh.	m3	4.1	12	0.083	0.342	0.11	0.452
Decke	268.211	Abschalung	m2	2.165	2.65	0.377	0.817	0.1	0.917
Balken	245.113	Schalung	m2	0.44	5.5	0.182	0.080	0.3	0.380
Balken	511.112	Bewehrung	kg	0.33	300	0.003	0.001		0.001
Balken	645.112	Betonierung + Nachbeh.	m3	4.19	8.25	0.121	0.508	0.175	0.683
Balken	248.112	Abschalung	m2	2.11	1.95	0.513	1.082	0.1	1.182

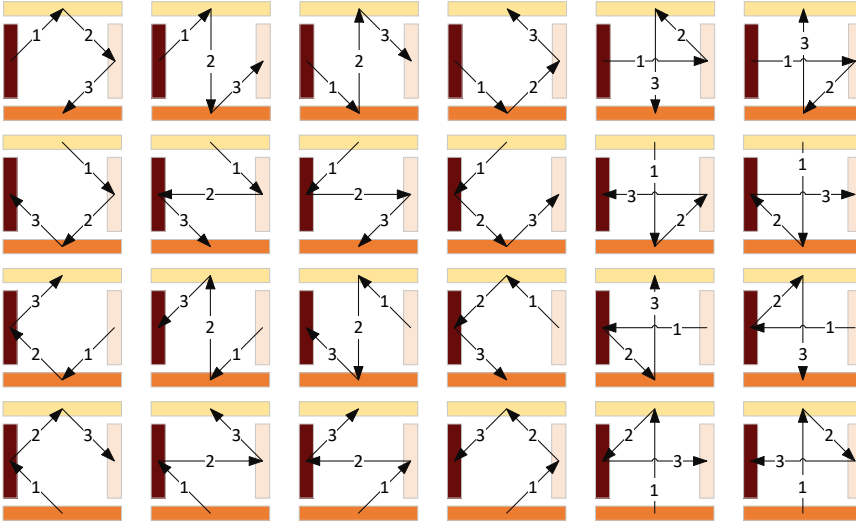
Grossbaustellen

				SBV 2025 - 241-A19 Grossbaustellen					
Bauteil	NPK	Tasks	Einheit	Gruppengrösse	Leistung pro Gruppe [LE/h]	Leistungswert pro Gruppe [h/LE]	Leistungswert pro Arbeiter [h/LE]	Leistungswert pro Arbeiter Nebenarbeiten [h/LE]	Leistungswert pro Arbeiter Total [h/LE]
Fundamente	214.112	Schalung	m2	2.275	4.1	0.244	0.555	0.12	0.675
Fundamente	511.112	Bewehrung	kg	0.33	300	0.003	0.001		0.001
Fundamente	612.112	Betonierung	m3	2.965	14	0.071	0.212	0.1	0.312
Fundamente	218.112	Abschalung	m2	2	3.3	0.303	0.606	0.28	0.886
Bodenplatte	216.112	Schalung	m2	2.275	4.1	0.244	0.555	0.12	0.675
Bodenplatte	511.112	Bewehrung	kg	0.33	300	0.003	0.001		0.001
Bodenplatte	613.112	Betonierung + Nachbeh.	m3	4.3	24.5	0.041	0.176	0.15	0.326
Bodenplatte	218.112	Abschalung	m2	2	3.3	0.303	0.606	0.28	0.886
Wand	231.103	Schalung	m2	0.55	10.5	0.095	0.052	0.09	0.142
Wand	511.112	Bewehrung	kg	0.385	400	0.003	0.001		0.001
Wand	631.132	Betonierung + Nachbeh.	m3	4.08	12.75	0.078	0.320	0.15	0.470
Wand	235.111	Abschalung	m2	2	2.7	0.370	0.741	0.35	1.091
Stuetze	241.122	Schalung	m2	0.385	12	0.083	0.032	0.3	0.332
Stuetze	511.112	Bewehrung	kg	0.385	400	0.003	0.001		0.001
Stuetze	641.131	Betonierung + Nachbeh.	m3	0.385	400	0.003	0.001	0.5	0.501
Stuetze	248.112	Abschalung	m2	0.385	400	0.003	0.001	0.1	0.101
Decke	261.113	Schalung	m2	0.385	400	0.003	0.001	0.07	0.071
Decke	511.112	Bewehrung	kg	0.385	400	0.003	0.001		0.001
Decke	661.112	Betonierung + Nachbeh.	m3	0.385	400	0.003	0.001	0.092	0.093
Decke	268.211	Abschalung	m2	0.385	400	0.003	0.001	0.1	0.101
Balken	245.113	Schalung	m2	0.385	400	0.003	0.001	0.3	0.301
Balken	511.112	Bewehrung	kg	0.385	400	0.003	0.001		0.001
Balken	645.112	Betonierung + Nachbeh.	m3	0.385	400	0.003	0.001	0.15	0.151
Balken	248.112	Abschalung	m2	0.385	400	0.003	0.001	0.1	0.101

Anhang 4 - Anordnungsmöglichkeiten für 4 Wände

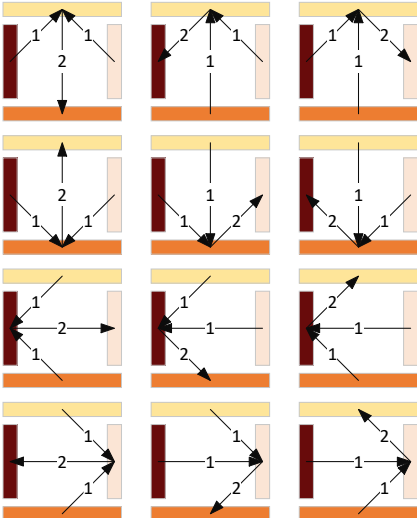
Sequenziell

1 sequenziell - 1 sequenziell - sequenziell - sequenziell (24 Permutationen)

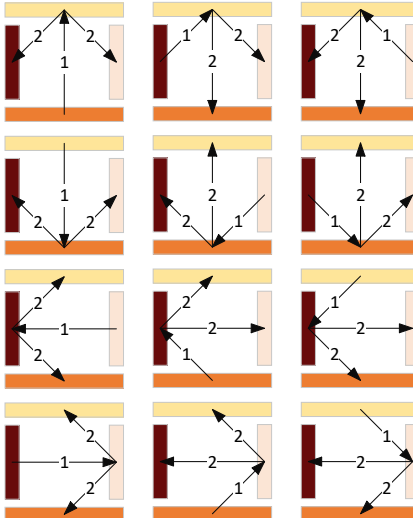


Parallel und Sequenziell

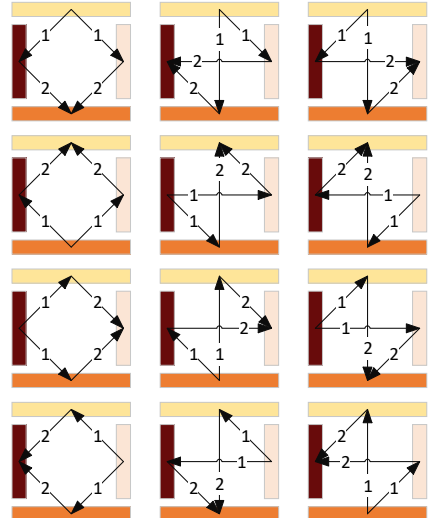
2 parallel - sequenziell - sequenziell (12 Permutationen)



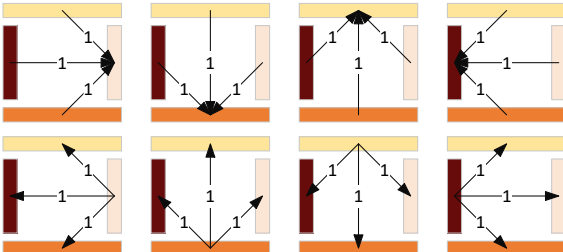
1 sequenziell - sequenziell - parallel (12 Permutationen)



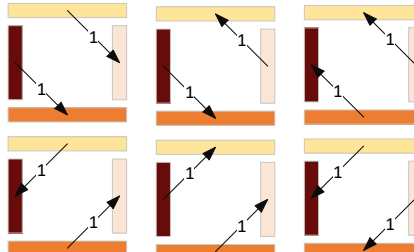
1 sequenziell - parallel - 1 sequenziell (12 Permutationen)



3 parallel - 1 sequenziell (8 Permutationen)

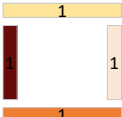


2 parallel - parallel (6 Permutationen)



Parallel

4 parallel (1 Permutation)



Anhang 5 - Terminprogramm K4 Schärenmoos

Nr.	Geschoss	Etappe	Bezeichnung	Dauer	S [m2]	A [t]	B [m3]	Anfang	Ende	Arbeit	2025	2025	2025
2	EG		Haus A	124 t				Mon 28.04.25 08:00	Don 16.10.25 17:00	7'587.7 h	Apr	Jul	Okt
3	EG		Erstgeschoss	45 t				Mon 28.04.25 08:00	Fre 27.06.25 17:00	1'394.1 h	Apr	Jul	Okt
4	EG	1	Wände Beton Etappe 1	8 t	286.95	3.73	34.30	Mon 28.04.25 08:00	Don 16.10.25 17:00	1'394.1 h	Apr	Jul	Okt
5	EG	1	Wände Mauerwerk Etappe 1	3 t				Don 13.05.25 08:00	Don 15.05.25 17:00	0 h	Apr	Jul	Okt
6	EG	1	Decke u. EG Etappe 1	6 t	270.93	8.14	74.74	Don 13.05.25 08:00	Don 15.05.25 17:00	183.5 h	Apr	Jul	Okt
7	EG	2	Wände Beton Etappe 2	8 t	318.99	4.54	41.70	Don 13.05.25 08:00	Don 15.05.25 17:00	364.2 h	Apr	Jul	Okt
8	EG	2	Wände Mauerwerk Etappe 2	3 t				Don 13.05.25 08:00	Don 15.05.25 17:00	0 h	Apr	Jul	Okt
9	EG	2	Decke u. EG Etappe 2	6 t	272.27	8.22	75.46	Don 13.05.25 08:00	Don 15.05.25 17:00	184.5 h	Apr	Jul	Okt
10	EG	3	Wände Beton Etappe 3	8 t	325.95	4.58	42.06	Don 13.05.25 08:00	Don 15.05.25 17:00	371.4 h	Apr	Jul	Okt
11	EG	3	Wände Mauerwerk Etappe 3	3 t				Don 13.05.25 08:00	Don 15.05.25 17:00	0 h	Apr	Jul	Okt
12	EG	3	Decke u. EG Etappe 3	6 t	216.57	6.49	59.58	Don 13.05.25 08:00	Don 15.05.25 17:00	146.7 h	Apr	Jul	Okt
13	1.OG		1. Obergeschoss	44 t				Mon 26.05.25 08:00	Don 24.07.25 17:00	1'381.7 h	Apr	Jul	Okt
14	1.OG	1	Wände Beton Etappe 1	8 t	285.32	3.70	33.99	Mon 26.05.25 08:00	Don 24.07.25 17:00	1'381.7 h	Apr	Jul	Okt
15	1.OG	1	Wände Mauerwerk Etappe 1	3 t				Mon 26.05.25 08:00	Don 24.07.25 17:00	0 h	Apr	Jul	Okt
16	1.OG	1	Decke u. 1.OG Etappe 1	6 t	265.67	8.02	73.63	Mon 26.05.25 08:00	Don 24.07.25 17:00	180 h	Apr	Jul	Okt
17	1.OG	2	Wände Beton Etappe 2	8 t	322.50	4.56	41.90	Mon 26.05.25 08:00	Don 24.07.25 17:00	367.8 h	Apr	Jul	Okt
18	1.OG	2	Wände Mauerwerk Etappe 2	3 t				Mon 26.05.25 08:00	Don 24.07.25 17:00	0 h	Apr	Jul	Okt
19	1.OG	2	Decke u. 1.OG Etappe 2	6 t	272.27	8.22	75.46	Mon 26.05.25 08:00	Don 24.07.25 17:00	184.5 h	Apr	Jul	Okt
20	1.OG	3	Wände Beton Etappe 3	7 t	328.90	4.00	42.26	Mon 26.05.25 08:00	Don 24.07.25 17:00	374.5 h	Apr	Jul	Okt
21	1.OG	3	Wände Mauerwerk Etappe 3	3 t				Mon 26.05.25 08:00	Don 24.07.25 17:00	0 h	Apr	Jul	Okt
22	1.OG	3	Decke u. 1.OG Etappe 3	6 t	211.31	6.37	58.47	Mon 26.05.25 08:00	Don 24.07.25 17:00	143.2 h	Apr	Jul	Okt
23	2.OG		2. Obergeschoss	43 t				Mon 26.05.25 08:00	Don 24.07.25 17:00	1'380.3 h	Apr	Jul	Okt
24	2.OG	1	Wände Beton Etappe 1	8 t	285.32	3.70	33.99	Mon 26.05.25 08:00	Don 24.07.25 17:00	1'380.3 h	Apr	Jul	Okt
25	2.OG	1	Wände Mauerwerk Etappe 1	3 t				Mon 26.05.25 08:00	Don 24.07.25 17:00	0 h	Apr	Jul	Okt
26	2.OG	1	Decke u. 2.OG Etappe 1	6 t	265.67	8.02	73.63	Mon 26.05.25 08:00	Don 24.07.25 17:00	180 h	Apr	Jul	Okt
27	2.OG	2	Wände Beton Etappe 2	8 t	322.43	4.56	41.89	Mon 26.05.25 08:00	Don 24.07.25 17:00	367.8 h	Apr	Jul	Okt
28	2.OG	2	Wände Mauerwerk Etappe 2	3 t				Mon 26.05.25 08:00	Don 24.07.25 17:00	0 h	Apr	Jul	Okt
29	2.OG	2	Decke u. 2.OG Etappe 2	6 t	272.27	8.22	75.46	Mon 26.05.25 08:00	Don 24.07.25 17:00	184.5 h	Apr	Jul	Okt
30	2.OG	3	Wände Beton Etappe 3	8 t	326.21	4.57	41.93	Mon 26.05.25 08:00	Don 24.07.25 17:00	371.5 h	Apr	Jul	Okt
31	2.OG	3	Wände Mauerwerk Etappe 3	3 t				Mon 26.05.25 08:00	Don 24.07.25 17:00	0 h	Apr	Jul	Okt
32	2.OG	3	Decke u. 2.OG Etappe 3	6 t	211.31	6.37	58.47	Mon 26.05.25 08:00	Don 24.07.25 17:00	144.8 h	Apr	Jul	Okt
33	3.OG		3. Obergeschoss	45 t				Don 22.07.25 08:00	Mon 22.09.25 17:00	1'375.5 h	Apr	Jul	Okt
34	3.OG	1	Wände Beton Etappe 1	8 t	282.93	3.57		Don 22.07.25 08:00	Mon 22.09.25 17:00	329 h	Apr	Jul	Okt
35	3.OG	1	Wände Mauerwerk Etappe 1	3 t				Don 22.07.25 08:00	Mon 22.09.25 17:00	0 h	Apr	Jul	Okt
36	3.OG	1	Decke u. 3.OG Etappe 1	6 t	264.97	8.24	75.65	Don 22.07.25 08:00	Mon 22.09.25 17:00	180.5 h	Apr	Jul	Okt
37	3.OG	2	Wände Beton Etappe 2	8 t	319.90	4.53	41.56	Don 22.07.25 08:00	Mon 22.09.25 17:00	364.9 h	Apr	Jul	Okt
38	3.OG	2	Wände Mauerwerk Etappe 2	3 t				Don 22.07.25 08:00	Mon 22.09.25 17:00	0 h	Apr	Jul	Okt
39	3.OG	2	Decke u. 3.OG Etappe 2	6 t	271.97	8.51	78.13	Don 22.07.25 08:00	Mon 22.09.25 17:00	185.4 h	Apr	Jul	Okt
40	3.OG	3	Wände Beton Etappe 3	9 t	326.15	4.56	41.92	Don 22.07.25 08:00	Mon 22.09.25 17:00	371.5 h	Apr	Jul	Okt
41	3.OG	3	Wände Mauerwerk Etappe 3	3 t				Don 22.07.25 08:00	Mon 22.09.25 17:00	0 h	Apr	Jul	Okt
42	3.OG	3	Decke u. 3.OG Etappe 3	6 t	211.01	6.65	61.08	Don 22.07.25 08:00	Mon 22.09.25 17:00	144.2 h	Apr	Jul	Okt
43	Atika		Atika	42 t				Mon 20.08.25 08:00	Don 16.10.25 17:00	1'268.1 h	Apr	Jul	Okt
44	Atika	1	Wände Beton Etappe 1	6 t	236.27	3.16	29.00	Mon 20.08.25 08:00	Don 16.10.25 17:00	267.5 h	Apr	Jul	Okt
45	Atika	1	Wände Mauerwerk Etappe 1	3 t				Mon 20.08.25 08:00	Don 16.10.25 17:00	0 h	Apr	Jul	Okt
46	Atika	1	Decke u. Atika Etappe 1	6 t	191.28	5.85	53.70	Mon 20.08.25 08:00	Don 16.10.25 17:00	124 h	Apr	Jul	Okt
47	Atika	2	Wände Beton Etappe 2	7 t	270.63	3.95	35.33	Mon 20.08.25 08:00	Don 16.10.25 17:00	308.9 h	Apr	Jul	Okt
48	Atika	2	Wände Mauerwerk Etappe 2	3 t				Mon 20.08.25 08:00	Don 16.10.25 17:00	0 h	Apr	Jul	Okt
49	Atika	2	Decke u. Atika Etappe 2	6 t	197.74	6.39	58.64	Mon 20.08.25 08:00	Don 16.10.25 17:00	135.3 h	Apr	Jul	Okt
50	Atika	3	Wände Beton Etappe 3	7 t	278.00	3.89	35.73	Mon 20.08.25 08:00	Don 16.10.25 17:00	316.6 h	Apr	Jul	Okt
51	Atika	3	Wände Mauerwerk Etappe 3	3 t				Mon 20.08.25 08:00	Don 16.10.25 17:00	0 h	Apr	Jul	Okt
52	Atika	3	Decke u. Atika Etappe 3	6 t	181.43	5.36	49.24	Mon 20.08.25 08:00	Don 16.10.25 17:00	113.8 h	Apr	Jul	Okt

Anhang 6 - Auswertungstabelle Schärenmoos – Dauer in Tagen

Bezeichnung	Startdatum	Enddatum	Dauer konv.	Dauer Programm					
Haus A	Mon 28.04.25 08:00	Don 16.10.25 17:00	119	128	123	118	113	107	68
Erdgeschoss	Mon 28.04.25 08:00	Fre 27.06.25 17:00	40	43	41	39	37	35	21
Wände Beton Etappe 1	Mon 28.04.25 08:00	Mit 07.05.25 17:00	8	6	6	5	5	5	3
Decke ü. EG Etappe 1	Mit 14.05.25 08:00	Mit 21.05.25 17:00	6	6	7	6	6	5	7
Wände Beton Etappe 2	Mit 14.05.25 08:00	Fre 23.05.25 17:00	8	9	9	8	8	7	3
Decke ü. EG Etappe 2	Mon 02.06.25 08:00	Mon 09.06.25 17:00	6	7	6	6	6	6	7
Wände Beton Etappe 3	Die 03.06.25 08:00	Don 12.06.25 17:00	8	5	6	5	5	4	3
Decke ü. EG Etappe 3	Fre 20.06.25 08:00	Fre 27.06.25 17:00	6	6	5	5	4	4	5
1. Obergeschoss	Mon 26.05.25 08:00	Don 24.07.25 17:00	39	52	50	47	46	43	28
Wände Beton Etappe 1	Mon 26.05.25 08:00	Mit 04.06.25 17:00	8	5	5	4	4	4	3
Decke ü. 1.OG Etappe 1	Fre 13.06.25 08:00	Fre 20.06.25 17:00	6	7	6	6	6	5	7
Wände Beton Etappe 2	Fre 13.06.25 08:00	Die 24.06.25 17:00	8	7	8	7	7	6	3
Decke ü. 1.OG Etappe 2	Die 01.07.25 08:00	Die 08.07.25 17:00	6	6	6	6	6	6	7
Wände Beton Etappe 3	Die 01.07.25 08:00	Mit 09.07.25 17:00	7	5	5	5	5	5	3
Decke ü. 1.OG Etappe 3	Don 17.07.25 08:00	Don 24.07.25 17:00	6	5	5	5	5	4	5
2. Obergeschoss	Mit 25.06.25 08:00	Fre 22.08.25 17:00	38	59	57	54	52	50	28
Wände Beton Etappe 1	Mit 25.06.25 08:00	Fre 04.07.25 17:00	8	12	12	11	10	10	3
Decke ü. 2.OG Etappe 1	Don 10.07.25 08:00	Don 17.07.25 17:00	6	6	7	6	5	5	7
Wände Beton Etappe 2	Fre 11.07.25 08:00	Die 22.07.25 17:00	8	8	7	7	7	6	3
Decke ü. 2.OG Etappe 2	Die 29.07.25 08:00	Die 05.08.25 17:00	6	7	6	6	5	6	7
Wände Beton Etappe 3	Die 29.07.25 08:00	Don 07.08.25 17:00	8	6	6	5	4	5	3
Decke ü. 2.OG Etappe 3	Fre 15.08.25 08:00	Fre 22.08.25 17:00	6	6	5	4	5	5	5
3. Obergeschoss	Die 22.07.25 08:00	Mon 22.09.25 17:00	40	45	42	40	39	37	20
Wände Beton Etappe 1	Die 22.07.25 08:00	Don 31.07.25 17:00	8	12	11	10	11	10	3
Decke ü. 3.OG Etappe 1	Don 07.08.25 08:00	Don 14.08.25 17:00	6	5	5	4	4	4	5
Wände Beton Etappe 2	Mon 11.08.25 08:00	Mit 20.08.25 17:00	8	7	8	8	7	6	3
Decke ü. 3.OG Etappe 2	Mit 27.08.25 08:00	Mit 03.09.25 17:00	6	5	5	5	4	5	6
Wände Beton Etappe 3	Mit 27.08.25 08:00	Mon 08.09.25 17:00	9	8	8	8	7	7	3
Decke ü. 3.OG Etappe 3	Mon 15.09.25 08:00	Mon 22.09.25 17:00	6	5	4	4	4	3	5
Attika	Mit 20.08.25 08:00	Don 16.10.25 17:00	37	36	34	34	32	30	14
Wände Beton Etappe 1	Mit 20.08.25 08:00	Mit 27.08.25 17:00	6	15	14	14	13	12	3
Decke ü. Attika Etappe 1	Mit 03.09.25 08:00	Mit 10.09.25 17:00	6	6	5	5	5	5	6
Wände Beton Etappe 2	Die 09.09.25 08:00	Mit 17.09.25 17:00	7	9	9	8	8	8	8
Decke ü. Attika Etappe 2	Mit 24.09.25 08:00	Mit 01.10.25 17:00	6	6	5	6	5	5	6
Wände Beton Etappe 3	Die 23.09.25 08:00	Mit 01.10.25 17:00	7	8	8	7	6	6	3
Decke ü. Attika Etappe 3	Don 09.10.25 08:00	Don 16.10.25 17:00	6	4	4	5	5	4	5
			Terminplan	Var 1	Var 2	Var 3	Var 4	Var 5	Var ∞
Anzahl Personal			18	18	18	18	18	18	∞
Verfügbare Schalung			1200	1200	1200	1200	1200	1200	∞
Betonliefermenge			150	150	150	150	150	150	∞
Puffer[%]			-	20	15	10	5	0	20
Arbeitsstunden pro Tag			9	9	9	9	9	9	9
Arbeitsgruppe pro Task			3	3	3	3	3	3	3

Anhang 7 - Auswertungstabelle Schärenmoos – Zeitdifferenz in Tagen

Bezeichnung	Dauer konv.	Zeitdifferenz Programm in Tagen					
Haus A	119	9	4	-1	-6	-12	-51
Erdgeschoss	40	3	1	-1	-3	-5	-19
Wände Beton Etappe 1	8	-2	-2	-3	-3	-3	-5
Decke ü. EG Etappe 1	6	0	1	0	0	-1	1
Wände Beton Etappe 2	8	1	1	0	0	-1	-5
Decke ü. EG Etappe 2	6	1	0	0	0	0	1
Wände Beton Etappe 3	8	-3	-2	-3	-3	-4	-5
Decke ü. EG Etappe 3	6	0	-1	-1	-2	-2	-1
1. Obergeschoss	39	13	11	8	7	4	-11
Wände Beton Etappe 1	8	-3	-3	-4	-4	-4	-5
Decke ü. 1.OG Etappe 1	6	1	0	0	0	-1	1
Wände Beton Etappe 2	8	-1	0	-1	-1	-2	-5
Decke ü. 1.OG Etappe 2	6	0	0	0	0	0	1
Wände Beton Etappe 3	7	-2	-2	-2	-2	-2	-4
Decke ü. 1.OG Etappe 3	6	-1	-1	-1	-1	-2	-1
2. Obergeschoss	38	21	19	16	14	12	-10
Wände Beton Etappe 1	8	4	4	3	2	2	-5
Decke ü. 2.OG Etappe 1	6	0	1	0	-1	-1	1
Wände Beton Etappe 2	8	0	-1	-1	-1	-2	-5
Decke ü. 2.OG Etappe 2	6	1	0	0	-1	0	1
Wände Beton Etappe 3	8	-2	-2	-3	-4	-3	-5
Decke ü. 2.OG Etappe 3	6	0	-1	-2	-1	-1	-1
3. Obergeschoss	40	5	2	0	-1	-3	-20
Wände Beton Etappe 1	8	4	3	2	3	2	-5
Decke ü. 3.OG Etappe 1	6	-1	-1	-2	-2	-2	-1
Wände Beton Etappe 2	8	-1	0	0	-1	-2	-5
Decke ü. 3.OG Etappe 2	6	-1	-1	-1	-2	-1	0
Wände Beton Etappe 3	9	-1	-1	-1	-2	-2	-6
Decke ü. 3.OG Etappe 3	6	-1	-2	-2	-2	-3	-1
Attika	37	-1	-3	-3	-5	-7	-23
Wände Beton Etappe 1	6	9	8	8	7	6	-3
Decke ü. Attika Etappe 1	6	0	-1	-1	-1	-1	0
Wände Beton Etappe 2	7	2	2	1	1	1	1
Decke ü. Attika Etappe 2	6	0	-1	0	-1	-1	0
Wände Beton Etappe 3	7	1	1	0	-1	-1	-4
Decke ü. Attika Etappe 3	6	-2	-2	-1	-1	-2	-1
	Terminplan	Var 1	Var 2	Var 3	Var 4	Var 5	Var ∞
Anzahl Personal	18	18	18	18	18	18	∞
Verfügbare Schalung	1200	1200	1200	1200	1200	1200	∞
Betonliefermenge	150	150	150	150	150	150	∞
Puffer [%]	-	20	15	10	5	0	20
Arbeitsstunden pro Tag	9	9	9	9	9	9	9
Arbeitsgruppe pro Task	3	3	3	3	3	3	3

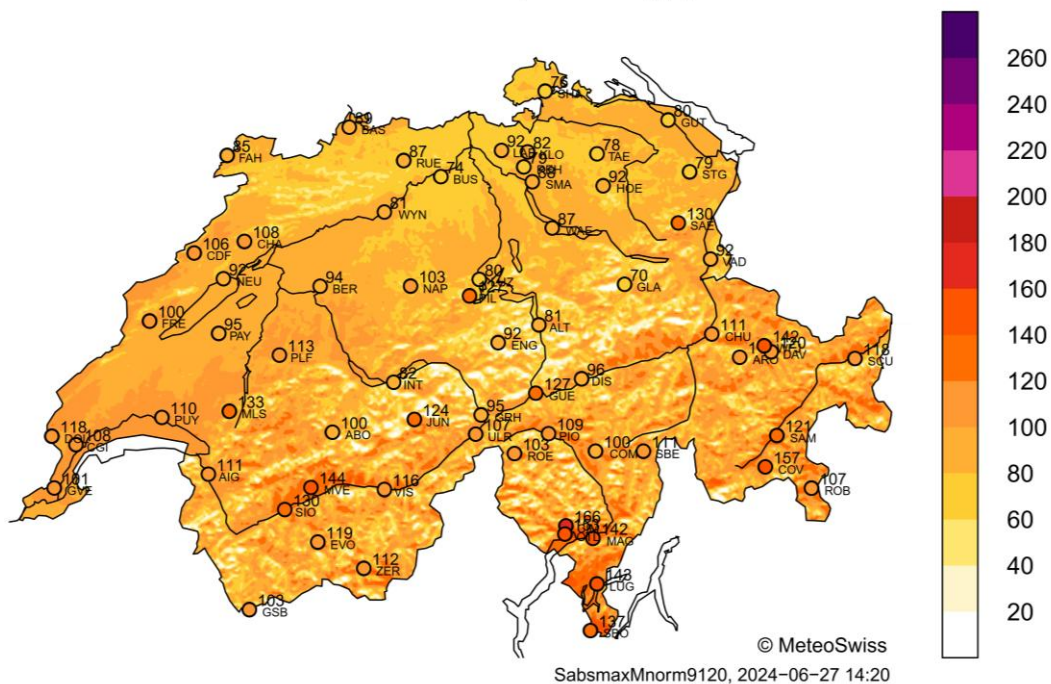
Anhang 8 – Auswertungstabelle Schärenmoos – Differenz in Prozent

Bezeichnung	Dauer konv.	Zeitdifferenz in Prozent					
Haus A	119	8%	3%	-1%	-5%	-10%	-43%
Erdgeschoss	40	8%	3%	-3%	-8%	-13%	-48%
Wände Beton Etappe 1	8	-25%	-25%	-38%	-38%	-38%	-63%
Decke ü. EG Etappe 1	6	0%	17%	0%	0%	-17%	17%
Wände Beton Etappe 2	8	13%	13%	0%	0%	-13%	-63%
Decke ü. EG Etappe 2	6	17%	0%	0%	0%	0%	17%
Wände Beton Etappe 3	8	-38%	-25%	-38%	-38%	-50%	-63%
Decke ü. EG Etappe 3	6	0%	-17%	-17%	-33%	-33%	-17%
1. Obergeschoss	39	33%	28%	21%	18%	10%	-28%
Wände Beton Etappe 1	8	-38%	-38%	-50%	-50%	-50%	-63%
Decke ü. 1.OG Etappe 1	6	17%	0%	0%	0%	-17%	17%
Wände Beton Etappe 2	8	-13%	0%	-13%	-13%	-25%	-63%
Decke ü. 1.OG Etappe 2	6	0%	0%	0%	0%	0%	17%
Wände Beton Etappe 3	7	-29%	-29%	-29%	-29%	-29%	-57%
Decke ü. 1.OG Etappe 3	6	-17%	-17%	-17%	-17%	-33%	-17%
2. Obergeschoss	38	55%	50%	42%	37%	32%	-26%
Wände Beton Etappe 1	8	50%	50%	38%	25%	25%	-63%
Decke ü. 2.OG Etappe 1	6	0%	17%	0%	-17%	-17%	17%
Wände Beton Etappe 2	8	0%	-13%	-13%	-13%	-25%	-63%
Decke ü. 2.OG Etappe 2	6	17%	0%	0%	-17%	0%	17%
Wände Beton Etappe 3	8	-25%	-25%	-38%	-50%	-38%	-63%
Decke ü. 2.OG Etappe 3	6	0%	-17%	-33%	-17%	-17%	-17%
3. Obergeschoss	40	13%	5%	0%	-3%	-8%	-50%
Wände Beton Etappe 1	8	50%	38%	25%	38%	25%	-63%
Decke ü. 3.OG Etappe 1	6	-17%	-17%	-33%	-33%	-33%	-17%
Wände Beton Etappe 2	8	-13%	0%	0%	-13%	-25%	-63%
Decke ü. 3.OG Etappe 2	6	-17%	-17%	-17%	-33%	-17%	0%
Wände Beton Etappe 3	9	-11%	-11%	-11%	-22%	-22%	-67%
Decke ü. 3.OG Etappe 3	6	-17%	-33%	-33%	-33%	-50%	-17%
Attika	37	-3%	-8%	-8%	-14%	-19%	-62%
Wände Beton Etappe 1	6	150%	133%	133%	117%	100%	-50%
Decke ü. Attika Etappe 1	6	0%	-17%	-17%	-17%	-17%	0%
Wände Beton Etappe 2	7	29%	29%	14%	14%	14%	14%
Decke ü. Attika Etappe 2	6	0%	-17%	0%	-17%	-17%	0%
Wände Beton Etappe 3	7	14%	14%	0%	-14%	-14%	-57%
Decke ü. Attika Etappe 3	6	-33%	-33%	-17%	-17%	-33%	-17%
	Ergebnis	5%	1%	-4%	-9%	-13%	-31%
	Terminplan	Var 1	Var 2	Var 3	Var 4	Var 5	Var ∞
Anzahl Personal	18	18	18	18	18	18	∞
Verfügbare Schalung	1200	1200	1200	1200	1200	1200	∞
Betonliefermenge	150	150	150	150	150	150	∞
Puffer [%]	-	20	15	10	5	0	20
Arbeitsstunden pro Tag	9	9	9	9	9	9	9
Arbeitsgruppe pro Task	3	3	3	3	3	3	3

Anhang 9 - Mittelwert der Sonnenstunden - MeteoSchweiz

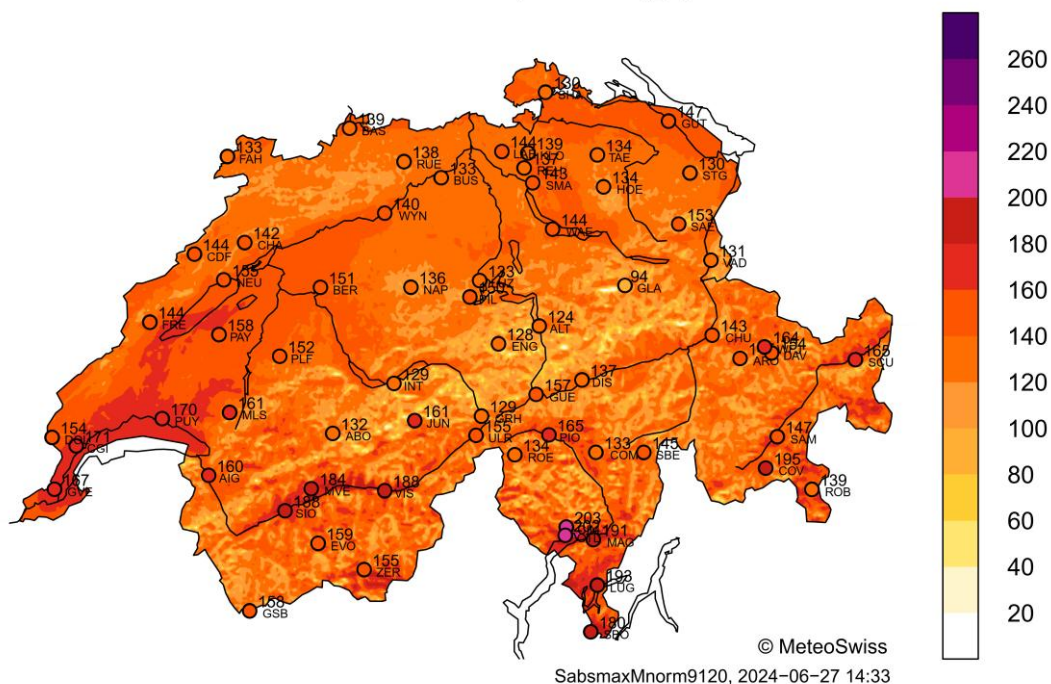
Sonnenstunden im Februar

Mean absolute sunshine duration (1991–2020) [h] – FEB



Sonnenstunden im März

Mean absolute sunshine duration (1991–2020) [h] – MAR



Anhang 10 - Klimanormwerte Bern / Zollikofen - MeteoSchweiz

Klimanormwerte Bern / Zollikofen

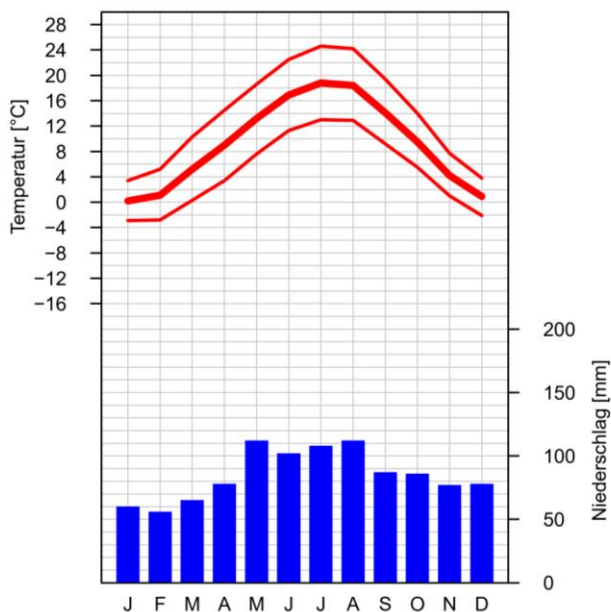
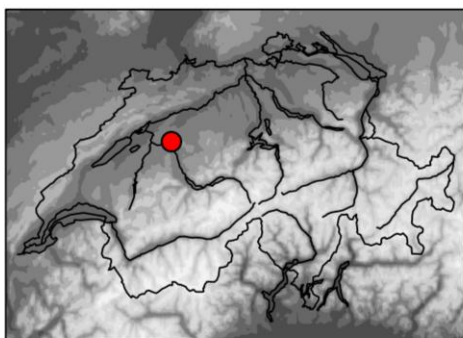
Normperiode 1991–2020

Höhe ü.M.: 553 m

Geogr. Koord.: 46.99 N / 7.46 E

CH-Koord.: 2'601'934 / 1'204'410

Klimaregion: Zentrales Mittelland



	Jan	Feb	Mar	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Jahr
Temperatur [°C]	0.2	1.1	5.2	9.0	13.2	16.9	18.8	18.4	14.1	9.5	4.2	0.9	9.3
Maximumtemp [°C]	3.4	5.2	10.3	14.5	18.6	22.5	24.6	24.2	19.4	14.0	7.7	3.8	14.0
Minimumtemp [°C]	-2.9	-2.8	0.3	3.4	7.6	11.3	13.0	12.9	9.2	5.5	1.0	-2.1	4.7
Eistage [Tage]	7.7	4.2	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	5.4	18.8
Frosttage [Tage]	23.8	21.3	14.1	4.8	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	2.1	11.3	21.6	99.2
Sommertage [Tage]	0.0	0.0	0.0	0.3	2.9	10.1	15.5	14.0	3.3	0.0	0.0	0.0	46.1
Hitzetage [Tage]	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	1.6	3.9	3.4	0.0	0.0	0.0	0.0	9.0
Sonne [h]	66	94	151	179	197	223	245	228	175	119	66	53	1797
Sonne [%]	26	35	44	47	45	50	55	56	50	38	26	22	43
Heitere Tage [Tage]	4.1	5.7	8.2	8.5	7.4	7.8	9.7	10.5	9.3	5.5	3.2	2.9	82.8
Trübe Tage [Tage]	18.1	13.6	11.3	9.4	9.6	7.7	6.2	6.6	8.9	12.4	16.8	19.5	140.1
Niederschlag Summe [mm]	60	56	65	78	112	102	108	112	87	86	77	78	1022
Niederschlag 1 mm [Tage]	9.5	8.7	9.5	9.6	12.1	11.4	10.8	11.0	8.6	10.4	10.1	10.6	122.3
Niederschlag 5 mm [Tage]	4.1	4.2	4.3	5.2	7.0	6.4	6.6	6.4	5.3	5.5	4.8	5.4	65.2
Niederschlag 10 mm [Tage]	1.7	1.7	2.2	2.6	3.9	3.4	3.9	3.9	3.0	3.4	2.4	2.6	34.7
Niederschlag 50 mm [Tage]	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.1	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.4
Niederschlag 100 mm [Tage]	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement des Innern EDI
Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie MeteoSchweiz

MeteoSchweiz

Klimanormwerte Bern / Zollikofen

Normperiode 1991–2020

Legende:

Klimadiagramm:	Grafische Darstellung von langjährigen Mittelwerten der Monatsmittel-Temperatur, der mittleren monatlichen Maximum- und Minimumtemperatur sowie der monatlichen Niederschlagssumme einer Messstation.
Tabelle:	Langjährige Mittelwerte der Monatsmittel oder Monatssummen verschiedener klimatologischer Messgrössen. Fehlende Werte (keine Messungen oder zu kurze Messperiode) sind mit "-" gekennzeichnet.
<i>Temperatur [°C]</i>	Monatsmittel der Temperatur
<i>Maximumtemp [°C]</i>	Monatsmittel aller täglichen Maximumtemperaturen
<i>Minimumtemp [°C]</i>	Monatsmittel aller täglichen Minimumtemperaturen
<i>Eistage [Tage]</i>	Anzahl Tage mit einer Maximumtemperatur kleiner als 0° Celsius
<i>Frosttage [Tage]</i>	Anzahl Tage mit einer Minimumtemperatur kleiner als 0° Celsius
<i>Sommertage [Tage]</i>	Anzahl Tage mit einer Maximumtemperatur grösser oder gleich 25° Celsius
<i>Hitzetage [Tage]</i>	Anzahl Tage mit einer Maximumtemperatur grösser oder gleich 30° Celsius
<i>Sonne [h]</i>	Absolute Sonnenscheindauer in Stunden
<i>Sonne [%]</i>	Anteil der gemessenen an der maximal möglichen Sonnenscheindauer
<i>Heitere Tage [Tage]</i>	Anzahl Tage mit einer Sonnenscheindauer von mehr als 80%
<i>Trübe Tage [Tage]</i>	Anzahl Tage mit einer Sonnenscheindauer von weniger als 20%
<i>Niederschlag Summe [mm]</i>	Monatliche Niederschlagssumme
<i>Niederschlag X mm [Tage]</i>	Anzahl Tage mit X mm oder mehr Niederschlag
<i>Niederschlag X%-Q [mm]</i>	X%-Quantil der monatlichen Niederschlagssummen (0%: kleinster Wert; 40%: 40%/60% der Werte sind kleiner/grösser als dieser Wert; 100%: grösster Wert) Achtung: Jahreswerte entsprechen nicht der Summe der Monatswerte.
<i>Neuschnee [cm]</i>	Monatssumme des Neuschnees
<i>Neuschnee [Tage]</i>	Anzahl Tage mit 1 cm oder mehr Neuschnee
<i>Schneedecke > X cm [Tage]</i>	Anzahl Tage mit einer Gesamtschneehöhe grösser X cm
<i>Relative Feuchte [%]</i>	Monatsmittel der relativen Luftfeuchtigkeit
<i>Dampfdruck [hPa]</i>	Monatsmittel des Dampfdrucks
<i>Luftdruck Station [hPa]</i>	Monatsmittel des Luftdrucks auf Stationshöhe
<i>Luftdruck red. Meer [hPa]</i>	Monatsmittel des Luftdrucks reduziert auf Meereshöhe
<i>Windgeschw. [m/s]</i>	Monatsmittel der Windgeschwindigkeit
<i>Wind X m/s [Tage]</i>	Anzahl Tage mit einer Windgeschwindigkeit (10min-Mittel) grösser oder gleich X m/s
<i>Sicht < X m [Tage]</i>	Anzahl Tage mit einer Sichtweite < X m (mindestens einmal pro Tag). Eine Sichtweite von weniger als 1000 m wird auch als Nebel bezeichnet.

Für kursiv geschriebenen Parameter standen homogene Datenreihen zur Berechnung der Mittelwerte zur Verfügung. Die Auswahl der Parameter orientiert sich an den Richtlinien der Weltorganisation für Meteorologie (WMO-No. 1203). Die angegebenen Werte können aufgrund regelmässiger Qualitätskontrollen und/oder neuer Homogenisierungen ändern. Weitere Informationen zum Schweizer Klima und zur Homogenisierung unter www.meteoswiss.ch.