

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis	IV
Abbildungsverzeichnis	V
Tabellenverzeichnis	VIII
Executive Summary	X
1. Einleitung.....	1
1.1 Problemstellung	2
1.2 Zielsetzung	3
1.3 Abgrenzung des Themas	4
2. Theoretische Grundlagen.....	5
2.1 Kostenermittlung	6
2.2 Risikomanagement.....	7
2.3 Probabilistische Ansätze und MSC.....	11
2.4 Monte-Carlo-Simulation	12
2.4.1 Verteilungen	13
2.4.2 Korrelationen.....	16
2.4.3 Vor- und Nachteile der MCS.....	17
3. Empirische Untersuchung.....	19
3.1 Aufwandswert für Schal-, Bewehrungs- und Betonarbeiten.....	19
3.2 Empirisches Beispiel.....	24
3.2.1 Programm @Risk	26
3.2.2 Berechnung der Kosten mit MCS.....	27
3.2.3 Berücksichtigung der Korrelationen.....	31
3.2.4 Produktivitätsverlust infolge Temperatur	34
3.2.5 Kostendifferenz infolge Marktschwankungen des Stahlpreises.....	38
3.2.6 Vergleich der deterministisch und mittels Monte-Carlo-Simulation ermittelten Baukosten.....	42
3.2.7 Ermittlung der Bauzeit.....	44

4. Schlussbemerkungen.....	50
4.1 Fazit.....	50
4.2 Diskussion	53
4.3 Ausblick	55
Literaturverzeichnis	57
Anhang	61
Anhang 1: Umfrage - Aufwendungen.....	62
Anhang 2: Umfrage - Bewehrungsgehalt.....	73
Anhang 3: Aufwendungen aus der Literatur	74

Abkürzungsverzeichnis

BIM	Building Information Modeling
BKP	Baukostenplan
HLKS	Heizungs-, Lüftungs-, Klima- und Sanitärtechnik
MCS	Monte-Carlo-Simulation
SIA	Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein
VaR	Value at Risk

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Preisindizes ausgewählter Produkte für das Baugewerbe, Basis Dezember 2015.....	5
Abbildung 2: Kostentoleranzen gemäss SIA-Projektphasen.....	6
Abbildung 3: Aufzeichnung möglicher Verteilfunktionen	15
Abbildung 4: Zeitaufwand für Schalarbeiten pro m ² gem. Umfrage mit angegebenen Richtwerten gem. dem Taschenbuch für Bauführer (2010) und dem Schweizerischen Baumeisterverband SBV (2020).....	20
Abbildung 5: Zeitaufwand für Schalarbeiten pro m ² gem. Schätzung mit und ohne Angaben der Bandbreite aus dem Taschenbuch für Bauführer (2010) mit den angegebenen Werten.....	21
Abbildung 6: Zeitaufwand für Bewehrungsarbeiten pro Tonne gem. Umfrage mit angegebenen Richtwerten gem. dem Taschenbuch für Bauführer (2010) und dem Schweizerischen Baumeisterverband SBV (2020).....	21
Abbildung 7: Zeitaufwand für das Betonieren pro m ³ gem. Umfrage mit angegebenen Richtwerten gem. dem Taschenbuch für Bauführer (2010) und dem Schweizerischen Baumeisterverband SBV (2020).....	22
Abbildung 8: Grundriss des untersuchten Beispielobjektes.....	24
Abbildung 9: Verteilung der deterministisch berechneten Kosten je Bauprozess sowie Bauteil	28
Abbildung 10: Zusammenstellung der Kosten je Bauprozess sowie Bauteil.....	28
Abbildung 11: Vergleich zwischen der Dreiecks- und PERT-Verteilung für die Aufwendungen Schalen Decke.....	29
Abbildung 12: Vergleich zwischen den deterministisch berechneten und mittels MCS (PERT- und Dreiecksverteilung) ermittelten Kosten.....	29
Abbildung 13: Vergleich der Kosten für den Stahlbetonbau unter Berücksichtigung der ermittelten Korrelationen aus Tabelle 9 sowie ohne Berücksichtigung der Korrelation	32
Abbildung 14: Vergleich der Kosten unter Berücksichtigung der Korrelationen von -/+1.00 sowie von 0.00	34
Abbildung 15: Normalverteilungen und deren Verteilungscharakteristiken der Temperatur für die Monate März und Juni für den Standort Sangans, zwischen 07:00 Uhr und 17:00 Uhr und für den Zeitraum 2010-2020, mit Produktivitätsverlust infolge Temperatur nach Hofstadler (2014, S. 435).....	35

Abbildung 16: Aufwanderhöhung und deren Beschreibung als Exponential- sowie Normalverteilung für den Monat März.....	36
Abbildung 17: Berechnete Kosten unter Berücksichtigung der Aufwanderhöhung (Produktivitätsverlust) infolge Temperatur für den Monat März als Exponential- sowie Normalverteilung	37
Abbildung 18: Vergleich der berechneten Kosten unter Berücksichtigung der Aufwanderhöhung (Produktivitätsverlust) infolge Temperatur für den Monat März und Juni (Exponentialverteilung) sowie ohne Berücksichtigung der Aufwanderhöhung und des deterministisch ermittelten Wertes	37
Abbildung 19: Auswertung der einflussreichen Variablen für die Berechnung der Baukosten unter Berücksichtigung der Aufwanderhöhung für den Monat März (Exponentialverteilung).....	38
Abbildung 20: Preisindex Bewehrungsstäbe (Materialpreis), Basis Dezember 2015	39
Abbildung 21: Dichtefunktionen der Verteilungen von Preisindizes Bewehrungsstäbe (Materialpreis) aus Bundesamt für Statistik BFS (2020) für die Jahre 2003 bis 2020 und der letzten 10 Jahre (2010-2020)	40
Abbildung 22: Vergleich der berechneten Kosten unter Berücksichtigung des Stahlpreises (lügt-logistische Verteilung der letzten 10 Jahre)	41
Abbildung 23: Vergleich der reinen Materialkosten für Bewehrungsstahl	42
Abbildung 24: Zusammenfassung der in dieser Arbeit ermittelten Baukosten mit Bandbreiten.....	43
Abbildung 25: Vergleich zwischen der deterministisch sowie mittels MCS unter Berücksichtigung der Dreiecksverteilung aller Variablen ermittelten Bauzeit.....	45
Abbildung 26: Vergleich zwischen der mittels MCS ermittelten Bauzeit mit und ohne Berücksichtigung des Produktivitätsverlustes aufgrund Temperatur für den Monat März	46
Abbildung 27: Vergleich zwischen der mittels MCS ermittelten Bauzeit für die tägliche Arbeitszeit von 8.5 Std. und 12 Std. sowie mit und ohne Berücksichtigung des Produktivitätsverlustes aufgrund der längeren Arbeitszeit beim letzteren	48
Abbildung 28: Vergleich zwischen den mittels MCS ermittelten Baukosten für die tägliche Arbeitszeit von 8.5 Std. sowie mit Berücksichtigung des Produktivitätsverlustes infolge längerer Arbeitszeit bei 12 Std.....	49
Abbildung 29: Grafische Auswertung aller Aufwendungsschätzungen bezüglich Schalarbeiten bei Decken (links) und Wänden (rechts) aus der durchgeführten Umfrage sowie das daraus resultierende arithmetische Mittel des Aufwandes.....	71

Abbildung 30: Grafische Auswertung aller Aufwendungsschätzungen bezüglich Schalarbeiten bei Decken (links) und Wänden (rechts) aus der durchgeführten Umfrage mit Angaben (Richtwerten) sowie das daraus resultierende arithmetische Mittel des Aufwandes..... 71

Abbildung 31: Grafische Auswertung aller Aufwendungsschätzungen bezüglich Bewehrungsarbeiten bei Decken (links) und Wänden (rechts) aus der durchgeführten Umfrage mit sowie das daraus resultierende arithmetische Mittel des Aufwandes 72

Abbildung 32: Grafische Auswertung aller Aufwendungsschätzungen bezüglich Betonierarbeiten bei Decken (links) und Wänden (rechts) aus der durchgeführten Umfrage mit sowie das daraus resultierende arithmetische Mittel des Aufwandes 72

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Beispiel einer diskreten Verteilung gem. Expertenbefragung	14
Tabelle 2: Wahl der Korrelationskoeffizienten	17
Tabelle 3: Zusammenstellung von Ergebnissen der Schätzung von Aufwendungen und der Vergleich mit denjenigen aus dem Taschenbuch für Bauführer (2010) für die Bandbreite sowie mit denen des Schweizerischen Baumeisterverbands SBV (2020) für den Mittelwert.....	23
Tabelle 4: Mengenermittlung für das Beispielobjekt aus Abbildung 8	25
Tabelle 5: In der Berechnung angenommene Aufwandswerte für das Schalen, Bewehren und Betonieren.....	25
Tabelle 6: Inventar- und Materialkosten für Schalungs-, Bewehrungs- und Betonarbeiten.....	26
Tabelle 7: Mittelwerte und Bandbreiten der Bewehrungsgehälter gem. Einschätzung der Bauingenieure.	26
Tabelle 8: Zusammenstellung der berechneten Kosten für die Stahlbetonarbeiten für das Beispielobjekt mit dem deterministischen Vorgehen sowie der MCS mittels Dreiecks- und PERT-Verteilung.	30
Tabelle 9: Zusammenstellung der berücksichtigten Korrelationskoeffizienten.	32
Tabelle 10: Vergleich der Kosten für den Stahlbetonbau unter Berücksichtigung und ohne Berücksichtigung der ermittelten Korrelationen aus Tabelle 9 sowie der deterministisch ermittelten Kosten	33
Tabelle 11: Beispiel der Produktivitätsverluste gem. Hofstadler (2014; S. 435).....	35
Tabelle 12: Ermittelte Baukosten mit und ohne Berücksichtigung der Aufwanderhöhung durch Temperatur.....	38
Tabelle 13: Ermittelte Kosten mit und ohne Berücksichtigung des Stahlpreises.....	41
Tabelle 14: Vergleich der in dieser Arbeit ermittelten Baukosten mit einem Value at Risk (VaR) von 80% bzw. 90% sowie deren Differenz zu den deterministisch ermittelten Kosten.....	43
Tabelle 15: Zusammenstellung der minimalen, erwarteten und maximalen Bauzeit für die deterministische sowie mittels MCS unter Berücksichtigung der Dreiecksverteilung aller Variablen durchgeführte Ermittlung	45

Tabelle 16: Zusammenstellung der minimalen, erwarteten und maximalen Bauzeit, mit und ohne Berücksichtigung des Produktivitätsverlustes aufgrund Temperatur für den Monat März	46
Tabelle 17: Zusammenstellung der minimalen, erwarteten und maximalen Bauzeit für die tägliche Arbeitszeit von 8.5 Std. und 12 Std. sowie mit und ohne Berücksichtigung des Produktivitätsverlustes aufgrund der längeren Arbeitszeit beim letzteren	48
Tabelle 18: Ergebnisse der Umfrage, Teil 1/2.....	69
Tabelle 19: Ergebnisse der Umfrage, Teil 2/2.....	70
Tabelle 20: Ergebnisse der Schätzung in Bezug auf das erforderliche Bewehrungsgehalt für die Decken sowie Wände.....	73
Tabelle 21: Aufwendungen für Schalarbeiten bei Decken [Std/m ²], Auswahl deutschsprachiger Literatur	74
Tabelle 22: Aufwendungen für Schalarbeiten bei Wänden [Std/m ²], Auswahl deutschsprachiger Literatur	74
Tabelle 23: Aufwendungen für Bewehrungsarbeiten bei Decken [Std/t], Auswahl deutschsprachiger Literatur	75
Tabelle 24: Aufwendungen für Bewehrungsarbeiten bei Wänden [Std/t], Auswahl deutschsprachiger Literatur	75
Tabelle 25: Aufwendungen für Betonarbeiten bei Decken [Std/m ³], Auswahl deutschsprachiger Literatur	75
Tabelle 26: Aufwendungen für Betonarbeiten bei Wänden [Std/m ³], Auswahl deutschsprachiger Literatur	76

Executive Summary

Jedes Bauprojekt ist ein Investment. Um zu beurteilen, ob solch ein Projekt ein erfolgreiches Investment darstellt, müssen vor Beginn die gesamten Baukosten möglichst genau ermittelt werden. Da jedes Bauprojekt einzigartig ist, müssen allerdings die einzelnen Posten in der Kostenermittlung geschätzt werden. Häufig legt man diesen Schätzungen Kosten aus ähnlichen Bauprojekten zu Grunde und ermittelt eine Kenngrösse, den Mittelwert, aus diesen Werten. Mit diesem Mittelwert erhält man aber keinen Eindruck von Unsicherheiten, die in diese Schätzung eingehen. In dieser Arbeit wird deswegen eine neue Methode zur Ermittlung der Baukosten unter Berücksichtigung von möglichen Unsicherheiten angewandt. Der Fokus der hier durchgeführten Berechnungen liegt auf der Ermittlung der Kosten für die Stahlbetonarbeiten, da diese den höchsten Anteil an den Gesamtkosten verursachen.

Anstelle der einfachen, deterministischen Berechnung eines Mittelwertes, wird hier für jede der gewichtigsten Position in der Kostenberechnung eine empirische Wahrscheinlichkeitsverteilung ermittelt und mit Hilfe einer Monte Carlo Simulation die Verteilung der Gesamtkosten simuliert. Dadurch kann ein Konfidenzintervall für die Endkosten berechnen werden. In der vorliegenden Studie wurden die Aufwendungen der einzelnen Stahlbetonpositionen anhand einer Umfrage ermittelt und mit bestehenden Literaturwerten verglichen.

Diese Methode wurde verwendet, um die Kosten der Stahlbetonarbeiten für ein fiktives Hochbauprojekt zu ermitteln. Besondere Berücksichtigung findet hier der Produktivitätsverlust durch suboptimale Arbeitstemperatur und Marktschwankungen des Stahlpreises. Naturgemäss beeinflussen Bauzeiten die Baukosten, weshalb auch der Effekt einer kürzeren Bauzeit in die Berechnung der Kosten integriert wurde. Mit der vorliegenden Methode werden im Gegensatz zum deterministischen Vorgehen alle verfügbaren Daten berücksichtigt und somit Unsicherheiten in der Kostenberechnung abgebildet. Diese Information können Investoren nutzen, um Risiken des Investments in der Baubranche realistischer zu bewerten. Nur mit der vorliegenden probabilistischen Methode, können Inverstoren Risiken und Kostensicherheit abwägen.

1. Einleitung

Die fundierte und nachvollziehbare Kostenermittlung mit folglichem Steuerung hat einen einschneidenden Einfluss auf ein erfolgreiches Investment. In der Projektentwicklungsphase werden mit der Gegenüberstellung der marktbezogenen Einnahmen und Ausgaben des Bauherrn (Investors) Investitionsentscheidungen gefällt. Die Einnahmenseite basiert hier auf potenziellen Mihereinnahmen, diese resultieren aus der Qualität des Standortes, Systems, Flächen- und Raumprogramms etc. sowie der Nutzung und deren Flexibilität (Girmscheid, 2007, S. 504). Diese werden in der Investitionsentscheidung den Kosten gegenübergestellt. Letztere können in der Projektentwicklung grob auf das Land und auf die projektbezogenen Kosten unterteilt werden, wobei der Investor auf die Landkosten, im Gegensatz zu den Projektkosten, grundsätzlich keinen Einfluss bzw. Handlungsspielraum hat.

Deswegen ist es für den Bauherrn (Investor) schon in frühen Projektphasen äusserst wichtig, möglichst genaue Kosten zu prognostizieren, damit seine Renditeberechnungen nicht im Sand stehen (Sander, Spiegl & Schneider, 2009, S. 1). Auf der anderen Seite ist für andere Akteure, wie z.B. Bauunternehmer, die Höhe der Kosten wichtig, da sie mit zu hohen Kosten (Angeboten) nicht wettbewerbsfähig sind und zu niedrige Kosten können zum deren Scheitern führen (Bankrott) (Para-González et. al., 2018, S. 82).

Da beim Bauen Unikate entstehen und man somit behaupten kann, dass kein Projekt so ist wie das andere, handelt es sich um eine Prototypen-Produktion. Wird gleichzeitig noch dessen hoher Kostenfaktor hervorgehoben, ist das gesamte Bauwesen für alle Akteure eine sehr risikoreiche Industrie. Die gesamten Risiken die bei Projektentwicklungen vorkommen belaufen sich nicht nur auf Risiken die mit dem reinen Bau verbunden sind, sondern haben je Projekt einen weit ausgebreiteten Hebel. So können neben z.B. Baugrundrisiken auch Kosten und Projektdauerüberschreitungen durch Kreditausfall, Liquiditätsengpässe, politische Veränderungen etc. entstehen (Sander et al., 2009, S. 1).

Es ist für alle Beteiligten und somit auch für den Projektmanager äusserst schwierig, während der Projektphasen eines (einzigartigen) Bauprojektes zuverlässige, mit Unsicherheit der Projektaktivitäten berücksichtigte Kosten sowie die Bauzeit zu prognostizieren. Ein effektives und zeitgemässes Risikomanagement kann den

Projektmanagern helfen, Unsicherheiten in einem Projekt zu identifizieren, zu kontrollieren und schlussendlich damit umzugehen.

1.1 Problemstellung

Wie im Bewusstsein der Allgemeinheit stehen Kostenüberarbeitungen bei Bauprojekten an der Tagesordnung. Bei alltäglichen Bauvorhaben entstehen Kostenüberschreitungen für reine Baukosten bis zu 30% (Wirth, 2002, S. 92; Kattenbusch & Kuhme, 2002, S. 42), bei öffentlichen Grossprojekten sind diese noch weit höher (Kostka, 2015, S. 1).

Es ist wichtig an dieser Stelle zu betonen, dass die Überschreitungen zwei Dimensionen aufweisen; die Kosten und den zeitlichen Aspekt. Beide sind gleichzeitig zu betrachten und sind gleich wichtig (Traynor & Mahmoodian, 2019, S. 11). Folgend führen Überschreitungen nicht unbedingt zum Scheitern eines Projektes, aber zur Budgetproblemen bzw. daraus resultierenden kleineren Renditeerwartungen. Hingegen folgt bei öffentlichen Projekten meistens ein Vertrauensverlust in der Öffentlichkeit - dies kann zu tieferen politischen Folgen führen.

Mit fortschreitender Komplexität und Grösse der Bauprojekte gewinnt eine bauphasengerechte Kostenabschätzung und -ermittlung immer mehr an Bedeutung. Wie schon erwähnt handelt es sich bei Bauprojekten üblicherweise um Prototypenfertigungen. Um trotzdem die Kosten möglichst gut abzuschätzen werden zur Kostenermittlung meist Werte von abgeschlossenen vergleichbaren Projekten herangezogen. So ist es in der Praxis üblich die Kostenermittlung über die Leistungen aus den abgeschlossenen Projekten auf eine Zahl zu verdichten. Für diese Verdichtung wird meist das arithmetische Mittel oder der Medianwert angewendet. Dies beruht auf einem deterministischen Vorgehen, da die dazugehörigen Informationen und Daten, z.B. Kostenbandbreiten, in der Verdichtung nicht berücksichtigt werden und somit verloren gehen.

„Die populäre Forderung nach einer exakten Zahl steht eigentlich im direkten Widerspruch zum Wunsch nach einer möglichst genauen Prognose.“ (Sander et al., 2009, S.2)

Es ist aus dem Vorgehen wie auch aus dem oberen Zitat ersichtlich, dass es sehr unwahrscheinlich ist, dass genau die deterministisch ermittelte Zahl das Szenario Realität abbildet. Die Identifizierung und Bewertung aller Risiken bei diesem Vorgehen kann im Vergleich zu den ermittelten reinen Kosten noch weit grössere Auswirkungen

haben. Dies beruht auf der Tatsache das für die Risiken noch weit weniger Informationen zur Verfügung stehen bzw. bekannt sind (Sander et al., 2009, S. 2).

1.2 Zielsetzung

Aus dem deterministischen Vorgehen ist ersichtlich, dass die Ermittlung der Kosten, mit Berücksichtigung der Unsicherheiten und schlussendlich der Verdichtung in eine Zahl, mit grossen Unschärfen behaftet ist. Letzteres ist aus den alltäglichen Kostenüberschreitungen ableitbar.

Wie schon aus der Statistik bekannt beruht eine hohe Sicherheit (ein hohe Unterschreitungswahrscheinlichkeit) nicht im Mittelwert (Erwartungswert), sondern weicht meistens von diesem ab. Somit wird mittels des deterministischen Vorgehens nur ein Szenario abgebildet, und zwar das Szenario das der Ermittler in einem Zeitpunkt als realistisch annimmt. Wie schon beschrieben, gehen alle dazugehörigen bekannten Informationen und Daten z.B. über Bandbreiten der einzelnen Kosten oder Zeitaufwand verloren.

Die Idee und Motivation, die daraus folgt ist bei der Kostenermittlung alle vorhandenen und zutreffenden Informationen und Daten, die zu Verfügung stehen, durchgehend einzugliedern um somit alle möglichen und zugleich natürlich realistischen Szenarien zu berücksichtigen. Da alle Daten zusammen eine mögliche Verteilung darstellen, Eintrittswahrscheinlichkeiten auf ihrer möglichen Bandbreite aufweisen, resultiert aus diesem probabilistischen Vorgehen das Ergebnis als Wahrscheinlichkeitsverteilung. Am Beispiel der Kosten resultiert somit eine Wahrscheinlichkeitsverteilung der Kosten. Somit ist es aus diesem Ergebnis der Baukosten möglich eine realistische Aussage über die Kostensicherheit abzulesen. Dies ist insbesondere zutreffend wenn beachtet wird, dass in solchen Modellen die Informationen z.B. zur Risiken aller Akteure (Geologe, Bauingenieur, HLKS etc.) als Verteilungen eingegliedert werden können, anstatt mittels der deterministisch ermittelten Zahl abgebildet werden.

Wie aus Para-González et. al. (2018) ersichtlich können für die Kostenermittlung moderne mathematische Methoden, wie z.B. Fuzzy Technik oder künstliche neurale Netzwerke angewendet werden, jedoch liegt der Fokus, im aktuellen Stand der Forschung, in den probabilistischen Ansätzen, insbesondere der Monte-Carlo-Simulation (S. 81), die auch in dieser Arbeit untersucht wird. Dem letzteren probabilischen Vorgehen, der Monte-Carlo-Simulation, wird in der Forschung der Baukostenermittlung immer grössere Beachtung geschenkt. Dies kann damit begründet

werden, dass das Baugewerbe eine sehr risikoreiche Industrie ist; mit gleichzeitig steigendem Wettbewerbsdruck steigt das Risiko entsprechend noch stärker. Auf der anderen Seite gehören probabilistische Ansätze in anderen Branchen schon zum Alltag und mit einer immer höheren Anzahl an verfügbaren Daten im Bauwesen könnte dies auch dort implementiert werden.

Das probabilistische Vorgehen ermöglicht eine aufschlussreichere Kostenermittlung, da die Unschärfen in die Berechnung einfließen und somit den Entscheidungsträger ermöglichen, die Kosten in Abhängigkeit der Wahrscheinlichkeit zu betrachten. Dies ermöglicht somit einen genaueren Kostenüberblick (Budgetierung) (Avlijaš, 2018, S. 8; Sander et al., 2009, S. 4) wie auch eine höhere Kostensicherheit.

Beim deterministischen Vorgehen der Baukostenermittlung kommen meist einfache mathematische Operationen (Addieren und Multiplizieren) zur Anwendung. Im Gegensatz sind beim aufwendigeren probabilistischen Vorgehen, wie aus den Beschriebenen ersichtlich, Grundkenntnisse der Statistik notwendig. Das Letztere ist in der Praxis eine grosse Hürde bzw. ein Nachteil, der auf mangelnden Statistikkenntnissen und dem Anschein, dass es sich bei dem probabilistischen Vorgehen um ein zu komplexes mathematisches Vorgehen handelt, beruht. Somit werden diese Ansätze eher als Problem anstatt als Lösung bzw. Hilfe angesehen. Dieser Nachteil wird auch in der Literatur vielfach hervorgehoben (Avlijaš, 2018, S. 9; Kummer, 2015, S. 206).

In dieser Arbeit wird solch ein probabilistisches Modell für die Baukostenermittlung aufgebaut werden. Es wird davon ausgegangen, dass die so ermittelten Baukosten wie auch die Bauzeit unter Berücksichtigung der Bandbreiten besser und genauer ermittelt werden können. Der Fokus des empirischen Teils liegt somit beim Aufbau eines Beispielmodelles und der Frage, ob die Praxis das probabilistische Vorgehen, in unserem Fall die Monte-Carlo-Simulation, anwenden und davon bei einem täglichen Gebrauch profitieren kann.

1.3 Abgrenzung des Themas

Da die Projektentwicklung ein extrem breites Thema ist und in der Praxis von unzähligen inneren und äusseren Akteuren beeinflusst wird, wird in dieser Arbeit der Fokus auf die Rohbaukosten gelegt. Das Vorgehen wird im ersten Schritt tiefer, abstrakter und idealisiert erläutert, somit kann es auch ohne weiteres auf ein breites Spektrum anderer Bereiche der Projektentwicklung sowie andere Bereiche extrahiert werden. Hierbei werden Details mittels Anlehnung und Beispiele aus den Baukosten vertieft erläutert.

Im empirischen Teil wird auf einem Beispielgebäude untersucht wie die Kosten und die Dauer der Stahlbetonarbeiten mittels Monte-Carlo-Simulation ermittelt werden können. Dieses spezifische Beispiel wird gewählt, da diese Stahlbetonarbeiten im Durchschnitt den höchsten Anteil an Kosten verursachen. Dieser beträgt bei Neubau von Mehrfamilienhäusern ca. 11.5% und bei Neubau von Bürogebäuden ca. 14% der Gesamtkosten (Bundesamt für Statistik BFS, 2019). Gleichzeitig werden diese Arbeiten von vielen internen und externen Faktoren beeinflusst. So werden diese Arbeiten von internen Faktoren wie Produktivitätsverlust durch eine längere Arbeitszeit, einen kleineren Arbeitsraum etc. und gleichzeitig noch durch Externe wie z.B. Temperatur, Witterung, Licht etc. beeinflusst. Auf der anderen Seite kann an diesem Beispiel der Markt abgebildet werden, da wie aus Abbildung 1 ersichtlich, der Preis des Stahls im Gegensatz zu anderen Positionen (Produkten) starken Schwankungen unterworfen ist. Dies ist ein erwartetes Resultat da der Rohstoff Stahl z.B. im Vergleich zum Beton nicht regional hergestellt wird, die Ressourcen begrenzt sind und auf einen globalen Markt gehandelt wird.

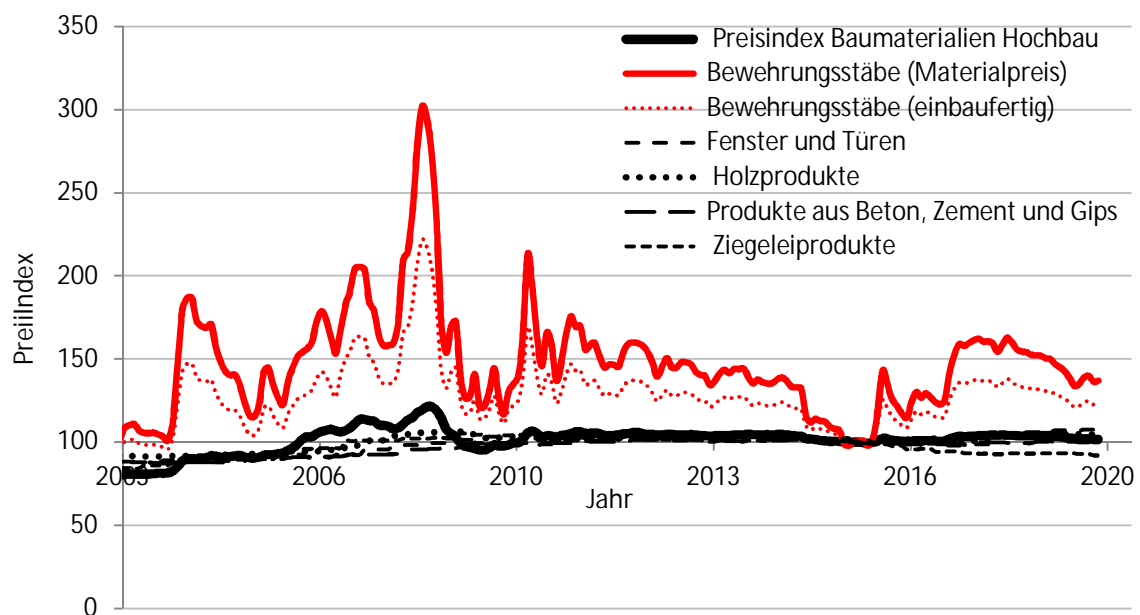


Abbildung 1: Preisindizes ausgewählter Produkte für das Baugewerbe, Basis Dezember 2015 (Daten: Bundesamt für Statistik BFS, 2020)

2. Theoretische Grundlagen

Die vorliegende Arbeit richtet ihre Aufmerksamkeit auf die Unsicherheiten und Risiken (Risikomanagement) in Bezug auf die Baukostenermittlung sowie deren Quantifizierung mittels eines probabilistischen Vorgehens der Monte-Carlo-Simulation (MCS). Im ersten Teil der Grundlagen werden wir uns in die Baukostenermittlung

vertiefen, folgend vom Risikomanagement, das in einer Vielzahl von Bereichen Anwendung findet. Am Schluss folgt eine Einleitung in die probabilistischen Ansätze und die Idee diese auch zu verwenden.

2.1 Kostenermittlung

Um die Wirtschaftlichkeit bzw. Budgetierungen zu berechnen werden Kostenermittlungen durchgeführt. Diese werden in sich folgende Projektphasen stets kontinuierlich und systematisch ermittelt und erfasst. Somit können mit steigender Klarheit im Projekt, die Kosten genauer abgeschätzt werden. Um Transparenz für alle Beteiligte darzustellen sind je Projektphase Kostengenauigkeiten vorgegeben. In der Schweiz ist das in der SIA103 geregelt (siehe Abbildung 2).

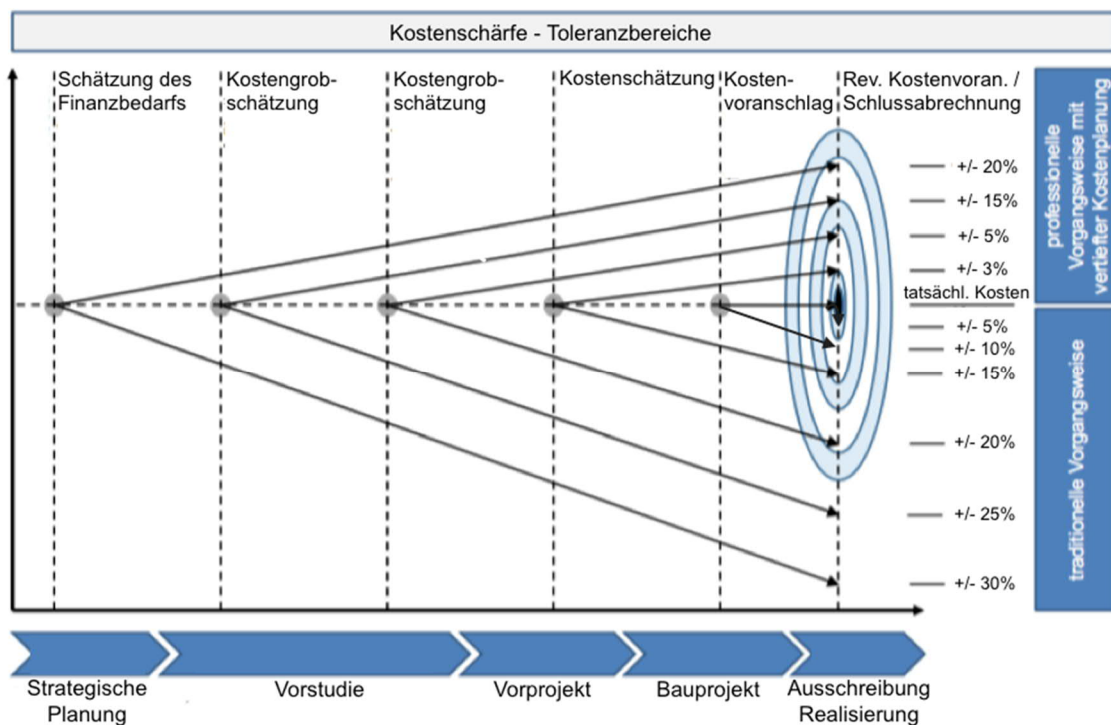


Abbildung 2: Kostentoleranzen gemäss SIA-Projektphasen (In Anlehnung an Lechner, 2007, S. 44)

Somit generiert sich mit jeder weiteren Projektphase eine höhere Kostensicherheit. Um Kosten zu ermitteln bestehen in der Schweiz wie auch international (Xenidis & Stavarakas, 2012, S. 480) zwei grundsätzlich unterschiedliche Möglichkeiten. Bei der ersten werden die Kosten über Elemente ermittelt bei der zweiten über die zu erbringende Leistungen. Die erste findet meist in frühen Projektphasen Anwendung wo noch nicht alle exakten Mengen und die dazugehörigen Leistungen bekannt sind. So werden die Kosten aufgrund der Elemente (z.B. Wand, Betonwand) ermittelt, die auf Kostenkennwerten durchgeführter Projekte beruhen. Mit dem Projektfortschritt können die Kosten, bei allen bekannten Details, folgt über Leistungen ermittelt werden. Hier erfolgt die Kostenermittlung auf Grundlage der Arbeitsabläufe z.B. bei einer Betonwand

ergeben sich die Schalung, Verlegung der Bewehrung, Bewehrungsstahl, Betonieren usw.

Wie aus dem Beispiel ersichtlich werden in der Praxis die Kosten in frühen Projektphasen mittels Elementen ab der Ausschreibungsphase meist über Leistungen ausgewiesen.

Kostenermittlungen sind immer mit Unschärfen behaftet. Die so entstehenden Unsicherheiten werden in der Praxis, wie von Baccarini (2005) in seiner Expertenbefragung ausgewertet, mehrheitlich (77%) als pauschale Reserven mittels fixer Prozentsätze bestimmt (S. 1). Die so abgeschätzten Reserven belaufen sich in der Praxis auf ca. 5-10% (Bouayed, 2016, S. 297; Choudhry, Rafiq, Ahmed & Ahmed, 2018, S. 134). Es zeigt sich schon aus den Kostenüberschreitungen und dem Vorgehen, über die sehr vielseitigen Kostenkennwerte, dass die Unsicherheiten nicht einfach mittels pauschaler fixer Sätze berücksichtigt werden sollen. Stattdessen bedarf es einer detaillierten Identifikation und Analyse dieser projektspezifischen Unsicherheiten eines sogenannten Risikomanagements (Girmscheid, 2003, S. 571).

2.2 Risikomanagement

Der Begriff „Risiko“ bedeutet eine mögliche Abweichung von der Mitte und somit eine Volatilität. Diese kann ein positives Potenzial/Effekt aufweisen, „Chance“ genannt, oder ein negatives, die sogenannte „Gefahr“ (Girmscheid, 2003, S. 571). Es wird dabei davon ausgegangen, dass die Risiken bekannte Grössen sind, die quantifiziert werden können. Diese weisen eine Tragweite und Eintrittswahrscheinlichkeiten auf. Im Gegensatz zur Risiken sind bei Unsicherheiten keinerlei Wahrscheinlichkeiten bekannt.

Um mit diesen Risiken umzugehen, deren Auswirkungen zu analysieren sowie zu bewerten, bedient man sich des Risikomanagements. Das Vorgehen im Risikomanagement erfolgt grundsätzlich nach der Validierungsphase in vier Schritten wie z.B. nach Touran (2006, S. 11):

Risikoidentifikation → Risikoanalyse → Risikobewertung → Risikobewältigung.

Vor dem eigentlichen Risikoprozess ist es in der Validierung äusserst wichtig die Projektgrundlagen zu prüfen und den Umfang abzugrenzen um somit sicherzustellen, dass die Interessen des Investors erfüllt werden. Gleichzeitig können auftretende Unstimmigkeiten sowie eventuelle Fehler behoben werden.

Risiko Identifikation

Nach der Validierung der Projektabschätzungen müssen im ersten Schritt alle Risiken mit einem bedrohenden oder positiven Potenzial identifiziert werden. Dies kann mittels verschiedener Methoden, anhänglich von der Grösse, Komplexität etc. des Projektes, erfolgen. So können z.B. Workshop, Brainstorming, Checklisten, intuitive, unstrukturierte Identifikation etc. eingesetzt werden (Sander et al., 2009, S. 6). Hierbei sollten die markt-, projektspezifische und interne Risiken strukturiert erfasst werden (Girmscheid, 2003, S. 573). Die strukturierte Erfassung, z.B. mittels einer Baumstruktur, ermöglicht es uns eine genaue Auflistung der Risiken zur gewährleisten und somit zufällige Identifizierung von Risiken zu verhindern (Girmscheid, 2003, S. 572) und gleichzeitig den Ursprung der Risiken zurück zu verfolgen (Sander et al., 2009, S. 6). Als Hilfsmittel können Risikokataloge oder Risiko-Checklisten erstellt oder von ausgeführten Projekten beigezogen werden. Auch wenn diese nie vollständig sein können, kann somit zum Teil verhindert werden, dass gewisse Risiken vergessen oder gar übersehen werden. Bei solchem strukturierten Vorgehen sollen sowohl Risiken, die als Gefahr wirken, als auch diejenigen mit einem positiven Einfluss, die Chancen, identifiziert werden, um somit auch die positiven Einflüsse im Projektdurchlauf zu identifizieren und zu nutzen (Touran, 2006, S. 17).

Risikoanalyse

Diese identifizierten Risiken müssen im nächsten Schritt analysiert werden. Anstatt das Ausmass des Risikos mit einzelnen Zahlen zu belegen ist es besser die Eintrittswahrscheinlichkeit mit den Bandbreiten im Falle des Eintritts zu quantifizieren. So können die aufgeführten Risiken des Risikokatalogs mittels zwei Spalten, der Eintrittswahrscheinlichkeit und des Ausmasses, erweitert werden. Das Ziel der Analyse ist es grundsätzlich aus der Vielzahl der identifizierten Risiken die Hauptrisiken zu finden und deren Ausmass aufzuzeigen (Touran, 2006, S. 17-20).

Da die Anzahl der Risiken die in einem Projekt identifiziert werden extrem gross sein kann, können bei der Analyse gewisse Selektionskriterien beigezogen werden. So können Schwellengrenzen eingeführt um somit Risiken die nur einen beschränkten mindernden Einfluss auf die Kosten haben gar nicht oder pauschal in einem Risikobudget angenommen werden. Somit verkleinert sich die Anzahl der berücksichtigten Variablen (Anzahl der explizit berücksichtigten Risiken) eines Modelles und man verliert nicht den Punkt für die wesentlichen Kostentreiber bzw.

Kostenminderer. Anders können aber auch mehrere Risiken zusammen als Gruppe definiert werden. Solch ein praktischer Ansatz ist etwas ungenauer, kann aber die Anzahl der Variablen extrem verringern. Ein Beispiel dafür ist die Gruppe der Erdarbeiten, wo die Baugrubenkosten zwischen zwei Werten mit einem Erwartungswert erfasst werden können anstatt jedes Risiko der Baugrube explizit zu quantifizieren. Mittels solcher Risikoanalysen kann veranschaulicht werden, welche Punkte die grössten Kostentreiber sind und mit welchen Risiken umgegangen werden muss.

Es ist unbestritten, dass sich verschiedene Risiken gegenseitig beeinflussen. So kann ein Risiko verstärkend, abmildern oder gar nicht auf ein anderes Risiko einwirken. Dies kann zu erheblichen Auswirkungen führen, wenn man bedenkt, dass sich kleine Risiken mit verstärkenden Einfluss somit aufsummieren können. Diese Aufsummierung kann somit sogar zur bedrohlichen Ausmass führen (Urschel, 2009, S. 158). Somit ist es äusserst wichtig die Risiken und deren Abhängigkeit zu analysieren. Die Risikoanalyse sollte systematisch durchgeführt und aufgeführt werden, um somit zu erkennen ob sich die Risiken einseitig oder wechselseitig beeinflussen und ob der Zusammenhang risikoverstärkend oder risikomindernd wirkt (Urschel, 2009, S. 165).

Risikobewertung

Der Risikoanalyse folgt die Risikobewertung. In diesem Schritt ist es ziemlich wichtig die analysierten Risiken gemäss ihrer Eintrittswahrscheinlichkeit und Tragweite, d.h. ihres Einflusses auf das gesamte Projekt, zu bewerten und rangieren (Girmscheid, 2003, S. 574). Das Ergebnis ist eine systematisch erfasste Rangliste der einflussreichen Risiken auf das untersuchte Projekt. Da die Anzahl der erfassten Risiken sehr hoch ist und der Aufwand auch bei Berücksichtigung all dieser Risiken in der Bewältigung enorm und gleichzeitig auch irrational wäre, können in der Praxis Selektionen durchgerührt werden. So kann als Kriterium die Berücksichtigung der Top 10 bzw. 15 Risiken angewendet werden oder es kommt die Selektion nach dem Pareto-Gesetz zur Anwendung: es werden 20% der Risiken mit dem 80% Kostenanteil berücksichtigt (Touran, 2006, S. 27).

Risikobewältigung

Als letzter Schritt muss entschieden werden wie mit den erkannten Risiken umgegangen wird. Dazu stehen uns vier Reaktionen auf erkannte Risiken zur Wahl (Girmscheid, 2003, S. 576):

- Risikovermeidung
- Risikoverminderung
- Risikoübertragung
- Risikoakzeptanz

Ziel der Risikobewältigung ist es, den Einfluss der identifizierten Risiken auf die Kosten wie auch auf die Dauer zu minimieren. Als Führungsperson im gesamten Risikomanagement sieht Touran (2006, S. 8) den Projektmanager. Dieser steht, im Gegensatz zu anderen Projektakteuren, in keinem Zeitpunkt des Projektes im einem Interessenskonflikt zum Investor. So kann dieser mit Risikosituationen objektiv umgehen und möglichst im Sinne des Investors handeln.

Das aufgezeigte Risikomanagement-Zyklus sollte kontinuierlich in jeder Bauphase durchgeführt werden (Sander et al., 2009, S. 5), da sich im Verlauf der Bauphasen neue Risiken ergeben sowie gleichzeitig auch neue Erkenntnisse über die schon analysierten Risiken zu Tage kommen. Letztere können somit möglicherweise besser eingeschätzt und eventuell an dieser Stelle bewältigt werden.

Häufige Einzelrisiken beim Bau und folglich bei den Baukosten sowie der Dauer sind nach Flöch (2009, S. 17) folgende:

- Bauherrenentscheidungen
- Planlieferungsverzug
- Schlechtwetter
- Koordinationsprobleme
- Einhaltung behördlicher Auflagen
- Insolvenzrisiko.

Wie aus den aufgelisteten Risiken ersichtlich kann der Investor ein Teil der Risiken in der Bewältigungsphase vertraglich übertragen. So sollte bei der Risikoallokation grundsätzlich die Partei das Risiko übernehmen, die am besten in Stande ist mit einem Risiko umzugehen. Gleichzeitig müssen aber diese Übernahmen von Risiken auch analysiert und bewertet werden und folglich in den Kosten abgebildet sein (Touran, 2006, S. 30). Am Beispiel des Baugrundrisikos kann dieses z.B. vom Investor auf den ausführenden Unternehmer auf Grund der eventuell besseren Informationen bzw. Erfahrungen übertragen werden. Es kann davon ausgegangen werden, dass der Ausführende mit diesem Baugrundrisiko besser umgehen kann und somit dieses auch tiefer bepreist.

Grundsätzlich kann im traditionellen Vorgehen davon ausgegangen werden, dass aus vertraglicher Hinsicht die grösste Modifikation zwischen den Bauphasen Ausschreibung und Ausführung zu erwarten ist, da an diesem Punkt viele Risiken auf andere Akteure übertragen werden bzw. werden können. Somit erfolgt eine enorme Veränderung der Risikolandschaft der erfassten Risiken für alle Akteure (Sander et al., 2009, S. 5). Abhängig vom Vertragsmodell können aber diese Übertragungen der Risiken schon in früheren Projektphasen durchgeführt werden, wie das z.B. mittels eines GU-Vertrages bzw. in noch früheren Projektphasen mittels eines TU-Vertrages der Fall ist. Es ist aber an dieser Stelle sehr wichtig zu verdeutlichen, dass aufgrund dieser Verträge neue vertragliche bzw. rechtliche Risiken entstehen. Wird zum Letzteren noch der folgende kleinere Handlungsspielraum des Investors beigezogen, sollten bzw. müssen für eine erfolgreiche Projektdurchführung diese neuen Risiken ebenso den Risikomanagementprozess durchlaufen haben.

Ein so aufgezeigtes Vorgehen ermöglicht es Risiken wahrzunehmen und somit den Gefahren entgegenzuwirken und die Chancen zu nutzen. Der Vorteil des Risikomanagements ist schlussendlich in der positiven Renditeentwicklung ersichtlich.

2.3 Probabilistische Ansätze und MSC

Das deterministische wie auch probabilistisches Vorgehen folgt den gleichen grundlegenden Ansätzen. Das Risiko (Volatilität) wird geschätzt, indem die Kosten verschiedener Risikofaktoren geschätzt und in geeigneter Weise kombiniert werden - abhängig davon, ob sich die Risiken positiv oder negativ beeinflussen. Der Hauptunterschied bei einer probabilistischen Schätzung besteht darin, dass ausdrücklich berücksichtigt wird, dass es sich bei einigen Kostenkomponenten nicht um Einzelwerte handelt, sondern um einen Wertebereich, der unter Verwendung geeigneter statistischer Verteilungen modelliert wird. Durch diese Verteilungen wird jedem Kostenelement, das Unschärfen aufweist, ein Wert aus einem Wertebereich zugewiesen, für den eine jeweilige Eintrittswahrscheinlichkeit bestimmt wird (Touran, 2006, S. 21; Xenidis & Stavrakas 2012, S. 480). Somit bleibt beim probabilistischen Vorgehen der gesamte Informationsgehalt durchgehend erhalten (Flöch, 2009, S. 3).

Dieser durchgehende Informationsgehalt ist der Mehrwert für den Investor wie auch den Bauunternehmer, da als Ergebnis des probabilistischen Vorgehens eine Verteilung resultiert. Im Vergleich zum deterministischen Vorgehen, woraus ein Wert resultiert, hat man beim probabilistischen Vorgehen die Möglichkeit sich eine Sicherheit zu „garantieren“ bzw. „kaufen“. Aus der resultierenden Verteilung können anhand der

individuellen Risikobereitschaft Unterschreitungswahrscheinlichkeiten (eng. Value-at-Risk (VaR)) gewählt werden (Sander, 2012 S. 36-37). Wird ein eher hoher VaR von z.B. 80 angenommen (VaR80), besteht eine Wahrscheinlichkeit von 80%, dass dieser Wert unterschritten und eine 20% Wahrscheinlichkeit, dass dieser Wert überschritten wird. Am Beispiel der Kosten resultiert daraus, dass mit einer höheren gewünschten Sicherheit bzw. gewählten Unterschreitungswahrscheinlichkeiten folglich die Kosten höher ausfallen.

Es ist somit ersichtlich, dass der grösste Nachteil des deterministischen Vorgehens, wie z.B. von Xenidis und Stavarakas (2012) beschrieben, darin besteht, dass keine Risiken in die Berechnung einfließen. Es werden Budgetreserven angenommen, basierend aus Erfahrungen, oder fixe Sätze und diese machen die Schätzungen ungenau (S. 480).

Es wird aber auch beim probabilistischen Vorgehen empfohlen z.B. grobe Basis-Zeitpläne zur erstellen, um somit überhaupt eine Vorstellung und einen Bezugspunkt schon vor der Simulation zu erzeugen. Zeit- und Kostenschätzungen sind Vorhersagen für die Zukunft und somit den menschlichen Faktor unterworfen. Menschen neigen aber dazu zu optimistisch bzw. im Gegenteil mittels zusätzlicher Reserven zu agieren. (Vanhoucke, 2013, S. 3-4)

2.4 Monte-Carlo-Simulation

Deterministische Berechnungen beruhen darauf, dass Ergebnisse eindeutig bestimmt werden können (z.B. Newtonsche Gesetze). Somit werden Unsicherheiten in den deterministischen Berechnungen nicht berücksichtigt, dies führt zur Annahme, dass die Ergebnisse mit einer Wahrscheinlichkeit von 100 % eintreten. Diese Annahme entspricht den wenigsten Systemen, wenn überhaupt, und stellt meist einen Idealfall bzw. eine Idealisierung des Berechnens dar. Am Beispiel der Bauzeit kann diese Annahme der deterministischen Berechnung kritisch hinterfragt werden. Da diese von einer grossen Anzahl von Unsicherheiten behaftet ist, kann die Ermittlung der Bauzeit auch nicht mithilfe von justierten Eingabeparametern deterministisch berechnet werden und somit absolut in die Zukunft hervorgesagt werden. Dies führt dazu, dass deterministische Ansätze unzureichend und im Grunde nur falsch sein können (Kummer, 2015, S. 111). Die Alternative führt zur mathematischen Probabilistik, wo die Parameter anstelle einzelner Werte mit Verteilfunktionen (Bandbreiten) beschrieben werden.

Die Monte-Carlo-Simulation ist ein Verfahren, das auf Zufallszahlen beruht. Für ein vorgegebenes Berechnungsmodell/Kombination werden in jedem Simulationsschritt (Iterationen) Zufallsgrößen ermittelt. Als Eingabegröße dienen zwei unabhängige Größen; die Eintrittswahrscheinlichkeit und die Auswirkung (z.B. Kosten) (Sander, 2012, S. 87-88). Die Beziehungen zwischen den Parametern werden in der Simulation mittels Korrelationen berücksichtigt.

Vereinfacht gesagt werden mittels MCS zig Berechnungen durchgeführt bei denen für eine ausgewählte Anzahl Parameter anstatt fixer Werte eine Werteverteilung in Anhänglichkeit der Wahrscheinlichkeit angenommen wird. Um unrealistische Ergebnisse zu eliminieren werden in die Berechnung Korrelationen zwischen den Parametern eingebunden. Die Berechnung wird mithilfe von n-Iterationen (Schritten) mittels Zufallszahlen durchgeführt. Die so durchgeführte Wahrscheinlichkeitsberechnung ergibt eine Verteilung der möglichen Ergebnisse in Anhänglichkeit der Wahrscheinlichkeit. Die Simulation kann bzw. wird somit durch die Anzahl der Iterationen beeinflusst. Da die Berechnung mittels Zufallszahlen durchgeführt wird, ist es wichtig eine ausreichend hohe Anzahl an Iterationen durchzuführen, um auf Basis der Zufallszahlen keine verzerrten Resultate zu generieren.

Nach Kummer (2015) handelt es sich bei der Monte-Carlo-Simulation mathematisch gesehen um ein numerisches Verfahren der Stochastik (S.119).

Schon im 18. Jahrhundert wurden zur Lösung numerischer Probleme zufällige Ereignisse angewendet. Ein bekanntes Beispiel ist die Ermittlung der Zahl π . Die Technik zur Monte-Carlo-Simulation wurde vom Mathematiker Stanislaw Ulam erarbeitet und erlangte Ihre Bedeutung mit dem „Manhattan Project“ (Atombombe). Die Methode wurde nach den Casinos von Monaco benannt, da die zufälligen Ergebnisse des Modells sehr den Spielen wie Würfeln, Roulette und Spielautomaten ähneln (Avlijaš, 2018, S. 2). Heute wird die Methode vermehrt in einem breiten Spektrum der Bereiche z.B. Finanzen, Ingenieurwesen, Medizin etc. angewendet. Dies kann auf die immer höhere Rechenleistung der Computer zurückgeführt werden.

2.4.1 Verteilungen

Für die Durchführung einer MCS können die Inputs deterministisch oder mittels ihrer Bandbreiten (Verteilfunktionen) stochastisch eingegeben werden. Diese Verteilfunktionen können aus Expertenbefragungen, empirischen Untersuchungen und/oder theoretischen Ansätzen erfolgen (Urschel, 2009, S. 166; Kummer, 2015, S.

166). Zielführend sollte die Wahl auf natürlichen und logischen Eigenschaften beruhen, wobei unmögliche und unsinnige Parameter auszuschliessen sind (Kummer, 2015, S. 171).

Probabilistische Inputs können die Verteilungen im ersten Schritt auf diskrete und stetige aufgeteilt werden. Von diskreten Verteilungen sprechen wir, wenn eine Variabel mittels Impulsen beschrieben wird und somit nur einzelne Zahlenwerte annehmen kann. Als Beispiel kann dies an einer Verstärkung des Gebäudefundaments illustriert werden. Bestehen in der uns vorliegenden Geologie gewisse Risiken und wir eine Kostenschätzung ermitteln müssen, können wir dies z.B. mithilfe von möglichen Verstärkungsvarianten und entsprechenden Eintrittswahrscheinlichkeiten in Tabelle 1 exemplarisch mittels Expertenbefragung als diskrete Verteilung darstellen.

Varianten / benötigte Verstärkung	Kosten (CHF)	Wahrscheinlichkeiten gem. Expertenbefragung
keine	0,-	50 %
Magerbeton	50`000,-	40 %
eingebohrte Micropfähle	200`000.-	10 %

Tabelle 1: Beispiel einer diskreten Verteilung gem. Expertenbefragung

Von stätigen Verteilungen sprechen wir dagegen wenn diese als kontinuierliche Funktion ausgebildet sind (siehe Abbildung 3). Weiter können Verteilungen (einseitig-) offene und geschlossene Formen aufweisen, sowie Schiefen. In der Literatur ist im Bezug zu Verteilungen in der Bauwirtschaft eine Tendenz zu stetigen, geschlossenen und rechtsschiefen Verteilungen erkennbar (Kummer, 2015, S. 169; Schach, 2005, S. 114). Dies kann damit begründet werden, dass die meisten Variablen einen minimalen Wert aufweisen, der nicht unterschritten werden kann (z.B. Mindestdauer, Mindestpreis). Gleichzeitig ist aber die Grenze nach oben offener was in der Verteilung zu einer Rechtsschiefe führt.

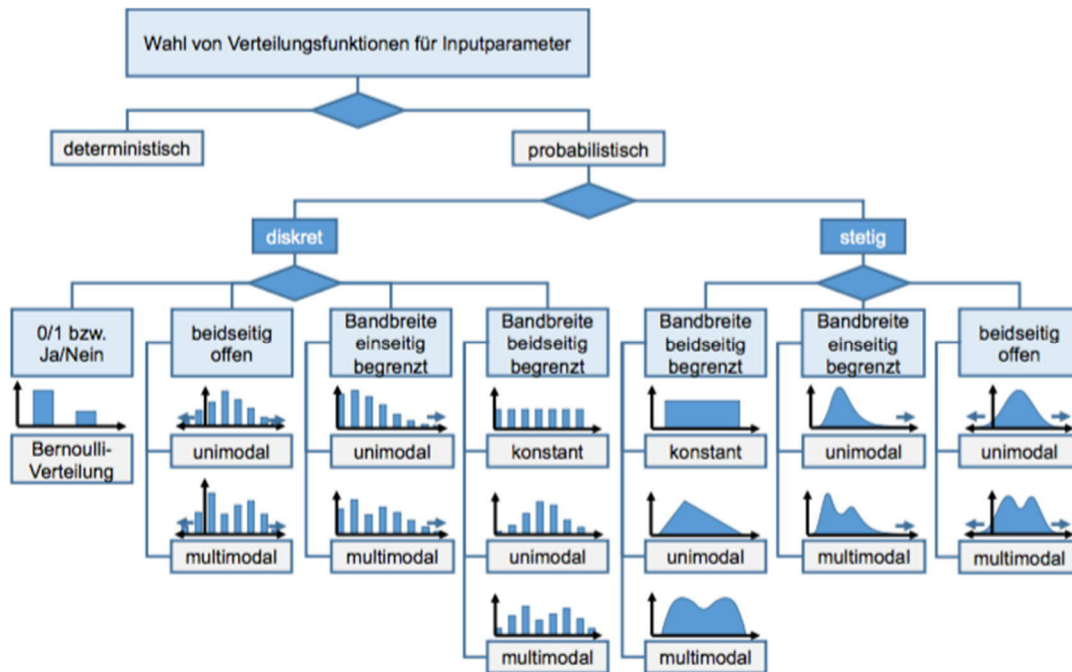


Abbildung 3: Aufzeichnung möglicher Verteilungsfunktionen (Kummer, 2015, S. 172)

Da die Baukosten- wie auch die Bauzeitermittlung von einer erheblichen Anzahl von Inputs (Variabel) beeinflusst wird, ist es effizienter in der Simulation eine begrenzte Anzahl der einflussreichen Variablen mit Verteilungsfunktionen zu hinterlegen.

Bei der Erhebung der Daten in der Praxis bestehen viele Möglichkeiten. In der Literatur wird meistens auf die (subjektive) Expertenbefragungen und/mit theoretischen Überlegungen verwiesen. Da wie in Abbildung 3 ersichtlich die Verteilungen sehr verschiedene Formen annehmen/aufweisen können muss beachtet werden, dass sich mit der Steigerung der Komplexität einer Verteilung auch die Komplexität der sie zu beschreibende Parameter steigert. Vereinfacht gesagt können Experten den Minimalwert, Modalwert und Maximalwert einer Verteilung leicht einschätzen. Anders entstehen z.B. bei einer Schätzung der Standardabweichung mittels einer Befragung Probleme, Experten werden überfordert (Lederer, 1982, S. 60) oder können gewisse Parameter gar nicht einschätzen. Wegen der Komplexität der Verteilungen und der benötigten vertieften statistischen Kenntnisse wird in der Literatur meistens empfohlen einfache Dreiecksverteilungen oder die PERT-Verteilung zu wählen, beide durch drei Parameter (Minimum, erwarteter Wert und Maximum) beschrieben (Sander, 2012, S. 110). Für die Ermittlung der Baukosten ist die Dreiecksverteilung in 90% der Fälle eine geeignete Lösung (Sander et al., 2009, S. 3).

Es können aber auch Verteilungen aus (objektiven) historischen Daten beigezogen werden (Pant und Srinivas, 2019, S. 18). Hier ist zu beachten, dass diese Daten analysiert, bereinigt und auf das Projekt angepasst werden (Kummer, 2015, S. 173-174). Gleichzeitig besteht auch die Möglichkeit einer Kombination beider Vorgehen, so können die ausgewerteten historischen Daten den Experten für ihre eigene Einschätzung dienen (Pant und Srinivas, 2019, S. 18). Unschärfen aufgrund Experteneinschätzung können somit auf Grund der historischen Daten (zuteil) eliminiert werden. Ist das analysierte Projekt z.B. in der Ausführung, haben wir sogar die Möglichkeit einer eigenen Erhebung mittels des Soll-Ist-Vergleiches. Es ist an dieser Stelle nochmals wichtig zu betonen, dass der Kosten- sowie der Zeitfaktor ein Duett darstellen und es wichtig ist beide Faktoren in Echtzeit im Blick zu behalten (Traynor & Mahmoodian, 2019, S. 11).

Es ist vorstellbar, dass mit der Digitalisierung im Bauwesen und mit dem verbesserten Datenmanagement im Zuge des BIM die Erhebung der benötigten Inputs erleichtert wird (Kummer, 2015, S. 175).

Für eine vertiefte Diskussion bezüglich Verteilungen im Bereich der Baukosten und der Dauer wird an dieser Stelle auf Kummer (2015) verwiesen.

2.4.2 Korrelationen

Da sich wie im Kap. 2.2 beschrieben am Beispiel der Risiken verschiedene Variablen gegenseitig beeinflussen, ist es für eine realistischere Modellierung wichtig deren Korrelationen (lat. Wechselbeziehung) zu berücksichtigen. Somit werden zwischen der Simulation unrealistische Iterationen (zum Teil) eliminiert.

Für die Analyse der Korrelationen kann zwischen drei Vorgehen unterschieden werden. Gleich wie bei den Verteilungen, können mithilfe von Expertenbefragungen empirische Studien (z.B. Regressionsanalyse) und theoretische Ansätze (theoretische Erkennung der Zusammenhänge) erfolgen (Urschel, 2009, S. 166; Kummer, 2015, S. 134).

Der Zusammenhang zwischen zwei Variablen erfolgt mittels Korrelationskoeffizienten. Diese können Werte zwischen -1.0 und +1.0 einnehmen. Ein quantitativer und qualitativer Zusammenhang der Korrelationskoeffizienten ist in der folgenden Tabelle 2 ersichtlich.

Quantitativ	Mittelwert	Qualitativ
-1.00 - -0.71	- 0.85	negativ stark
-0.70 - -0.41	-0.55	negativ mittel
-0.40 - - 0.11	-0.25	negativ schwach
-0.10 – 0.10	0.00	unabhängig
0.11 – 0.40	0.25	positiv schwach
0.41 - 0.70	0.55	positiv mittel
0.70 - 1.00	0.85	positiv stark

Tabelle 2: Wahl der Korrelationskoeffizienten (in Anlehnung an Chau, 1995, S. 381)

Da bei der Ermittlung der Kosten bzw. der Dauer verschiedene mathematische Operationen (Addierung, Subtraktion, Multiplikation etc.) zur Anwendung kommen, ist es wichtig zu verdeutlichen was für einen Einfluss und in welcher Form die Berücksichtigung der Korrelationen auf das Ergebnis hat.

Die Addierung und Multiplikation beeinflussen die Streuung der Ergebnisse, wobei bei einer Korrelation von +1.0 diese ihr Maximum erreicht. Genau umgekehrt ist es bei der Subtraktion und Division, wo bei einer Korrelation von +1.0 die minimale Streuung erreicht wird (Chau, 1995, S. 370-371; Kummer, 2015, S. 183). Da bei der Baukostenermittlung meist mit Additionen und Multiplikationen operiert wird (Mange x Einheit) und die berücksichtigten Korrelationen meist positive Werte aufweisen, beeinflusst dies die Ergebnisse mittels einer breiteren Streuung (Bouayed, 2016, S. 297).

Nach Raftery (1999) wird die Bedeutung der Korrelation in der MSC stärker gewichtet als die Wahl der Verteilungsfunktionen (S. 89). Da Daten zu den Kostenvariablen meist nicht vorhanden oder nicht aufbereitet sind, werden die zwei Parameter, Verteilung und Korrelation, mit einer Simulation durch Experten eingeschätzt. Zusammengefasst kann behauptet werden, dass Korrelationen für Experten schwerer einschätzbar sind als Verteilungen. Als Grund kann es an mangelnden statistischen Kenntnissen der Experten liegen bzw. an der Tatsache, dass Experten nur Menschen sind.

2.4.3 Vor- und Nachteile der MCS

Aus dem Vorgehen bei der MCS lässt sich erschliessen, dass sich für die Berechnung der Baukosten und der Bauzeitdauer viele Vorteile ableiten lassen. Wie schon angedeutet bleibt das Berechnungsmodell gegenüber der deterministischen Betrachtung

gleich. Neben den probabilistischen können gleichzeitig, nach Bedarf, auch deterministische Inputs im Modell eingebunden werden.

Auch wenn die Endergebnisse des Vorgehens mittels der deterministischen Berechnung und der MCS sehr ähnlich ausfallen können, liegt der grosse Unterschied darin, dass mittels der MCS eine Vielzahl an möglichen Szenarien betrachtet wird (Kummer, 2015, S. 205). Dies führt zu einer Einschätzung der Risiken. Diese können mittels MCS genauer und realistischer abgebildet werden. Somit wird das „Best-“, und „Worst-Case-Szenario“ wird in den Ergebnissen automatisch abgebildet. Für Xenidis und Stavrakas (2012) liegen die Vorteile mittels Simulation schlussendlich für Bauherren bei einer besseren Budgetierung und für den Ausführenden bei einer besseren Einschätzung der Wettbewerbsfähigkeit (S. 487). Die gewünschte Unterschreitungs-wahrscheinlichkeit muss gem. dem Auftraggeber erfolgen, dieser kann bei z.B. 80% angenommen werden. Somit werden 20% der Risiken in Kauf genommen (Traynor & Mahmoodian 2019, S. 16). Avlijaš (2018) sieht die Vorteile auch bei der Ermittlung der Bauzeit. Durch die Simulation kann die Dauer besser und genauer abgeschätzt werden, dies kann unter Bezugnahme auf Wahrscheinlichkeiten zum Erreichen des geplanten Enddatums beitragen. Die Simulation ergibt somit ein Mass an Zuverlässigkeit (S. 8).

Die Nachteile der MCS zeigen sich wie schön beschrieben in der Schwierigkeit der Generierung von Verteilfunktionen sowie der Ermittlung von Korrelationen. Gleichzeitig kann der Einfluss der Managementintervention nicht bzw. nur sehr schwer in das Modell eingebunden werden (Avlijaš, 2018, S. 9). Genau wie bei anderen Methoden und Bereichen ist das Modell auch bei MCS nur so gut wie die Informationen die einfließen und schlussendlich wie es die tatsächliche Situation widerspiegelt. Zusammenfassend wird die MCS in der Praxis eher als Problem anstatt als Hilfe betrachtet.

Bei Berücksichtigung einer ungenaueren Verteilung und der Korrelationen ergibt sich ein unschärferes Ergebnis. Dieses führt aber schlussendlich trotzdem zur einer besseren Einschätzung des Wertes und der Risiken als das mit dem deterministischen Vorgehen der Fall wäre.

3. Empirische Untersuchung

Die Kosten für Stahlbetonarbeiten können mit Anlehnung an Hofstadler (2008, S. 321) als Summe der Gesamt-Aufandswerte für Stahlbetonarbeiten AW_{STB} , der Aufandswerte für Schalen, Bewehren und Betonieren, und deren Mittellöhne $ML_{STB,MW}$ sowie der Inventar- und Materialkosten $k_{STB,MW}$ wie folgt errechnet werden:

$$K_{STB, EK} = AW_{STB} \cdot ML_{STB, MW} + k_{STB, MW} \quad (1)$$

Innerhalb der so berechneten Kosten aus der Gleichung (1) können z.B. Produktivitätsverluste durch Temperatur, Lichtverhältnisse etc. und andere Risiken eingebunden werden.

3.1 Aufwandswert für Schal-, Bewehrungs- und Betonarbeiten

Um die Aufwandswerte für Schal-, Bewehrungs- sowie Betonarbeiten für die Berechnung zur ermitteln, wurde eine Umfrage mit 15 Einschätzungen durchgeführt. Auf Grund des sehr spezifischen Themas lag der Fokus der Schätzer bei Bauleitern und Bauführern. Die Umfrage wie auch die Ergebnisse der Aufwandswerte der Arbeiten sind aus Anhang 1 ersichtlich. An dieser Stelle werden lediglich die Mittelwerte (arithmetisches Mittel) der Schätzungen beurteilt. Bei der Auswertung der Einschätzung wird somit angenommen, dass das arithmetische Mittel mit dessen stärkeren Gewichtung der Extremwerte im Vergleich zum Median für die hier untersuchten Aufwendungen aufgrund der Komplexität der Bauarbeiten geeigneter ist.

Um die Ergebnisse aus der Umfrage zu verifizieren und mit der Literatur zu vergleichen, wurden als Bandbreiten die minimalen und maximalen Werte aus den Angaben (Einschätzungen) des Taschenbuchs für Bauführer (2010) beigezogen. Als Mittelwert wurde derjenige gem. Schweizerischer Baumeisterverband SBV (2020) angenommen.

In Abbildung 4 sind die ausgewerteten Schätzungen der Aufwendungen für Schalarbeiten für Decken und Wände aus der in dieser Arbeit durchgeführten Umfrage ersichtlich.

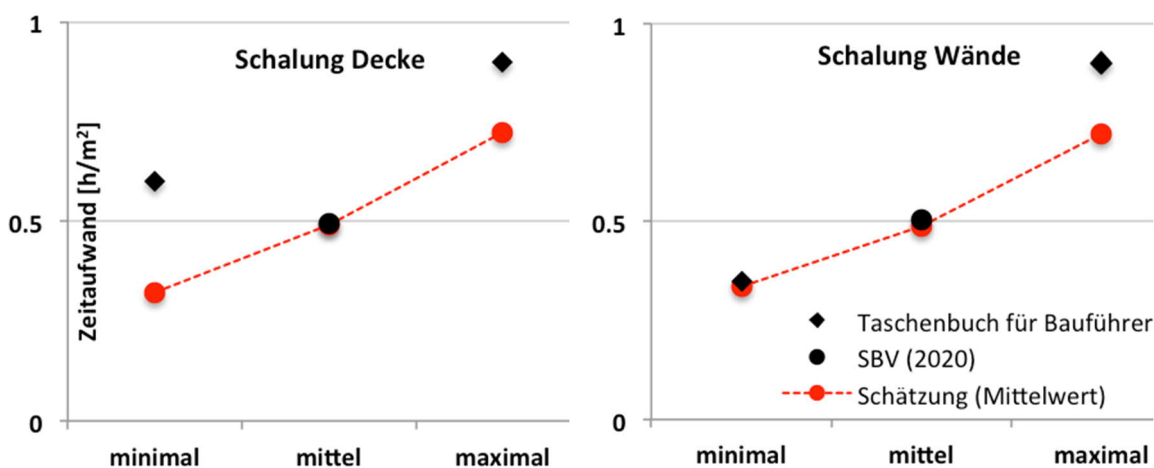


Abbildung 4: Zeitaufwand für Schalarbeiten pro m² gem. Umfrage mit angegebenen Richtwerten gem. dem Taschenbuch für Bauführer (2010) und dem Schweizerischen Baumeisterverband SBV (2020)

Wie aus Abbildung 4 ersichtlich liegen die in dieser Arbeit durchgeführten Schätzungen des Aufwandes für Schalarbeiten meist unter denen aus dem Taschenbuch für Bauführer (2010). Dagegen besteht bei den Mittelwerten gem. Schweizerischem Baumeisterverband SBV (2020) eine sehr gute Übereinstimmung mit den Schätzungen aus unserer Umfrage. Es kann davon ausgegangen werden, dass die Bandbreiten im Taschenbuch für Bauführer für die Kalkulation eher konservativ (höher abgeschätzt) sind. Dies kann auf einer Seite damit begründet werden, dass die möglichen Bandbreiten des Aufwandes bei (un-) komplexen Projekten viel breiter sind. Bei diesen Werten handelt es sich um Erfahrungswerte die anhand einer Vielzahl von Arbeitsabläufen zur Stande kamen. Zweitens sind dies die Werte der Bauführer, bei denen vermutet werden kann, dass diese im Gegensatz z.B. zu denjenigen der Baukalkulatoren, eher zur höheren (konservativen) Aufwendungen tendieren. Gleichzeitig kann aber davon ausgegangen werden, dass die Baukalkulatoren zu optimistischen, eher tiefen Kosten und somit Aufwendungen tendieren.

Grundsätzlich ist aber an dieser Stelle zu beachten, dass die Aufwendungen sowohl von der Grösse und der Komplexität wie auch von der Technologie des Bauens abhängig sind.

Auf Grund der Empfehlungen bei den Einschätzungen, Literatur bzw. Werte aus der Literatur beizuziehen, wurde in unserer Umfrage die obere Schätzung für Schalarbeiten wiederholt. Hierbei wurden den Schätzern die Bandbreiten der Aufwendungen aus dem Taschenbuch für Bauführer (2010) angegeben um somit die Veränderung der Einschätzungen zu untersuchen. Der Vergleich der Schätzung mit und ohne der Angaben der Bandbreite aus dem Taschenbuch ist aus der Abbildung 5 ersichtlich.

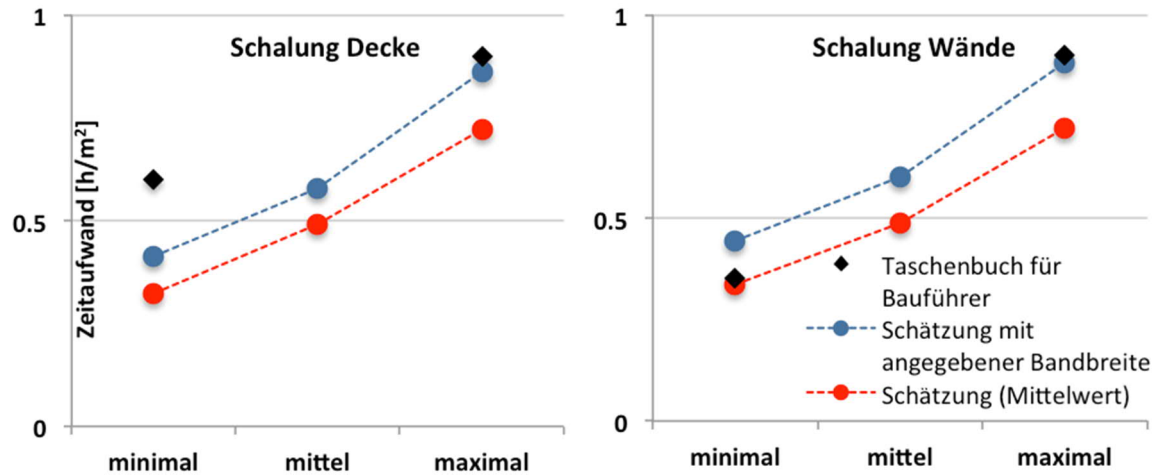


Abbildung 5: Zeitaufwand für Schalarbeiten pro m^2 gem. Schätzung mit und ohne Angaben der Bandbreite aus dem Taschenbuch für Bauführer (2010) mit den angegebenen Werten

Aus dem Vergleich ist ersichtlich, dass die eingeschätzten Werte mit Beeinflussung durch die angegebenen Bandbreiten höher ausfallen. Dies kann mit einem Ankereffekt begründet werden, der zur einer resultierenden Differenz zwischen den zwei Schätzungen im Schnitt von ca. 20% führt.

Im nächsten Schritt wurden die benötigten Aufwendungen für Bewehrungsarbeiten eingeschätzt. Aus dem Vergleich in Abbildung 6 ist ersichtlich, dass die in unserer

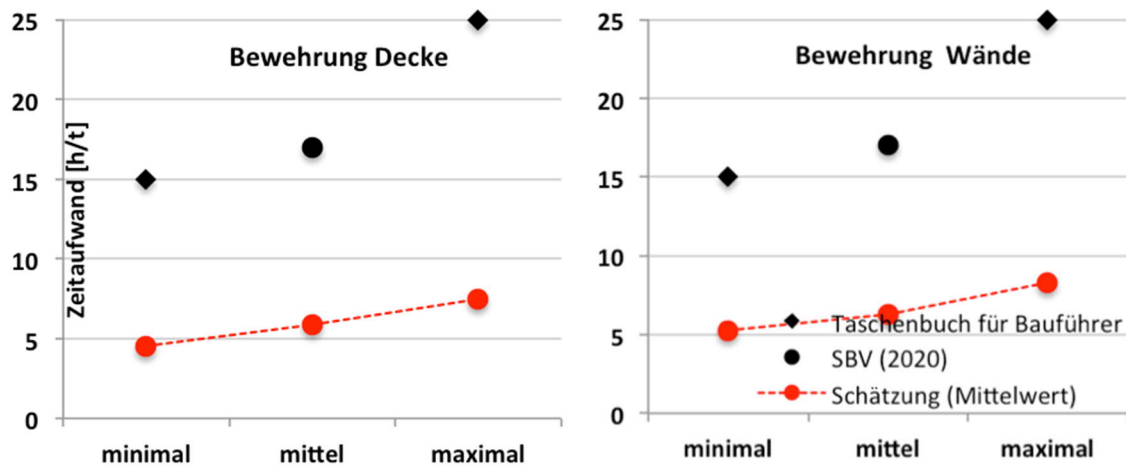


Abbildung 6: Zeitaufwand für Bewehrungsarbeiten pro Tonne gem. Umfrage mit angegebenen Richtwerten gem. dem Taschenbuch für Bauführer (2010) und dem Schweizerischen Baumeisterverband SBV (2020)

Umfrage eingeschätzten Werte viel tiefer liegen als diejenigen aus dem Taschenbuch für Bauführer (2010) und des Schweizerischen Baumeisterverbands SBV (2020). Gleichzeitig ist aber an dieser Stelle eine gute Übereinstimmung zwischen den letzteren erkennbar.

Ähnlich wie bei den Schalungsarbeiten sind auch die eingeschätzten Aufwendungen für Betonierarbeiten aus Abbildung 7 im Randbereich tiefer als diejenigen aus dem Taschenbuch für Bauführer (2010). Dagegen ist bei den Mittelwerten wieder eine gute Übereinstimmung ersichtlich.

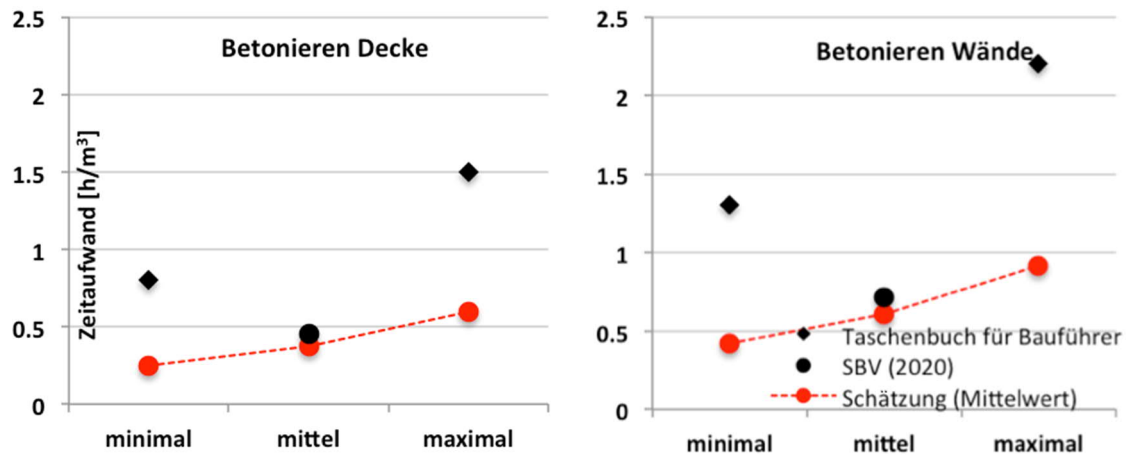


Abbildung 7: Zeitaufwand für das Betonieren pro m³ gem. Umfrage mit angegebenen Richtwerten gem. dem Taschenbuch für Bauführer (2010) und dem Schweizerischen Baumeisterverband SBV (2020)

Wie aus der Einschätzung in Abbildung 4 bis Abbildung 7 ersichtlich ist die Steigerung im rechten Bereich zwischen dem maximalen Wert und dem Mittelwert höher als diejenige des linken Bereiches, zwischen dem minimalen Wert und dem Mittelwert. Dies kann damit begründet werden, dass ein minimaler Aufwand (fast) nicht unterschritten werden kann, anders beim maximalen Aufwand, der auf Grundlage der externen und internen Einflüsse ein höheres Extrem aufweisen kann.

Die Zusammenstellung der oberen Resultate ist in Tabelle 3 ersichtlich.

Bauprozess/Teil		Decken			Wände		
		min.	Ø	max.	min.	Ø	max.
Schalung [Std/m ²]	Schätzung	0.32	0.49	0.72	0.33	0.49	0.72
	SBV		0.493			0.504	
	Taschenbuch	0.60		0.90	0.35		0.90
Bewehrung [Std/t]	Schätzung	4.53	5.88	7.45	5.27	6.32	8.30
	SBV		17			17	
	Taschenbuch	15		25	15		25
Betonieren [Std/m ³]	Schätzung	0.25	0.38	0.60	0.42	0.61	0.92
	SBV		0.452			0.713	
	Taschenbuch	0.80		1.50	1.30		2.20

Tabelle 3: Zusammenstellung von Ergebnissen der Schätzung von Aufwendungen und der Vergleich mit denjenigen aus dem Taschenbuch für Bauführer (2010) für die Bandbreite sowie mit denen des Schweizerischen Baumeisterverbands SBV (2020) für den Mittelwert

Diese Darstellung der Aufwandwerte in diesem Kapitel bestätigt, wie oben beschrieben und aus der Literatur ersichtlich, dass die für die MCS benötigten Schätzungen in der Praxis verifiziert werden sowie plausibilisiert werden müssen. Es ist aus den Darstellungen ersichtlich, dass der Vergleich aus der Literatur, Datenbank sowie aus der in dieser Arbeit durchgeführten Umfrage doch grosse Differenzen aufweist. An dieser Stelle kann darauf hingewiesen werden, dass auch die Differenzen innerhalb der Literatur für einzelne Aufwendungen (Arbeiten) enorm sind. Dies ist z.B. aus der Zusammenfassung im Anhang 3 ersichtlich. Dort ist eine Literaturübersicht verschiedener Autoren mit deren Aufwendungen sowie Bandbreiten zusammengestellt. Werden diese Werte mit denjenigen in dieser Arbeit geschätzten verglichen, ist erkennbar, dass die Schätzungen aus der Umfrage in fast allen Fällen unter denjenigen aus der Literatur liegen. Diese Literaturübersicht wird in dieser Arbeit nicht tiefer diskutiert und dient lediglich der Illustration der hohen Differenzen des Vergleiches verschiedener Autoren.

Gleichzeitig zu den benötigten drei Schätzwerten für die Aufwendungen wurde in der Umfrage auch in die Form dessen Verteilungen eingegangen. So wurden die Schätzer gefragt, ob die Randwerte (minimale und maximale) wahrscheinlich oder eher unwahrscheinlich auftreten können. Diese zwei Möglichkeiten können z.B. mittels der Abbildung 11 veranschaulicht werden. Es war davon auszugehen, dass die Form der

Verteilung für die Schätzer aufgrund eines geringeren statistischen Verständnisses eine „schwere Frage“ darstellt. Die Auswertung deren Einschätzungen zeigt im Anhang 1, dass beide Möglichkeiten ähnlich sind, mit einer leichten Tendenz zum wahrscheinlicheren Auftreten der Randwerte. Wird theoretisch davon ausgegangen, dass Randwerte unerschwinglicher sind, könnte das letztere Ergebnis an der bekannteren/verständlicheren Dreiecksform liegen.

Um auch die Risikomanagement-Wahrnehmung und die Risikobewältigung der Schätzer zu untersuchen, mussten letztere die Verbundenheit zwischen den Baukosten und der Bauzeit beurteilen. Wie erwartet waren sich die Schätzer einig, dass die Baukosten sowie die Bauzeit miteinander verbunden sind. Eventuelle Verzögerungen im Bauprogramm wurden diese meist mittels einer längeren Arbeitszeit oder einer höheren Anzahl an Arbeitskräften wieder einzuholen versuchen.

3.2 Empirisches Beispiel

In dieser Arbeit wurde ein 5-stöckiges fiktives Stahlbeton-Objekt auf Baukosten und Bauzeit untersucht. Der Grundriss mit der Anordnung der Wände der Stärke 25 cm ist in Abbildung 8 ersichtlich. Es wurden Etagenhöhen von 250 cm sowie die Deckenstärken von 30 cm angenommen.

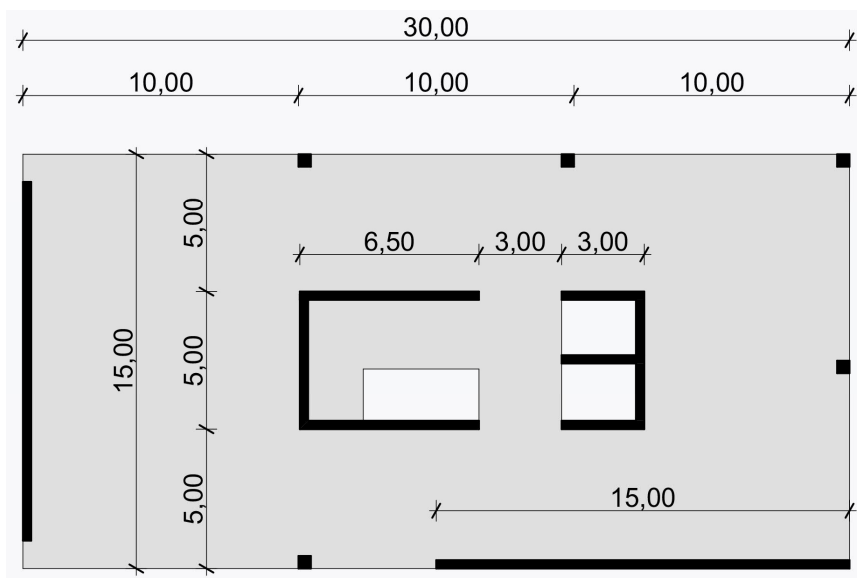


Abbildung 8: Grundriss des untersuchten Beispielobjektes

Die Zusammenstellung der benötigten Mengen für die Stahlbetonarbeiten des Beispielobjektes aus Abbildung 8 ist aus der Tabelle 4 ersichtlich. Die Mengen wurden grundsätzlich als fixer Wert angenommen. Die Ausnahme ist die Bewehrungsmenge aufgrund des unbekanntes Bewehrungsgehaltes. Hierbei wurde die benötigte

Bewehrungsmenge mittels in dieser Arbeit durchgeführten Schätzung (Tabelle 7) ermittelt.

Bauprozess/Teil	Form	Gesamtausmass
Schalung Wände [m ²]	Wert	1590
Schalung Decke [m ²]	Wert	2250
Bewehrung Wände [t]	Verteilung	37.0; 42.6; 52.5
Bewehrung Decke [t]	Verteilung	63.5; 73.5; 89.8
Betonieren Wände [m ³]	Wert	398
Betonieren Decke [m ³]	Wert	675

Tabelle 4: Mengenermittlung für das Beispielobjekt aus Abbildung 8

Für den Bauprozess bzw. die Arbeitsschritte aus Tabelle 4 wurden in unseren Beispiel die in dieser Arbeit ermittelte Aufwendungen für Schal- und Betonarbeiten angenommen. Für die Bewehrungsarbeiten wurden aufgrund der hohen Differenzen zwischen den Einschätzungen und der Literatur (siehe Abbildung 6) aus Plausibilitätsgründen als Randwerte die Werte aus dem Taschenbuch für Bauführer (2010) sowie als Mittelwerte die Werte vom Schweizerischen Baumeisterverband SBV (2020) angenommen. Die Zusammenstellung aller angenommenen Aufwendungen ist in der Tabelle 5 zusammengefasst.

Bauprozess/Teil	Aufwendungen		
	Minimal	erwartet	maximal
Schalung Wände [Std/m ²]	0.33	0.49	0.72
Schalung Decke [Std/m ²]	0.32	0.49	0.72
Bewehrung Wände [Std /t]	15	17	25
Bewehrung Decke [Std /t]	15	17	25
Betonieren Wände [Std /m ³]	0.42	0.61	0.92
Betonieren Decke [Std /m ³]	0.25	0.38	0.60

Tabelle 5: In der Berechnung angenommene Aufwandswerte für das Schalen, Bewehren und Betonieren

Für die Berechnung der Kosten wurde für die Aufwendungen der Stundenansatz gem. Schweizerischer Baumeisterverband SBV (2020) i.H.v. 84 CHF/Std. angenommen.

Die Materialkosten wie auch die Kosten des Inventars werden der Tabelle 6 entnommen und in der Berechnung als deterministische (fixe) Werte angenommen. Hierbei handelt es sich um Mittelwerte des Schweizerischen Baumeisterverbandes SBV (2020).

Bauprozess/Teil	Kosten	
	Material	Inventar
Schalung Wände [CHF/m ²]	1.40	15.90
Schalung Decke [CHF m ²]	0.58	10.80
Abschalung Wände [CHF/m ²]	1.52	6.89
Abschalung Decke [CHF/m ²]	2.34	13.89
Bewehrung Wände [CHF/t]	1000.00	30.00
Bewehrung Decke [CHF/t]	1000.00	30.00
Betonieren Wände [CHF/m ³]	232.73	4.26
Betonieren Decke [CHF/m ³]	216.46	5.16

Tabelle 6: Inventar- und Materialkosten für Schalungs-, Bewehrungs- und Betonarbeiten (Daten: Schweizerischer Baumeisterverband SBV, 2020)

Um die benötigte Bewehrung pro Kubikmeter Beton für die Wände und Deckenelemente anzunehmen, wurden 9 Bauingenieure befragt, welches Bewehrungsgehalt sie für die Wand bzw. Deckenelemente einschätzen wurden. Die ausgewerteten Mittelwerte der gesamten Einschätzung aus dem Anhang 2 sind in der Tabelle 7 dargestellt.

Wände			Decken		
minimal	Mittelwert	maximal	minimal	Mittelwert	maximal
93 kg/m ³	107 kg/m ³	132 kg/m ³	94 kg/m ³	109 kg/m ³	133 kg/m ³

Tabelle 7: Mittelwerte und Bandbreiten der Bewehrungsgehalte gem. Einschätzung der Bauingenieure.

3.2.1 Programm @Risk

Die folgenden Berechnungen (Simulationen) erfolgten mit Hilfe des Programms @Risk der Firma Palisade. Bei diesem Programm handelt es sich um ein Zusatztool von MS Excel. Da MS Excel zu den populärsten bzw. den gängigsten Berechnungen sowie Datenbearbeitungsprogrammen gehört, erfolgt die Monte-Carlo-Simulation mittels @Risk in einem der Mehrheit sehr bekannten Umfeld.

Wird eine Berechnung somit mittels MCS in @Risk durchgeführt, werden alle „klassischen“ Operationen und Vorgehen in das MS Excel eingeben. Die weiteren in der MCS benötigten Inputs, wie z.B. Verteilungen und Korrelation, werden über den Reiter @Risk in der Multifunktionsleiste des MS Excels in die Berechnung eingefügt. An der Stelle ist zu betonen, dass auch alle Optionen von @Risk sehr ähnlich aufgebaut sind wie die von MS Excel. Somit kann mittels weniger Klicks in einer bestehenden Excel-Berechnung z.B. eine Verteilung eingefügt werden.

Gleichzeitig ermöglichen uns @Risk aus bestehenden Datensätzen die passenden Verteilfunktionen zu generieren. Dies wurde auch am Beispiel der Produktivitätsverluste durch Temperatur sowie am Beispiel des Stahlpreises in dieser Arbeit angewendet.

Alle folgenden Simulationen wurden mit Hilfe von @Risk mittels 10`000 Iterationen durchgeführt.

3.2.2 Berechnung der Kosten mit MCS

Die Kosten für Stahlbetonarbeiten wurden durch Gleichung (1) für das Beispielobjekt aus Abbildung 8 mit dem Ausmass nach Tabelle 4 berechnet. Die Aufwandswerte wurden der Tabelle 5 entnommen, die Inventar- sowie Materialkosten erfolgten nach Tabelle 6 mit den erforderlichen Bewehrungsgehalten gem. Tabelle 7.

In den so ermittelten Kosten wurden in den weiteren Schritten innerhalb dieser Arbeit die Produktivitätsverluste durch Temperatur bei den Aufwendungen sowie die Stahlpreisentwicklung berücksichtigt. Innerhalb der Schritte wurde versucht die schon erwähnten theoretischen Grundlagen nachzuweisen und die entsprechenden Berechnungsoptionen wie auch Ergebnismöglichkeiten darzustellen.

So wurden im ersten Schritt die Kosten deterministisch sowie mittels der Monte-Carlo-Simulation berechnet.

Für die deterministische Berechnung wurden für alle Parameter die Mittelwerte angenommen. Die so ermittelten Gesamtkosten belaufen sich auf 845`092.29 CHF. Werden diese Kosten je Bauprozess und Bauteil (Schalung, Bewehrung usw.) unterteilt und verglichen, zeigt sich, dass das Bauteil Decke in allen drei Arbeitsschritten einen Kostenanteil von je ca. 20% bewirkt. Die restlichen 40% der Gesamtkosten für Stahlbetonarbeiten verteilen sich gleichmässig auf die Bauprozesse der Wände, siehe Abbildung 9.

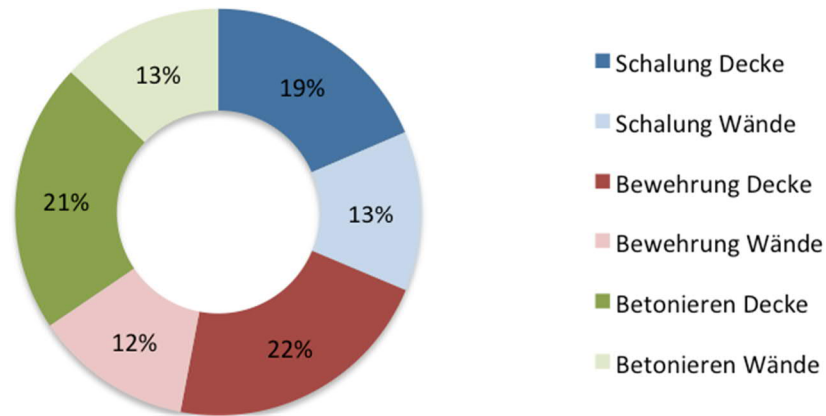


Abbildung 9: Verteilung der deterministisch berechneten Kosten je Bauprozess sowie Bauteil

Als Kostenposition mit dem höchsten Anteil an Gesamtkosten erweist sich aus Abbildung 10 bei den Schalungs- und Bewehrungsarbeiten der Aufwand (Arbeitsleistung) mit einem Anteil von ca. 60%. Anders bei den Betonierarbeiten, hier betragen die Kosten aus dem Aufwand nur ca. 20%, die restlichen Kosten von 80% können den Material- sowie Inventarkosten zugeschrieben werden.

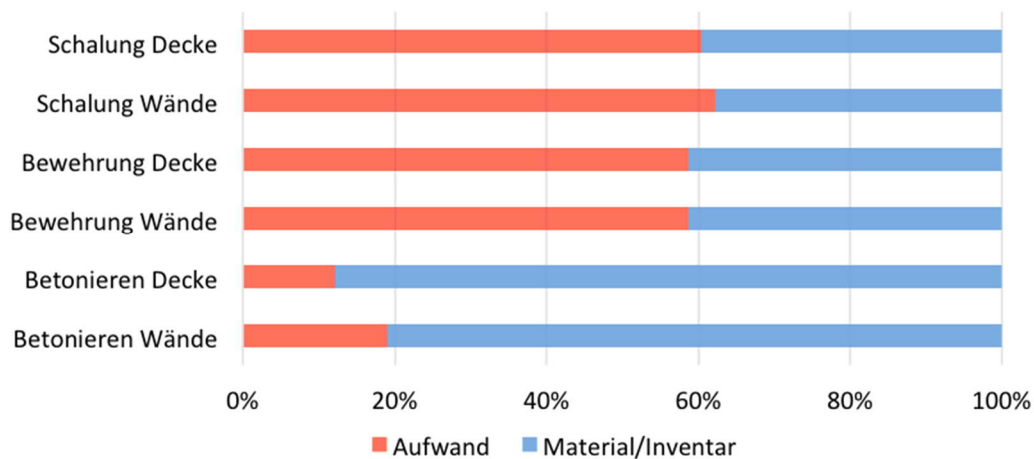


Abbildung 10: Zusammenstellung der Kosten je Bauprozess sowie Bauteil

Anders wie bei dem deterministischen Vorgehen, erfolgte die Simulation auf Grundlage des gesamten Informationsgehaltes (Bandbreite). Letzteres wurde mittels je zwei Verteilungen, der Dreiecks- wie der PERT-Verteilung, berücksichtigt (siehe z.B. Abbildung 11).

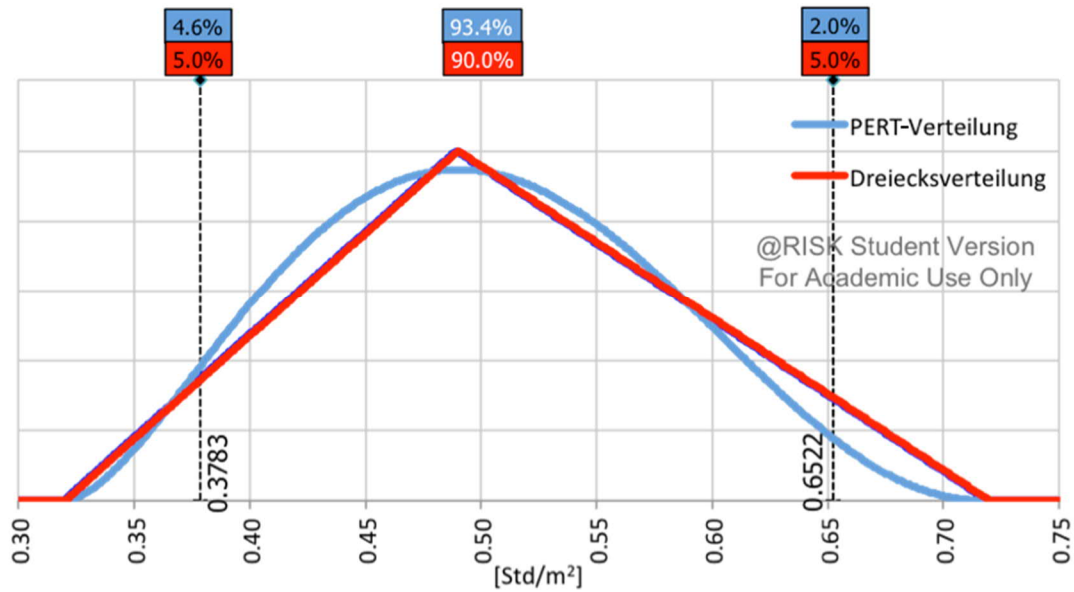


Abbildung 11: Vergleich zwischen der Dreiecks- und PERT-Verteilung für die Aufwendungen Schalen Decke

Wie aus dem Vergleich ersichtlich liegt der Unterschied zwischen den zwei Verteilungen in ihrer Form. So werden bei der Dreiecksverteilung die Randwerte (minimale und maximale) der Bandbreiten stärker gewichtet wie bei der PERT-Verteilung. Bei der Dreiecksverteilung wird im Vergleich zur PERT-Verteilung angenommen, dass die Randwerte wahrscheinlicher sind. In dem gleichen Bereich, in dem die Dreiecksverteilung ein Konfidenzintervall von 90% aufweist, liegt das Konfidenzintervall der PERT-Verteilung wie erwartet höher bei ca. 93%. Die unter Berücksichtigung beider Verteilungsformen und des deterministischen Vorgehens ermittelten Kosten sind in Abbildung 12 verglichen.

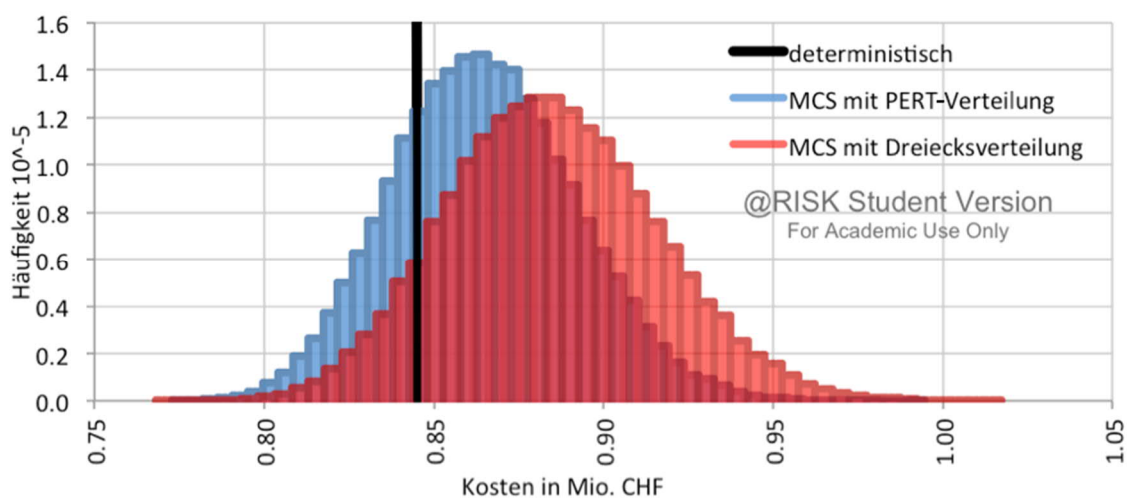


Abbildung 12: Vergleich zwischen den deterministisch berechneten und mittels MCS (PERT- und Dreiecksverteilung) ermittelten Kosten

So ist aus Abbildung 12 eine breitere Streuung der Kosten bei der Dreiecksverteilung im Vergleich zu denjenigen der PERT-Verteilung ersichtlich. Dies ist ein erwartetes Resultat, bei dem die Randwerte (Extremwerte) bei der Dreiecksverteilung im Vergleich zu der PERT-Verteilung stärker gewichtet werden. Die gesamte Verschiebung beider Verteilungen gegenüber der deterministischen Berechnung nach rechts (zu den höheren Kosten) hat ihren Grund in den nach rechts ausgerichteten angenommenen Bandbreiten, vergleich z.B. Abbildung 5 bzw. Abbildung 11.

Aus der Berechnung kann somit entnommen werden, dass die klassisch deterministisch berechneten Kosten im Vergleich zur probabilistisch berechneten bei Berücksichtigung der PERT-Verteilung mit einer Wahrscheinlichkeit von 75% überschritten werden. Bei der Berücksichtigung der Dreiecksverteilung werden die Kosten sogar mit einer Wahrscheinlichkeit von 90% höher ausfallen als die deterministisch berechneten Kosten.

Um gleichzeitig noch die maximalen und minimalen möglichen Kosten zu berechnen wurde eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt. Die Zusammenstellung aller in diesem Schritt berechneten Kosten für Stahlbetonarbeiten ist in der Tabelle 8 ersichtlich.

Berechnungsvorgang	Kosten [CHF]			
	min.	Erwartungswert	max.	Standartabweichung
deterministisch	/	845'092.29	/	/
Sensitivitätsanalyse	736'175.87	845'092.29	1'080'635.97	/
MCS mittels Dreiecksverteilung	768'167.34	884'645.79	1'017'223.41	30'712.01
MCS mittels PERT-Verteilung	772'966.30	864'715.28	994'469.29	26'754.74

Tabelle 8: Zusammenstellung der berechneten Kosten für die Stahlbetonarbeiten für das Beispielobjekt mit dem deterministischen Vorgehen sowie der MCS mittels Dreiecks- und PERT-Verteilung.

Die Differenz zwischen den minimalen und den maximalen Kosten zu dessen Erwartungswert betragen bei der Dreiecksverteilung beiderseitig ca. 15%, bei der PERT-Verteilung ca. 12% bzw. 15%. Eine ähnliche Differenz ist auch aus dem Beispiel eines Wohnungsbaues von Pant & Srinivas (2019) ersichtlich (S. 18).

Da gem. Sander et al. (2009) die Dreiecksverteilung bei Baukosten die geeignete Verteilung darstellt (S. 3) und aufgrund der erkennbaren leichten Tendenz der Praxis

zur Dreiecksverteilung, wurde in den weiteren Berechnungen bei allen Aufwendungen sowie Mengen aus Tabelle 5 und Tabelle 6 die Dreiecksverteilung angenommen.

3.2.3 Berücksichtigung der Korrelationen

Wie in Kap. 2.4.2 beschrieben werden in der Monte-Carlo-Simulation Zusammenhänge zwischen den Variablen mittels Korrelationen berücksichtigt.

Da in der Literatur meist nicht vertieft in die Korrelationskoeffizienten eingegangen wird und wenn doch, diese mittels pauschaler Werte angenommen werden, so z.B. in Bouayed (2016, S. 297) über alle Variablen mit 0.80, wurden die Korrelationskoeffizienten in dieser Arbeit auf Grundlage theoretischer Überlegungen angenommen. Dies erfolgte unter Berücksichtigung der Tabelle 2 und folgender Überlegungen:

- bei grösseren Aufwendungen z.B. bei Schalarbeiten von Decken kann sich dies in einem erhöhten Aufwand bei Wänden widerspiegeln und kontra, somit wird ein positiver eher tiefer Korrelationskoeffizient von 0.25 zwischen den zwei Gruppen von Elementen (Decke und Wand) angenommen
- ein erhöhter Aufwand für Schalarbeiten kann zum Teil mit einer komplizierteren Geometrie begründet werden, dies kann zu einem höheren Bewehrungsgrad sowie einem höheren Aufwand für die Bewehrungsarbeiten führen, somit wird ein mittlerer positiver Korrelationskoeffizient von 0.55 angenommen
- die Mengen wie auch die Aufwendungen bei der Bewehrung weisen einen sehr hohen Zusammenhang auf, da aber nicht nur die Mengenerhöhung die Aufwendungen beeinflusst, wird eine positive, sehr hohe Korrelation von 0.85 angenommen

Die oben beschriebenen Überlegungen sind in der Korrelationskoeffizienten-Matrix in der Tabelle 9 zusammengestellt.

	Schalung Decken Aufwand	Schalung Wände Aufwand	Bewehrung Decken Menge	Bewehrung Decke Aufwand	Bewehrung Wände Menge	Bewehrung Wände Aufwand	Betonieren Decken Aufwand	Betonieren Wände Aufwand
Schalung Decken Aufwand	1.00							
Schalung Wände Aufwand	0.25	1.00						Sym.
Bewehrung Decken Menge	0.55	0.25	1.00					
Bewehrung Decke Aufwand	0.55	0.25	0.85	1.00				
Bewehrung Wände Menge	0.25	0.55	0.25	0.25	1.00			
Bewehrung Wände Aufwand	0.25	0.55	0.25	0.25	0.85	1.00		
Betonieren Decken Aufwand	0.55	0.25	0.55	0.55	0.25	0.25	1.00	
Betonieren Wände Aufwand	0.25	0.55	0.25	0.25	0.55	0.55	0.25	1.00

Tabelle 9: Zusammenstellung der berücksichtigten Korrelationskoeffizienten.

Die Berechnung der Kosten des Stahlbetonbaus erfolgte unter Berücksichtigung der Korrelationen gem. Tabelle 9 sowie der Dreiecksverteilungen. Zwecks des Vergleiches wurden die so ermittelten Kosten mit denjenigen ohne Berücksichtigung der Korrelation in Abbildung 13 verglichen.

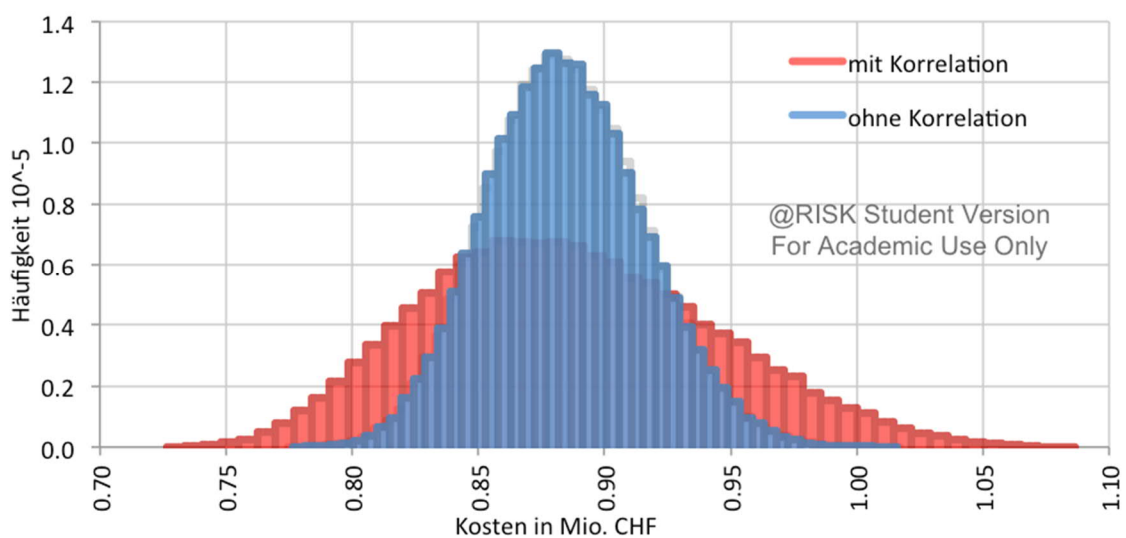


Abbildung 13: Vergleich der Kosten für den Stahlbetonbau unter Berücksichtigung der ermittelten Korrelationen aus Tabelle 9 sowie ohne Berücksichtigung der Korrelation

Wie aus der Literatur ersichtlich und schon erwähnt, wird mit der Berücksichtigung der positiven Korrelationen, siehe Abbildung 13 sowie Tabelle 10, die Streuung der Verteilung höher bzw. breiter.

Berechnungsvorgang	Kosten [CHF]			
	min.	Erwartungswert	max.	Standartabweichung
deterministisch	/	845`092.29	/	/
MCS ohne Korrelationen	779`365.50	884`650.01	1`020`698.22	30`885.18
MCS mit Korrelationen (positiv)	731`307.82	885`996.38	1`093`032.48	56`522.84

Tabelle 10: Vergleich der Kosten für den Stahlbetonbau unter Berücksichtigung und ohne Berücksichtigung der ermittelten Korrelationen aus Tabelle 9 sowie der deterministisch ermittelten Kosten

Die Differenzen zwischen den Erwartungswert und zu den minimalen sowie maximalen Kosten aus Abbildung 10 zwischen der Nichtberücksichtigung und der Berücksichtigung der Korrelationen sind mit denjenigen von Bouayed, Z. (2016) vergleichbar (S. 298).

Bemerkung: aus dem Vergleich zwischen Tabelle 8 und Tabelle 10 für die Dreiecksverteilung ohne Berücksichtigung der Korrelationen kam es bei den gleichen Kosten zu einer kleinen Differenz. Diese beruht auf der Grundlage, dass bei der Monte-Carlo-Simulation mittels Zufallszahlen operiert wird. So kommen bei den gleichen simulierten Berechnungen folglich nicht immer bzw. nur selten identische Werte der Variablen in den Iterationsschritten zum Einsatz. Wie aus Kap. 2.4 ersichtlich steigt mit der Anzahl der Iterationen pro Simulation grundsätzlich die Genauigkeit der Berechnung, gleichzeitig kann von einer Verringerung der erwähnten Differenz ausgegangen werden.

Um diesen Korrelationseffekt auf die Baukostenermittlung bzw. auf die zwei mathematischen Operationen Addieren und Multiplizieren, die bei Kostenermittlung meist zum Einsatz kommen, zu untersuchen, wurde eine Extremsituation angenommen und untersucht. Es wurden illustrativ nur drei Extremwerte der Korrelationskoeffizienten berücksichtigt; alle Korrelationen negativ mit -1.00, keine Korrelation (0.00) und alle Korrelationen positiv mit +1.00. Die so ermittelten Kosten (Abbildung 14) bestätigten die Literatur hinsichtlich der breiteren Streuung, die sich aufgrund der positiven Korrelationen beim Addieren und Multiplizieren ergibt. So fällt

im illustrierten Beispiel die Standardabweichung unter Berücksichtigung der positiven Korrelationen (+1.0) ca. 85% höher aus als ohne Berücksichtigung bzw. mit einer Korrelationen von 0.0.

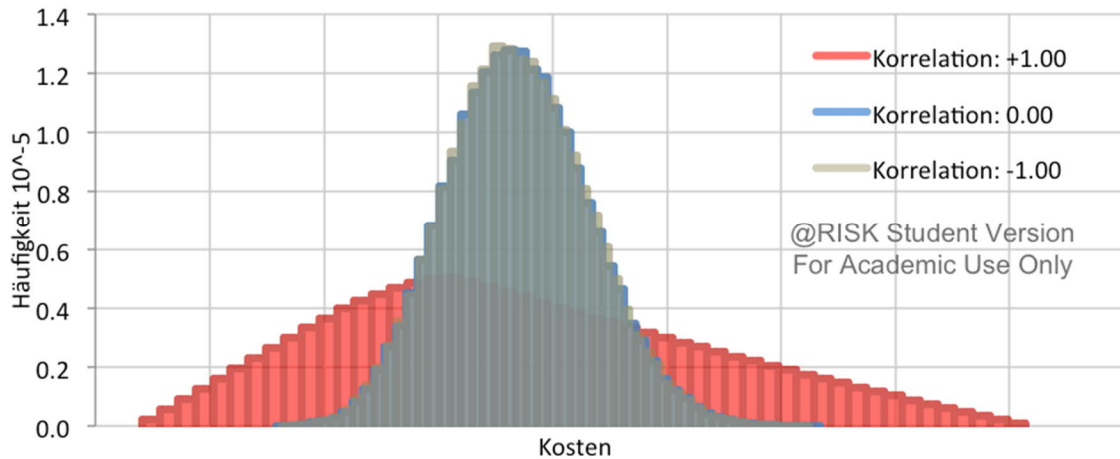


Abbildung 14: Vergleich der Kosten unter Berücksichtigung der Korrelationen von ± 1.00 sowie von 0.00

Gleichzeitig ist aber eine sehr gute Übereinstimmung zwischen den Kosten der Korrelation von 0.00 sowie der negativen Korrelation (-1.00) erkennbar.

3.2.4 Produktivitätsverlust infolge Temperatur

Bauarbeiten sind grossen Temperaturschwankungen ausgesetzt. Diese haben einen Einfluss auf die Technologie des Bauens und die verbauten Materialien sowie auf die Produktivität der Bauarbeiten. Eine nicht optimale Tagestemperatur TMP [°C] führt somit zum Produktivitätsverlust bzw. zur Aufwandswerterhöhung der Bauprozesse.

Produktivitätsverluste können gemäss Hofstadler (2014, S. 435) mit folgender Parabel ermittelt werden:

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

Der so ermittelte Produktivitätsverlust [%] ist empirisch hergeleitet und führt bei einer Abweichung von der optimalen Temperatur (17.5 - 18.5 °C) zur Aufwanderhöhungen in beiden Richtungen, so bei Kälte wie auch bei Hitze. Dies kann damit begründet werden, dass z.B. bei Kälte die Arbeitskräfte durch dickere Kleidung gehindert sind und mehrfache Aufwärmphasen benötigen.

Bei einem klassischen deterministischen Vorgehen muss dem Ermittler bewusst sein, dass diese Produktivitätsverluste einen nichtlinearen Einfluss aufweisen. Dies bedeutet,

dass die Tagestemperatur und der Produktivitätsverlust nicht reziproke Werte sind. Dies kann an einem Beispiel einer Szenario-Analyse verdeutlicht werden. Wird angenommen, dass die Durchschnittstemperatur 10 °C beträgt und eine Abweichung von plus minus 5 °C auftreten kann, erfolgt gem. Hofstadler (2014, S. 435) folgender relativer Produktivitätsverlust:

Temperatur	Relativer Produktivitätsverlust
15 °C	- 2 %
10 °C	0 %
5 °C	+ 5 %

Tabelle 11: Beispiel der Produktivitätsverluste gem. Hofstadler (2014; S. 435)

Um den Produktivitätsverlust infolge Temperatur in unserem Beispiel einzufügen, wurde der Standort Sargans gewählt. Im Weiteren wurden die Kosten unter Berücksichtigung des Produktivitätsverlustes für zwei gewählte Monate, März und Juni, berechnet und verglichen. Die Auswertung dieser Daten mit den Charakteristiken des Standortes Sargans sind in Abbildung 15 ersichtlich. Um die Produktivitätsverluste möglichst real abzubilden, wurden nur die täglichen Temperaturen zwischen 07:00 und 17:00 Uhr (angenommene Arbeitszeit) der letzten 10 Jahre berücksichtigt. Um gleichzeitig noch die Produktivitätsverluste infolge Temperatur nach Hofstadler (2014; S. 435) grafisch zu veranschaulichen, wurden diese auf der Sekundärachse in Abbildung 15 abgebildet.

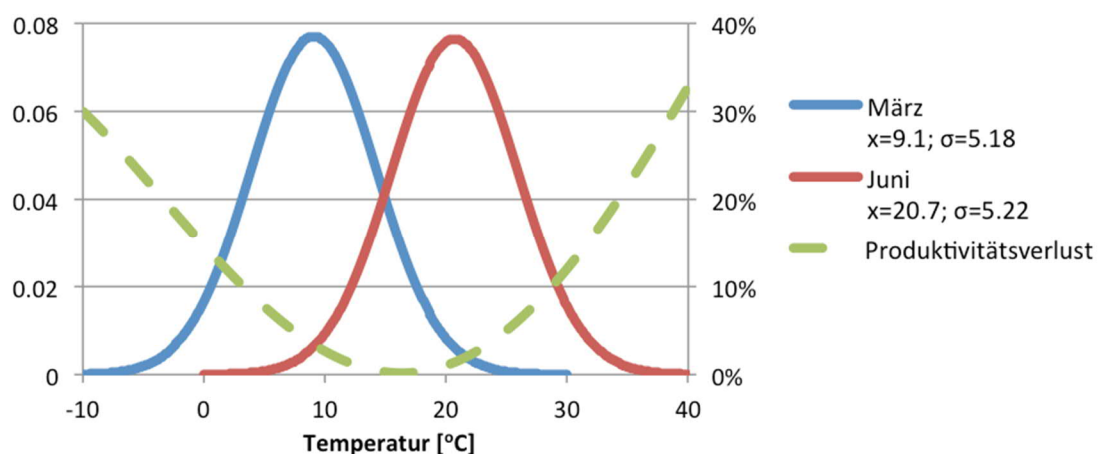


Abbildung 15: Normalverteilungen und deren Verteilungscharakteristiken der Temperatur für die Monate März und Juni für den Standort Sargans, zwischen 07:00 Uhr und 17:00 Uhr und für den Zeitraum 2010-2020, mit Produktivitätsverlust infolge Temperatur nach Hofstadler (2014, S. 435) (Daten: Agrometeo, 2020)

In diesem Schritt der Arbeit wurde aufgrund der Aufwandberechnung anstatt mit Produktivitätsverlusten mit deren inversen Aufwanderhöhungen operiert. Die ausgewerteten Aufwanderhöhungen für den Monat März sind in Abbildung 16 dargestellt. Um letztere in der Berechnung zu berücksichtigen, wurde versucht die Aufwanderhöhungen mit zwei unterschiedlichen Verteilungen zu beschreiben. So wurden in der Abbildung 16 die Aufwanderhöhungen mittels der Exponential- sowie Normalverteilung beschrieben.

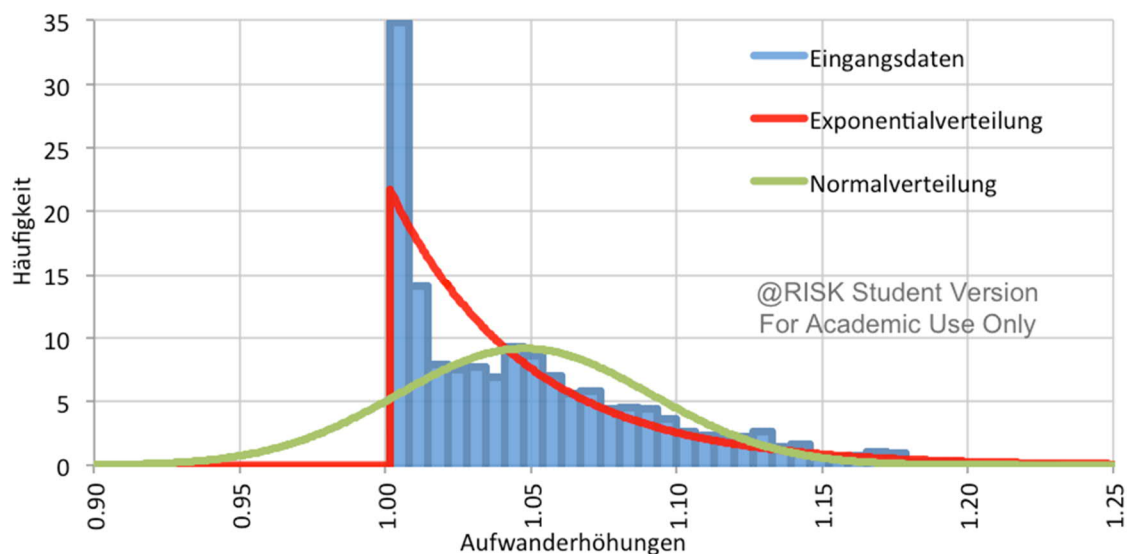


Abbildung 16: Aufwanderhöhung und deren Beschreibung als Exponential- sowie Normalverteilung für den Monat März

So ist aus dem Vergleich zwischen den zwei möglichen Verteilungen ersichtlich, dass die Exponentialverteilung die Eingangsdaten der Aufwanderhöhungen genauer und besser beschreibt.

Um den Einfluss der Wahl zwischen den zwei Verteilungen aus Abbildung 16 auf die Baukosten zu untersuchen, wurden diese mit beiden Aufwanderhöhungsverteilungen berechnet und in Abbildung 17 verglichen. Es ist ersichtlich, dass beide Verteilungen zu ähnlichen Kosten führen. Die Differenz zwischen den Kosten beträgt im Hinblick auf die Gesamtkosten im Durchschnitt ca. 0,9 %, berücksichtigt man hingegen nur die Kosten des Aufwandes (reine Arbeitsleistung) beträgt diese Differenz ca. 1,6 %. Letztere ist ein erwartetes Resultat da die Aufwanderhöhung nur den Aufwand beeinflusst, wobei dessen Kosten grundsätzlich etwas mehr als die Hälfte der Gesamtkosten ausmachen (siehe Abbildung 10).

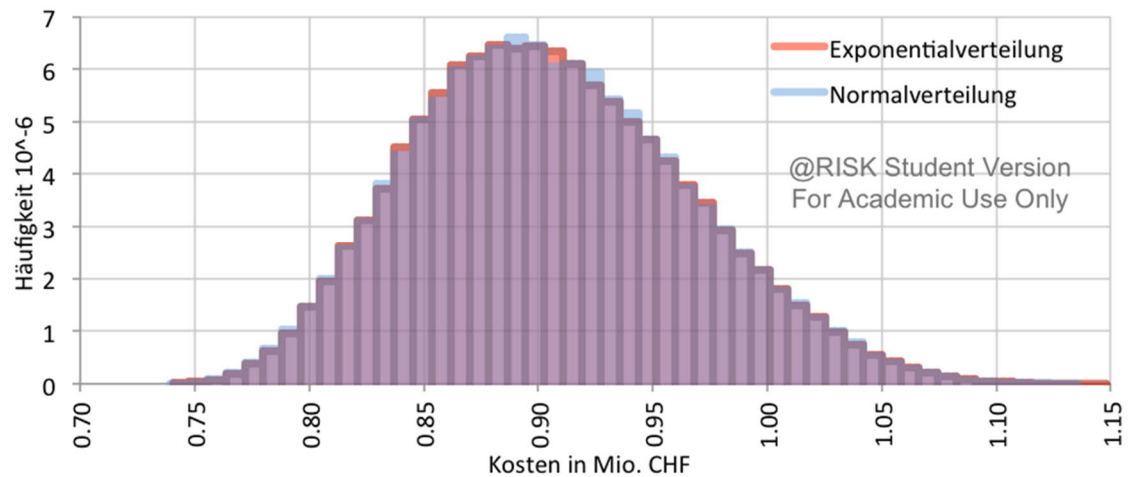


Abbildung 17: Berechnete Kosten unter Berücksichtigung der Aufwanderhöhung (Produktivitätsverlust) infolge Temperatur für den Monat März als Exponential- sowie Normalverteilung

Wie aus dem Vergleich in Abbildung 15 ersichtlich liegt die optimale Arbeitstemperatur zwischen ca. 17.5 - 18.5 °C. Dieses Optimum wird mit der Temperaturverteilung des Monats Juni im Vergleich zum Monat März eher assimiliert. Somit kann davon ausgegangen werden, dass die benötigten Aufwendungen für die Stahlbetonarbeiten im Monat Juni kleiner sind als diejenigen im Monat März. Es ist aber zu beachten, dass die Steigerung der Produktivitätsverluste infolge Temperatur bei Hitze (rechte Seite in Abbildung 15) steiler ist als diejenige der Kälte (linke Seite). Diese erwarteten Kosten unter Berücksichtigung der Exponentialverteilung der Aufwanderhöhung infolge Temperatur für die zwei gewählten Monate März und Juni sind in Abbildung 18 ersichtlich.

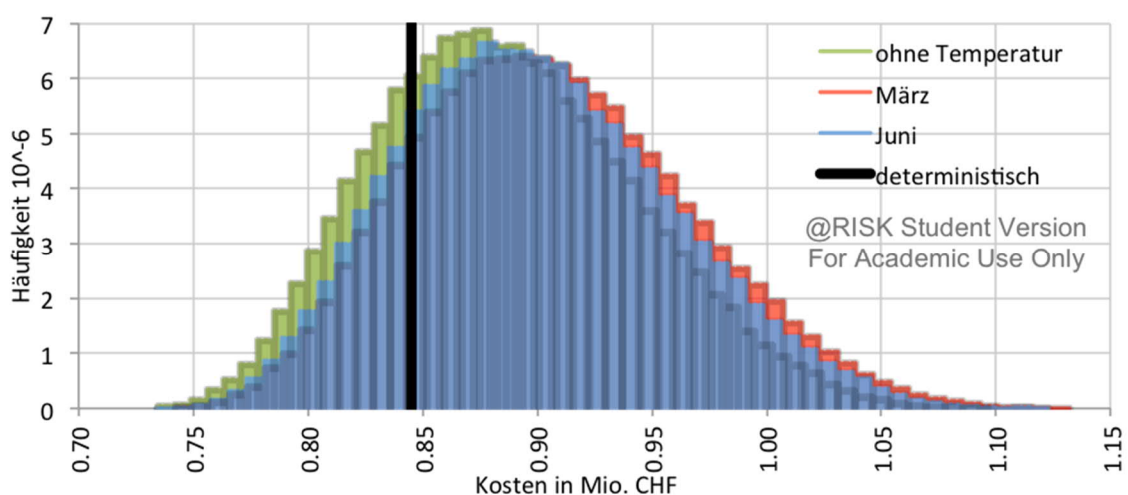


Abbildung 18: Vergleich der berechneten Kosten unter Berücksichtigung der Aufwanderhöhung (Produktivitätsverlust) infolge Temperatur für den Monat März und Juni (Exponentialverteilung) sowie ohne Berücksichtigung der Aufwanderhöhung und des deterministisch ermittelten Wertes

Die Kosten aus Abbildung 18 sind mit den Eckdaten in der Tabelle 12 zusammengefasst.

Berechnungsvorgang	Kosten [CHF]		
	min.	Erwartungswert	max.
Deterministisch	/	845`092.29	/
MCS ohne Temperatur	734`545.44	885`995.26	1`096`340.68
MCS mit Temperatur (März)	742`466.91	905`681.21	1`132`078.47
MCS mit Temperatur (Juni)	734`333.53	898`900.62	1`122`947.18

Tabelle 12: Ermittelte Baukosten mit und ohne Berücksichtigung der Aufwanderhöhung durch Temperatur

Aus den Berechnungen in @Risk können neben den Ergebnissen der simulierten vorgegebenen Berechnung auch z.B. die auf die Berechnung einflussnehmenden Variablen ausgelesen werden. Für unser Beispiel ist aus Abbildung 19 ersichtlich, dass die Aufwanderhöhung bzw. der Produktivitätsverlust infolge Temperatur des Monats März auf die gesamte Berechnung den kleinsten Einfluss hat.

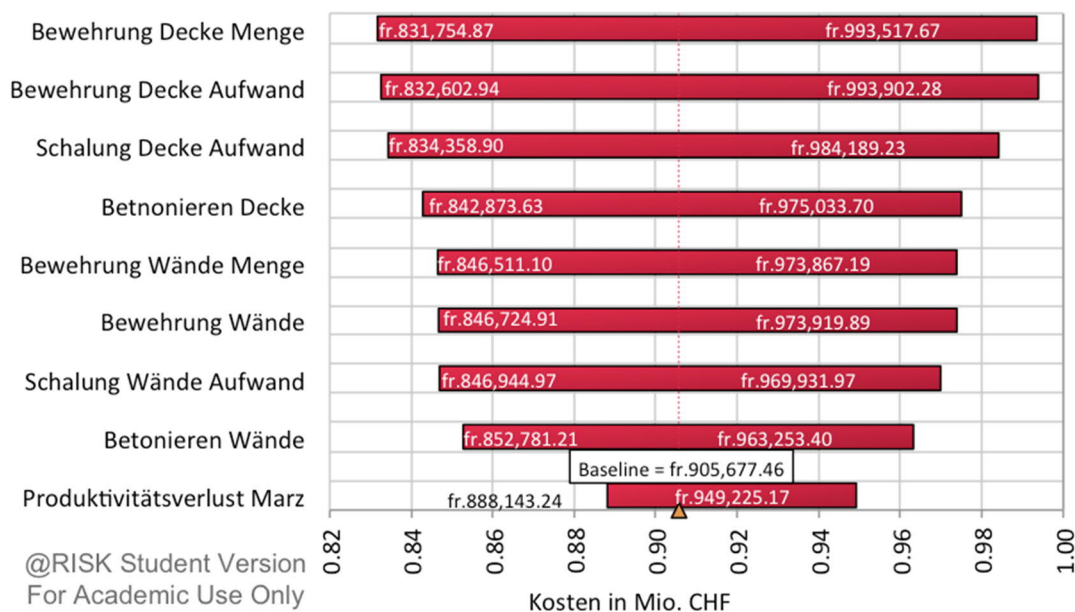


Abbildung 19: Auswertung der einflussreichen Variablen für die Berechnung der Baukosten unter Berücksichtigung der Aufwanderhöhung für den Monat März (Exponentialverteilung)

Hingegen ergibt sich als einflussreichste Variable bzw. Variable mit der höchsten Hebelwirkung auf die Kosten die Bewehrungsmenge. Gefolgt von dem damit verbundenen Aufwand bei Decken. Dies ist infolge des Ausmasses und der Bandbreiten der Mengen sowie der benötigten Aufwendungen ein erwartetes Resultat.

3.2.5 Kostendifferenz infolge Marktschwankungen des Stahlpreises

Wie schon aus der Abbildung 1 ersichtlich ist die Position Bewehrungsstäbe den höchsten Schwankungen unterworfen (ist am volatilsten). Diese Position wird auf den

Materialpreis und auf einbaufertig unterteilt. Der Unterschied liegt in der Zusammensetzung der Positionen. So bedeutet einbaufertig die Summe des Aufwands für die Bewehrungsarbeiten und des Materialpreises der Bewehrung. Letzteres ist wie schon aus Abbildung 1 ersichtlich aufgrund der Werte und des synchronen Verlaufes mit der Position einbaufertig die volatilste. Dieser in der folgenden Berechnung berücksichtigte Verlauf des Preisindex für den Materialpreis ist aus Abbildung 20 ersichtlich.

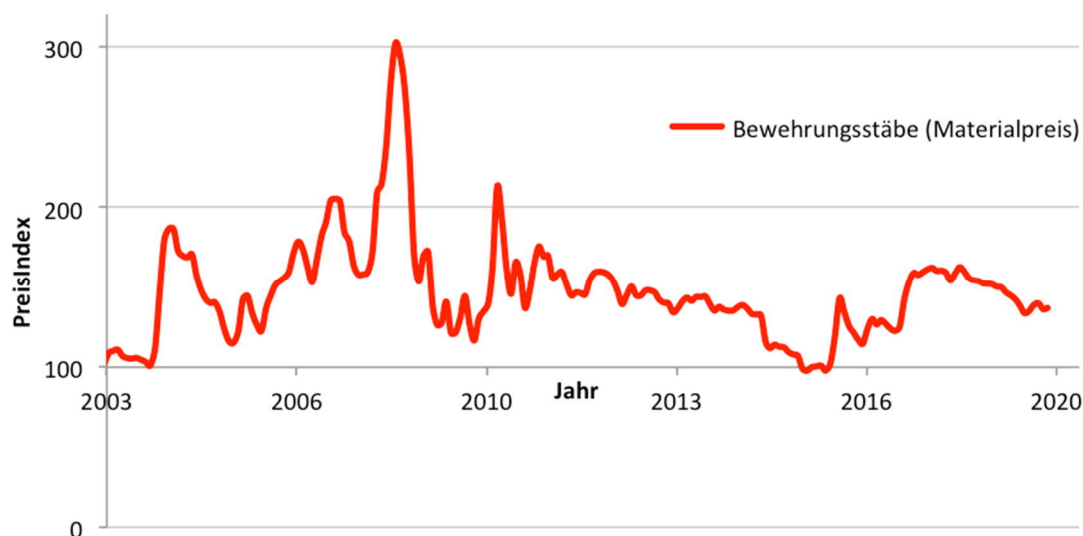


Abbildung 20: Preisindex Bewehrungsstäbe (Materialpreis), Basis Dezember 2015 (Daten: Bundesamt für Statistik BFS, 2020)

Gemäss dem Schweizerischen Baumeisterverband SBV (2020) betragen die Materialkosten der Bewehrung 1000 CHF/t (siehe Tabelle 6). Davon entspricht der grösste Teil von 920 CHF/t dem Preis des Bewehrungsstahls und die restliche Differenz ergibt sich aus den benötigten zusätzlichen Materialien bzw. Zuschlägen.

Um die Angaben gem. BFS (2020) in Abbildung 1 für die Bewehrungsstäbe Materialpreis und einbaufertig mit denjenigen des Schweizerischen Baumeisterverbands SBV (2020) zu verifizieren, wurde eine Plausibilitätskontrolle durchgeführt. Hierbei kann gemäss dem Schweizerischen Baumeisterverband SBV (2020) zum heutigen Zeitpunkt ein Verhältnis zwischen Materialpreis und Aufwendungen für Bewehrungsarbeiten mit 1.0 zu 1.5 angenommen werden. Wird dieser Materialpreis mit dem heutigen Wert und dem angegebenen Verhältnis im Zeitverlauf aus Abbildung 20 berücksichtigt, ergibt sich eine Verifizierung des parallel und vertikal verschobenen Verlaufes des Preisindex in Abbildung 1 für Bewehrungsstäbe Materialpreis sowie einbaufertig.

Ähnlich wie bei dem Produktivitätsverlust durch den Temperatureinfluss wurde auch bei der Stahlpreisverteilung nach der geeigneten Form der Verteilung gesucht. Aus der Analyse des Verlaufs des Stahlpreisindex wurden aus einer Vielzahl möglicher Verteilungen zwei -die lügt-logistische Verteilung (in der Ökonomie als Fisk Verteilung bekannt) und die Normalverteilung - als die für den Stahlpreisindex am besten beschriebene erachtet. Dessen Vergleich ist für den Zeitverlauf der letzten 17 bzw. 10 Jahre aus der Abbildung 21 ersichtlich. So ist aus dem Vergleich ersichtlich das

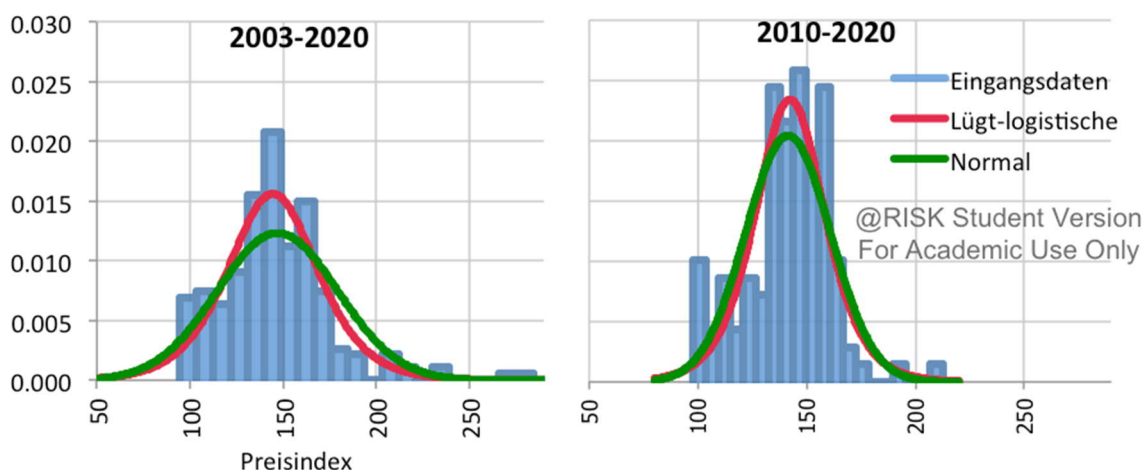


Abbildung 21: Dichtefunktionen der Verteilungen von Preisindizes Bewehrungsstäbe (Materialpreis) aus Bundesamt für Statistik BFS (2020) für die Jahre 2003 bis 2020 und der letzten 10 Jahre (2010-2020)

grundsätzlich beide Verteilfunktionen die Eingabedaten gut überdecken. So wurde an dieser Stelle im vorherigen Model mit Berücksichtigung der Temperatur (März mit Exponentialverteilung) der Stahlpreis mittels der lügt-logistischen Verteilung für den Zeitraum der letzten 10 Jahre berücksichtigt. Die so ermittelten Kosten mit und ohne Berücksichtigung der Stahlpreisänderung sind in Abbildung 22 ersichtlich. Die Berücksichtigung des Stahlpreises als Verteilung bewirkt eine Verbreiterung der Streuung der Kostverteilung, anders beeinflusst diese aber nicht den Erwartungswert.

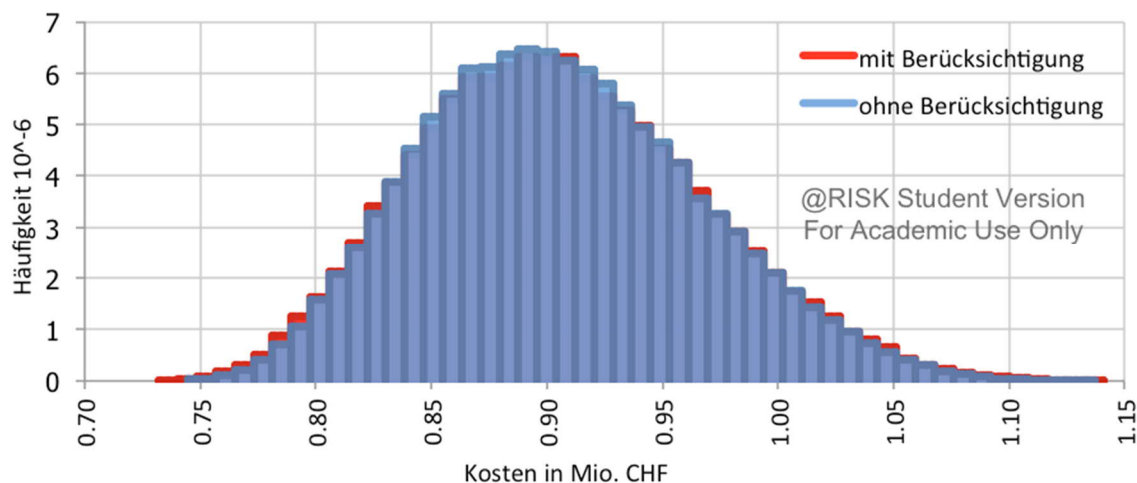


Abbildung 22: Vergleich der berechneten Kosten unter Berücksichtigung des Stahlpreises (lügt-logistische Verteilung der letzten 10 Jahre)

Die breitere Streuung ist unter der Berücksichtigung, dass in der Berechnung eine weitere Variabel als Verteilung hinterlegt wurde, zu erwarten. Ebenso bewirkt die Wahl einer symmetrischen Verteilungsform keine Änderungen des Erwartungswertes. Diese zwei Einflüsse sind aus Tabelle 13 noch ersichtlicher.

Berechnungsvorgang	Kosten [CHF]		
	min.	Erwartungswert	max.
Deterministisch	/	845`092.29	/
MCS ohne Berück. Stahlpreis	744`480.23	905`688.39	1`137`260.43
MCS mit Berück. Stahlpreis	732`179.14	905`690.42	1`141`270.88

Tabelle 13: Ermittelte Kosten mit und ohne Berücksichtigung des Stahlpreises

Da die Differenzen zwischen der Berücksichtigung und der nicht Berücksichtigung der Stahlpreisschwankungen relativ klein sind, wurde im Weiteren detaillierter der Einfluss auf die reinen Materialkosten des Bewehrungsstahles untersucht. Somit wurden die Materialkosten des Bewehrungsstahles isoliert betrachtet. Diese Materialkosten betragen für die erwartete Menge von 116.1 Tonnen deterministisch betrachtet 116`100.- CHF. Letztere werden mit denjenigen Kosten verglichen, die aus der Berücksichtigung der lügt-logistischen Verteilung und der Normalverteilung des Stahlpreises (letzte 10 Jahre aus Abbildung 21) resultieren. Aus den Vergleich in Abbildung 23 ist ersichtlich, dass unabhängig von der Verteilfunktion der Erwartungs-

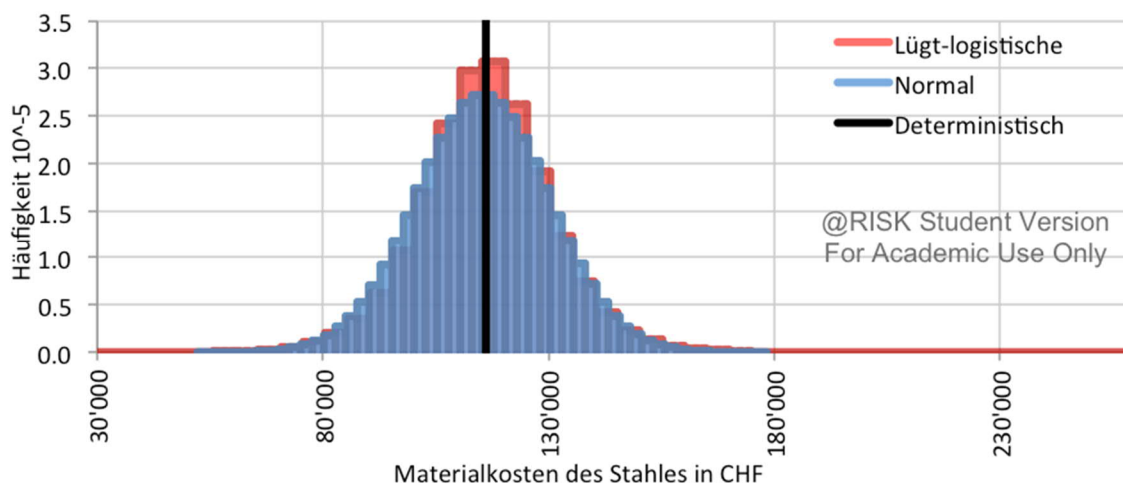


Abbildung 23: Vergleich der reinen Materialkosten für Bewehrungsstahl

wert (Mittelwert) der Kosten nahe an dem deterministisch ermittelten liegt. Aus dem Vergleich ist ebenso ersichtlich, dass beide Verteilungsformen ähnliche Kostenverteilungen aufweisen, somit kann wie schon oben erwähnt davon ausgegangen werden, dass der Bewehrungsstahlpreis mittels beider Verteilfunktionen ähnlich gut abgebildet werden kann.

Wird der Vergleich in Abbildung 23 detaillierter betrachtet, ergeben sich die klassisch deterministisch berechnete, reine Materialkosten des Bewehrungsstahles für das Beispielobjekt mit ca. 116'000 CHF. Diese Kosten können mit einer Wahrscheinlichkeit von ca. 50% unter- bzw. überschätzt werden. Möchte man hingegen bei der Budgetierung eine Sicherheit von 90% eingehen (VaR90) muss mit Kosten von ca. 134'000.- CHF ausgegangen werden. Letztere Kosten gelten aufgrund des sehr ähnlichen Verlaufes für beide Verteilfunktionen aus Abbildung 23.

Aufgrund der oben berechneten Differenz zwischen den deterministisch berechneten Kosten und dem Marktverhalten des Stahlpreises, überwälzen in der Praxis die Baumeister wegen keiner Beeinflussungsmöglichkeiten ihrerseits das Risiko der Stahlpreisschwankungen, auch bei Pauschalaufträgen, meist auf die Auftraggeber.

3.2.6 Vergleich der deterministisch und mittels Monte-Carlo-Simulation ermittelten Baukosten

Aus dem Vergleich der oben ermittelten Baukosten ist in Abbildung 24 ersichtlich, dass sich mit der Berücksichtigung der Korrelationen wie auch jeder weiteren Variable als probabilistischer Input, in unserem Fall des Produktivitätsverlustes aufgrund der Temperatur sowie der Stahlpreisschwankungen, die Bandbreiten der Kosten erhöhen.

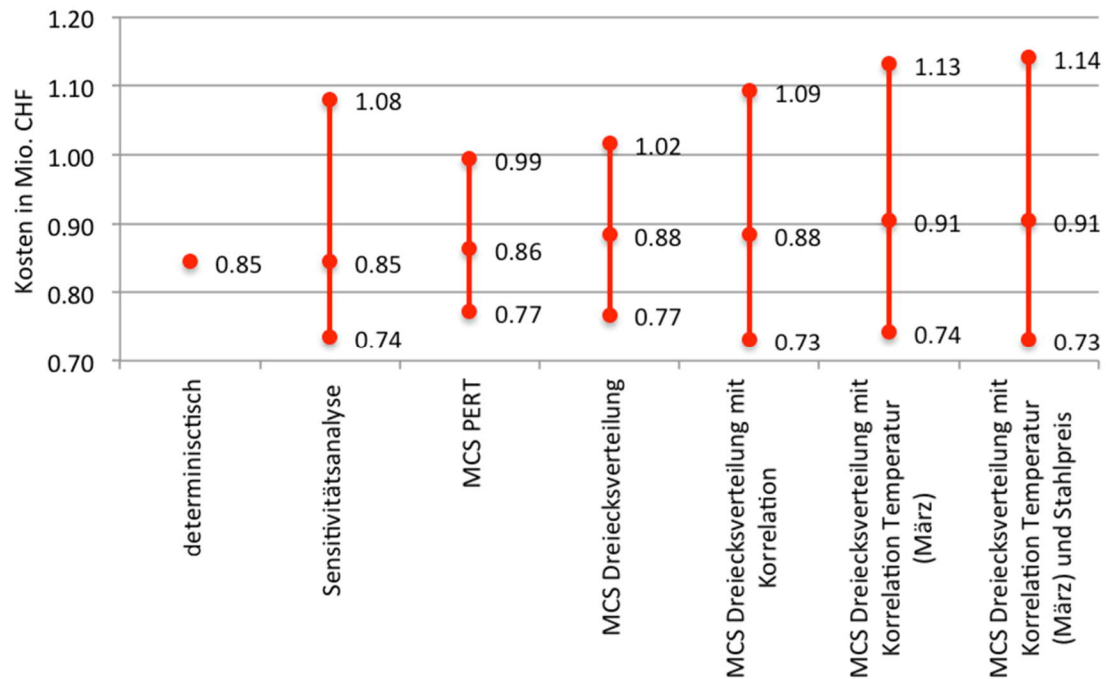


Abbildung 24: Zusammenfassung der in dieser Arbeit ermittelten Baukosten mit Bandbreiten

Werden so die Kosten mit einer Sicherheit von 80% (VaR80) bzw. 90% (VaR90) z.B. vom Investor angestrebt, ist aus den oberen Berechnungen für das Beispiel mit folgenden Kosten aus Tabelle 14 zu rechnen.

Berechnungsvorgang	Kosten [CHF]			
	Deterministisch	845'092.-		
Probabilistisch	VaR80	Δ zu determinist.	VaR90	Δ zu determinist.
MCS mit Dreiecksverteilung	910'698.-	+ 7.8 %	924'894.-	+ 9.4%
plus Korrelation	935'376.-	+ 10.7 %	963'041.-	+ 14.0%
plus Temperatur (März)	956'988.-	+ 13.2 %	986'397.-	+ 16.7%
plus Stahlpreis	958'312.-	+ 13.4 %	988'151.-	+ 16.9%

Tabelle 14: Vergleich der in dieser Arbeit ermittelten Baukosten mit einem Value at Risk (VaR) von 80% bzw. 90% sowie deren Differenz zu den deterministisch ermittelten Kosten

Daraus ist ersichtlich, dass mit steigender Berücksichtigung probabilistischer Variablen sowie der Sicherheit die Kosten steigen. Werden z.B. alle in diesem Beispiel berücksichtigten Variablen mit einer angestrebten Sicherheit von 80 % bzw. 90 % angenommen, so fallen die Baukosten ca. 13 % bzw. 17 % höher aus als deterministisch ermittelt. Andererseits kann auch behauptet werden, dass die deterministisch ermittelten

Kosten z.B. unter Berücksichtigung aller Variablen aus dem Beispiel mit einer Chance von ca. 20% unterschritten bzw. mit einem Risiko von ca. 80% überschritten werden. Zu einem ähnlichen Ergebnis zwischen den deterministischen und mittels MCS ermittelten Kosten kam auch Kummer (2017). Dabei erwies sich, dass die deterministisch ermittelten Kosten am Beispiel der Schalungsarbeiten mit einer Chance von 22% unterschritten bzw. mit einem Risiko von 78% überschritten werden (S. 5).

Wird angenommen, dass sich das Beispiel z.B. im Phasenmodell nach SIA in der Ausschreibungsphase befindet, so sollten die Kosten - wenn überhaupt - mit einer Toleranz von +/- 5 % festgelegt werden. Wird dies mit der Tabelle 14 verglichen, ist schnell ersichtlich, dass die Baukosten mit einer grossen Wahrscheinlichkeit mittels des deterministischen Vorgehens unterschätzt werden.

3.2.7 Ermittlung der Bauzeit

Die Ermittlung der Bauzeit erfolgte auf Grundlage der in dieser Arbeit durchgeführten Umfrage bezüglich Anzahl der Arbeitskräfte pro Arbeitsschritt (Bauprozess). So wurde in der folgenden Berechnung die durchschnittliche Anzahl der Arbeitskräfte aus der Umfrage in Anhang 1 wie folgt angenommen:

- Schalen: 6 Arbeitskräfte
- Bewehren: 5 Arbeitskräfte
- Betonieren: 4 Arbeitskräfte

Als durchschnittliche Arbeitsleistung pro Tag wurde die Arbeitszeit von 8.5 Stunden angenommen. Die Verteilungen wurden so wie bei den Kostenberechnungen mit Dreiecksverteilungen angenommen. Der Vergleich zwischen der deterministisch und mittels MCS ermittelten Bauzeit ist in Abbildung 25 ersichtlich.

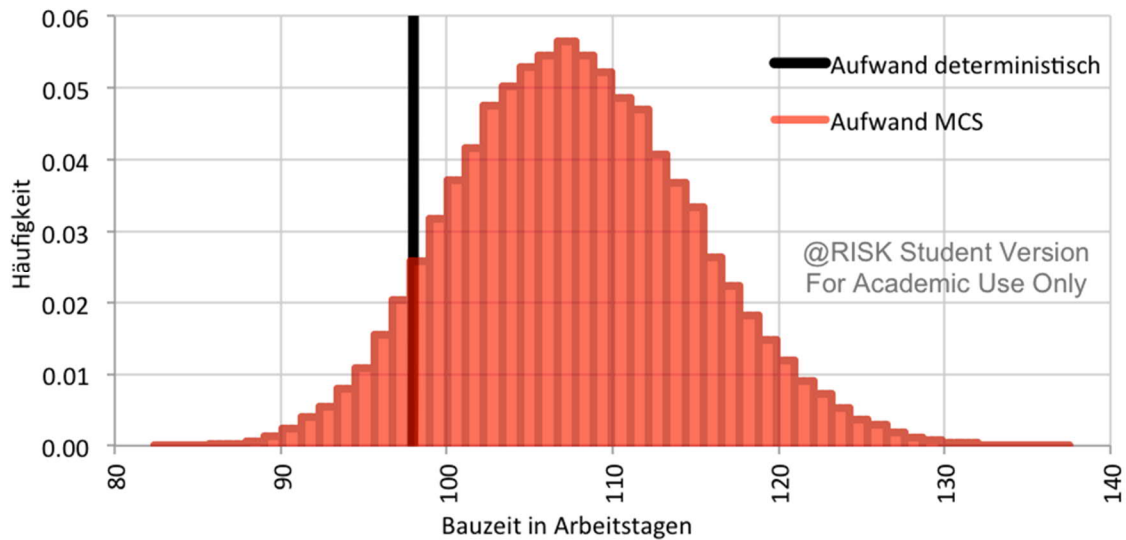


Abbildung 25: Vergleich zwischen der deterministisch sowie mittels MCS unter Berücksichtigung der Dreiecksverteilung aller Variablen ermittelten Bauzeit

Aus dem Vergleich ist ersichtlich, dass die Bauzeit mittels deterministischer Berechnung tiefer liegt als diejenige des MCS-Vorgehens. Der Grund für die Verschiebung nach rechts liegt gleich wie bei den Kosten in Abbildung 12 in den nach rechts verschobenen Aufwendungsverteilungen.

So kann davon ausgegangen werden, dass die deterministisch berechnete Bauzeit von 98 Arbeitstagen (siehe Tabelle 15) mit einer Wahrscheinlichkeit von nur 10% unter-

Berechnungsvorgang	Bauzeit [Arbeitstage]		
	min.	Erwartungswert	max.
Deterministisch	/	98	/
MCS (Dreiecksverteilung)	82	108	138

Tabelle 15: Zusammenstellung der minimalen, erwarteten und maximalen Bauzeit für die deterministische sowie mittels MCS unter Berücksichtigung der Dreiecksverteilung aller Variablen durchgeführte Ermittlung

schätzt wird (VaR10). Umgekehrt kann mit einer Wahrscheinlichkeit von 90% behauptet werden, dass die ermittelten 98 Arbeitstage in der Praxis überschritten werden. So beträgt die ermittelte Bauzeit mit einem VaR80 ca. 114 Arbeitstage bzw. bei einem VaR90 ca. 117 Arbeitstage.

Wird in der Berechnung der Bauzeit noch der Produktivitätsverlust infolge Temperatur aus Abbildung 16 für den Monat März mit der Exponentialverteilung berücksichtigt, erhöht sich wie erwartet äquivalent zu den Kosten auch der Aufwand bzw. verlängert sich die Bauzeit, wie aus Abbildung 26 ersichtlich.

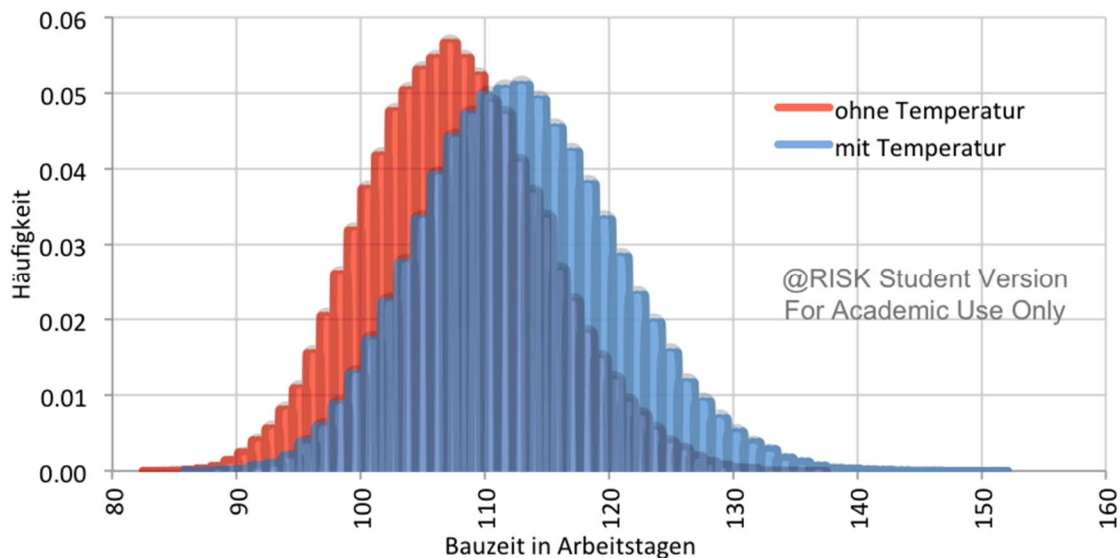


Abbildung 26: Vergleich zwischen der mittels MCS ermittelten Bauzeit mit und ohne Berücksichtigung des Produktivitätsverlustes aufgrund Temperatur für den Monat März

So verschiebt sich die Bauzeitverteilung nach rechts und der Erwartungswert der Bauzeit erhöht sich von den ohne Berücksichtigung des Produktivitätsverlustes ermittelten 108 auf 113 Arbeitstage (Tabelle 16), mit Berücksichtigung des Produktivitätsverlustes infolge Temperatur.

Berechnungsvorgang	Bauzeit [Arbeitstage]		
	min.	Erwartungswert	max.
MCS ohne Berücksichtigung Temperatur	82	108	138
MCS mit Berücksichtigung Temperatur	86	113	152

Tabelle 16: Zusammenstellung der minimalen, erwarteten und maximalen Bauzeit, mit und ohne Berücksichtigung des Produktivitätsverlustes aufgrund Temperatur für den Monat März

Neben den Baukosten liegt der Fokus des Risikomanagementprozesses im Bau auch bei der Bauzeit. Diese wird ebenso wie die Kosten kontinuierlich geprüft und bewertet. Wird die Bauzeit überschritten, wird innerhalb des Bauprozesses versucht die Zeit wieder einzuholen, um somit eine fristgerechte Fertigstellung zu gewährleisten. So kann mittels längerer Arbeitszeit, höherer Anzahl an Arbeitskräften, Eingriffe in die Bautechnologie etc. die Bauzeit positiv beeinflusst bzw. verkürzt werden. Letztlich können so Verzögerungen wieder eingeholt werden. Aus der Umfrage die in dieser Arbeit durchgeführt wurde kann davon ausgegangen werden, dass bei Verzögerungen in der Praxis meist auf die Verlängerung der Arbeitszeit (tägliche Arbeitszeit und/oder Samstagsarbeit) zurückgegriffen wird.

Es ist zu beachten, dass bei fast allen Massnahmen zur Verkürzung der „normalen“ Bauzeit infolge verschiedenster Einflussfaktoren Produktivitätsverluste entstehen. Diese resultieren bei erhöhten bzw. längeren Arbeitszeiten aus den psychischen (z.B. Motivation) wie auch physischen (z.B. Erschöpfung) Einflüssen. Der Produktivitätsverlust auf Grundlage der längeren Arbeitszeit wurde von Hofstadler (2014; S. 439) empirisch untersucht und ausgewertet. Der resultierende Produktivitätsverlust [%] in Verbindung zur Arbeitszeit AZ_{STB} [h] kann folglich beschrieben werden:

$$\Delta PV_{AZ} = -0.000084 \cdot AZ_{STB}^4 + 0.003961 \cdot AZ_{STB}^3 - 0.04746 \cdot AZ_{STB}^2 + 0.169125 \cdot AZ_{STB} \quad (3)$$

Wie aus der Gleichung (3) ersichtlich handelt es sich bei den Produktivitätsverlusten aufgrund der längeren Arbeitszeit, ähnlich wie bei der Temperatur, um eine nichtlineare Funktion, die mit steigender Arbeitszeit eine überproportionale Erhöhung des Produktivitätsverlustes aufweist.

An dieser Stelle kann bemerkt werden, dass die Produktivitätsverluste aus z.B. längeren Arbeitszeiten, Unterschreitung einer minimalen Arbeitsfläche, Licht- und Temperaturverhältnisse etc. dazu führen, dass sich mit einer angestrebten geringeren Bauzeit die Baukosten exponentiell erhöhen. Diese Verringerung der Bauzeit ist aber nur bis zu einem gewissen Punkt möglich, da einerseits wie schon erwähnt die Produktivität fällt und auf der anderen Seite technologische wie auch bautechnische Hindernisse bestehen.

Wird in der Berechnung aus Abbildung 26 mit der Berücksichtigung des Temperatureinflusses eine tägliche Arbeitszeit von 12 Stunden angenommen, ist zu erwarten, dass sich die Bauzeit verringert. Gleichzeitig ist aufgrund der längeren täglichen Arbeitszeit ein Produktivitätsverlust zu erwarten. Dieser Vergleich ist aus Abbildung 27 ersichtlich, wo illustrativ zwecks des Verständnisses die Bauzeit mit der Arbeitszeit von 12 Stunden mit und ohne Produktivitätsverlust aufgezeichnet wurde.

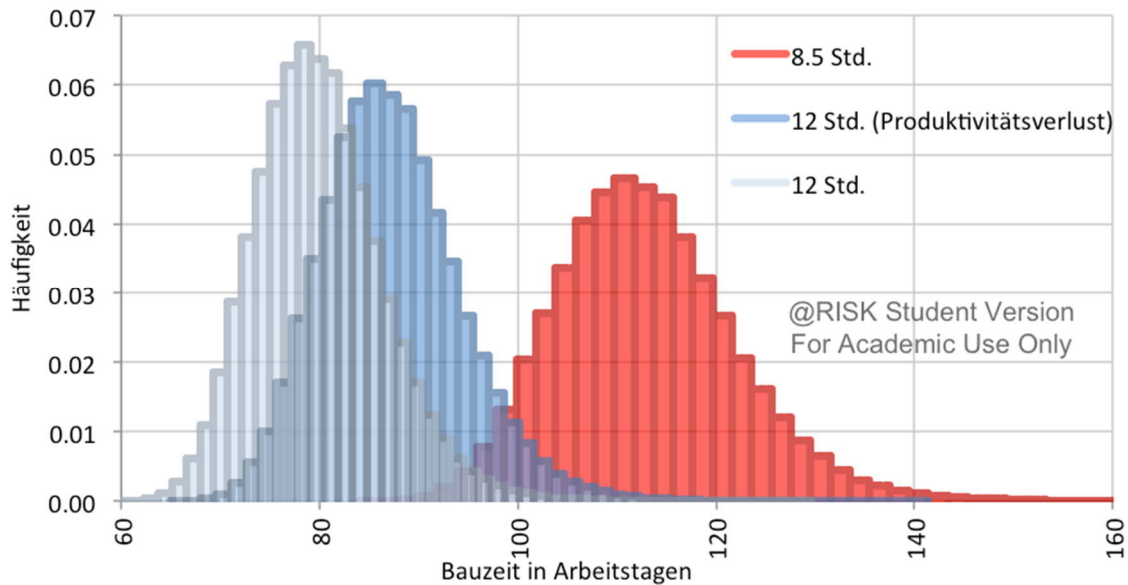


Abbildung 27: Vergleich zwischen der mittels MCS ermittelten Bauzeit für die tägliche Arbeitszeit von 8.5 Std. und 12 Std. sowie mit und ohne Berücksichtigung des Produktivitätsverlustes aufgrund der längeren Arbeitszeit beim letzteren

Wie erwartet ist die Bauzeit mit einer verlängerten täglichen Arbeitszeit kürzer als diejenige der „normalen“ Arbeitszeit. Gleichzeitig ist diese Verkürzung aber aufgrund des Produktivitätsverlust nicht proportional zur Arbeitszeiterhöhung. Dieser Vergleich ist in der Tabelle 17 noch übersichtlicher dargestellt.

Berechnungsvorgang	Bauzeit [Arbeitstage]		
	min.	Erwartungswert	max.
Arbeitszeit 8.5 Stunden	84	113	162
Arbeitszeit 12 Stunden mit Produktivitätsverlust	65	87	141
Arbeitszeit 12 Stunden ohne Produktivitätsverlust	60	80	130

Tabelle 17: Zusammenstellung der minimalen, erwarteten und maximalen Bauzeit für die tägliche Arbeitszeit von 8.5 Std. und 12 Std. sowie mit und ohne Berücksichtigung des Produktivitätsverlustes aufgrund der längeren Arbeitszeit beim letzteren

So entstehen aufgrund der verlängerten täglichen Arbeitszeit von 12 Stunden im Vergleich zu der „normalen“ Arbeitszeit von 8.5 Stunden höhere Kosten, siehe Abbildung 28.

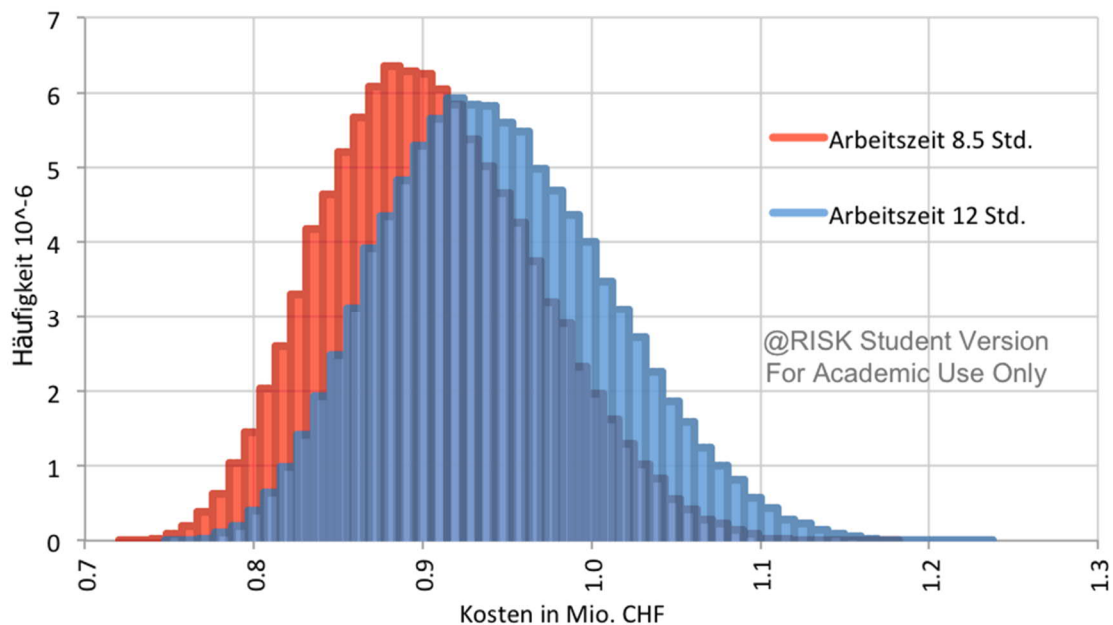


Abbildung 28: Vergleich zwischen den mittels MCS ermittelten Baukosten für die tägliche Arbeitszeit von 8.5 Std. sowie mit Berücksichtigung des Produktivitätsverlustes infolge längerer Arbeitszeit bei 12 Std.

Diese resultieren aus dem höheren Aufwand aufgrund des Produktivitätsverlustes durch die längere Arbeitszeit. Werden die so ermittelten Baukosten unter Berücksichtigung der Bandbreiten der Aufwendungen, der Temperatur sowie einer Zeiteinholung (kürzere Bauzeit) von z.B. 26 Tagen (VaR50) aufgrund eines Planlieferungsverzuges (Flöch, 2009, S. 17) mit den deterministisch ermittelten verglichen, beträgt die Unterschreitungswahrscheinlichkeiten nur 5% (VaR5). Wurde ein VaR80 bzw. VaR90 angestrebt werden, würden die Baukosten ca. 18% bzw. 22% höher ausfallen als die deterministisch ermittelten.

Aus dem Vergleich in Abbildung 28 ist wie schon aus der Umfrage die Tatsache ersichtlich, dass die Baukosten und die Bauzeit miteinander meistens invers verbunden sind. Wird die Bauzeit anstelle mit längeren Arbeitszeiten z.B. mittels einer höheren Anzahl an Arbeitskräften beeinflusst bzw. verkürzt, werden ebenso höhere Kosten anfallen. Diese resultieren bei einer höheren Anzahl an Arbeitskräften aus der Unterschreitung der minimalen Arbeitsfläche.

Wird berücksichtigt, dass eine Vielzahl unterschiedlichster interner und externer Faktoren die Bauzeit beeinflussen, ist ersichtlich, dass eine probabilistische Ermittlung der Bauzeit im Vergleich zu dem deterministischen Vorgehen viel aussagekräftiger und einfach korrekter ist.

4. Schlussbemerkungen

4.1 Fazit

Die mit Unsicherheiten behafteten Baukosten sowie Bauzeitermittlungen mit gleichzeitigen einwirkenden Zusammenhängen werden in der täglichen Praxis meist auf Grundlage von Erfahrungswerten deterministisch ermittelt. Da es sich aber beim Bau, wie schon erwähnt, um eine der risikoreichen Industrien handelt, wurde in dieser Forschungsarbeit versucht bei den Baukosten sowie Bauzeitermittlung probabilistische Ansätze mit Fokus auf der Monte-Carlo-Simulation beizuziehen. Um somit eine mögliche höhere „Kostenwahrheit“ aufzuzeigen. Dazu wurden sowohl deterministische als auch probabilistische Betrachtungen durchgeführt und diese miteinander verglichen.

Aufgrund des grossen Anteils an Gesamtkosten und des zeitlichen Aspektes (lange Dauer) wurde in dieser Arbeit spezifisch in die Stahlbetonarbeiten eingegangen. Andererseits erfolgt die Motivation für die Stahlbetonarbeiten aus der Tatsache, dass bei dieser Thematik somit einerseits für den Bauherren/Investor Kostenbandbreiten bzw. Kostensicherheiten aufgezeigt werden könnten, andererseits aber auch für die Ausführenden/Bauunternehmer aufgrund des anspruchsvollen Umfelds unter einem hohen Wettbewerbsdruck die eingehenden Risiken aufgezeigt werden können. So wurde am Beispiel dieser Arbeit versucht Unsicherheiten zu identifizieren, auszuwerten sowie zu berücksichtigen. Mit diesen Hintergedanken, der Anlehnung an die Aufzuführenden, wurden die Input-Daten auf Grundlage einer Umfrage ermittelt um somit einen möglichen Verlauf des Modelaufbaus darzustellen.

So ist aus der Auswertung der durchgeführten Umfrage deutlich ersichtlich, dass bei einem Vorgehen bei den Experteneinschätzungen beigezogen werden, diese noch mittels Literatur bzw. Datenbanken plausibilisiert werden sollten. In unserem Beispiel ist dies aus der vermutlichen Unterschätzung des Aufwandes für Bewehrungsarbeiten beider Bauelemente Decke und Wand durch die Experten ersichtlich. So liegen deren Einschätzungen bei Betrachtung des erwarteten Wertes (Mittelwert) im Durchschnitt ca. 4-mal tiefer als z.B. diejenigen aus der Datenbank des Schweizerischen Baumeisterverbandes SBV (2020). Andererseits zeigte sich auch, dass Plausibilierungen notwendig sind, da Einschätzungen durch Ankereffekte geleitet werden können und folglich sogar zu Verfälschungen der Einschätzungen führen können. In der durchgeführten Umfrage wurde dies durch die Einschätzung mit und ohne vorgängig vorgeschlagenen möglichen Bandbreiten aus der Literatur am Beispiel des Aufwandes für Schalarbeiten verdeutlicht. Wie erwartet waren im Vergleich die geschätzten

Aufwendungen mit vorgeschlagenen Bandbreiten näher an diesen vorgeschlagenen Werten aus der Literatur (Richtwerten) als diejenigen ohne die angegebenen Vorschläge.

So wurden im ersten Schritt die Baukosten unter Berücksichtigung der durchgeführten Umfragewerte in einer Dreiecksverteilung sowie der PERT-Verteilung probabilistisch sowie deterministisch ermittelt. Die Berechnungen ergaben zweierlei Erkenntnisse. Die probabilistischen Kosten fielen höher aus als diejenigen des deterministischen Vorgehens. Der Grund liegt in der Rechtsverschiebung der Eingabedaten (rechtsschiefe Verteilung). Zudem ergaben sich aufgrund einer höheren Gewichtung der Randwerte bei der Dreiecksverteilung breitere Streuungen der Baukosten.

Werden in der Berechnung noch die nötigen Korrelationen berücksichtigt, so verbreitert sich aufgrund des Addierens und Multiplizierens bei einer positiven Korrelation in der Kostenermittlung die Streuung der Baukosten, was zu einer höheren Standardabweichung, in unserem Fall von ca. 83%, führt.

Da die gewählten Stahlbetonarbeiten wegen der Art der Arbeiten (arbeitsintensiv) zum grössten Teil durch die Produktivität der Arbeitskräfte beeinflusst werden, wurden in dieser Arbeit illustrativ die Produktivitätsverluste infolge Temperatur berücksichtigt. Für den ausgewählten Standort Sargans wurden unter Berücksichtigung der empirisch hergeleiteten Produktivitätsverluste infolge Temperatur nach Hofstadler (2014, S. 435) für die Monate März und Juni die Stahlbetonkosten ermittelt. Der Vergleich zeigte, dass aufgrund der tieferen Temperatur bzw. höchster Differenz zwischen der durchschnittlichen Tagestemperatur und der idealen Arbeitstemperatur im Monat März die Baukosten höher ausfallen als das für den Monat Juni der Fall wäre. Werden diese Baukosten mit denjenigen des deterministischen Vorgangs verglichen, so kann behauptet werden, dass die deterministisch ermittelten Baukosten nur mit einer Wahrscheinlichkeit von 15% (März) und 20% (Juni) unterschritten werden bzw. mit einer Wahrscheinlichkeit von 85% und 80% höher ausfallen werden. Wäre hingegen eine Sicherheit von 80% (Var80) angestrebt, so würden unter Berücksichtigung aller Variablen die Kosten ca. 13% (März) bzw. 12% (Juni) höher ausfallen. Um die Unsicherheiten des Marktes im Modell einzubinden, wurden die Stahlpreisschwankungen mitberücksichtigt. Wie erwartet verbreiterte sich die Streuung der Baukosten aufgrund der Input-Art des Stahlpreises von einem deterministischen Wert in eine mögliche Verteilung (Schwankung).

Wie aus der Literatur ersichtlich und aus der durchgeführten Umfrage offensichtlich besteht ein Zusammenhang zwischen den Baukosten und der Bauzeit. So bewirken bei zu langer Bauzeiten die zeitgebundenen Kosten eine Erhöhung der Baukosten aus. Eine ähnliche, noch extremere Erhöhung der Baukosten bewirken Verkürzungen der Bauzeit. Diese erfolgen bei Verkürzungen aus einer erhöhten (aus)Nutzung der Ressourcen z.B. durch verschiedenste Produktivitätsverluste. Wird hingegen noch die positive Beeinflussung zwischen den Verlusten berücksichtigt, fallen die Kosten noch weit höher aus.

Da zu lange Bauzeiten in der Praxis eher selten vorkommen, wurde die Kostenbeeinflussung durch die Bauzeit am Beispiel der Bauzeitverkürzungen untersucht. Illustrativ wurden Verkürzungen, z.B. wegen Planlieferungsverzuges, der Bauzeit angenommen und die daraus, unter Berücksichtigung des Produktivitätsverlustes infolge längerer Arbeitszeit, resultierenden erhöhten Baukosten ermittelt. Es wurde somit erwiesen, dass sich die Baukosten und die Bauzeit gegenseitig beeinflussen. Wird in unserem Beispiel ein Risikopotential mit einer Sicherheit von 80% angestrebt, so ergibt sich unter Berücksichtigung der längeren täglichen Arbeitszeit und Temperaturbeeinflussung (März) eine Bauzeit von ca. 93 Arbeitstagen. Wird diese mit denjenigen aus den mittels deterministischen Vorgehens ermittelten 98 Arbeitstagen verglichen, ist eine Verkürzung der Bauzeit von 5.3% ersichtlich. Eine Gegenüberstellung dieser Verkürzung von 5.3% mit den Baukosten ergibt eine Kostenerhöhung von ca. 18.5%. Wird hingegen eine Sicherheit von 50% angestrebt, ergeben sich Verkürzungen der Bauzeit von 11% und folglich beträgt die Kostenüberschreitung ca. 11%. Somit ist wie erwartet eine nichtlineare Beeinflussung der Baukosten-Bauzeit ersichtlich. Schlussendlich liegt aber die Entscheidung über das angestrebte Risikopotenzial beim Bauherren/Investor (Sander et al., 2009, S. 4). Im Gegenteil zur deterministischen Ermittlung hat aber dieser bei dem probabilistischen Vorgehen die Möglichkeit sich diese Risiken mit ihren Folgen auch aufzuzeigen.

Dieses aufgezeigte Vorgehen kann grundsätzlich auf die gesamte Bandbreite der Baukosten sowie der Ermittlung der benötigten Zeit (Dauer) verbreitert bzw. generalisiert werden. So können in dem aufgezeigten Beispiel an den Stahlbetonarbeiten noch weitere Produktivitätsverluste (infolge Licht, Arbeitsplatz, Baukräne etc.) und Risikobewältigungsmassnahmen eingebaut/berücksichtigt werden. Darüber hinaus kann die Ermittlung von Baukosten sowie der Dauer mittels Monte-Carlo-Simulation so auf weitere BKP-Positionen, z.B. auf den Tiefbau, Ausbau bis hin zur der Position

Umgebung, verbreitert werden. Oder sogar von der leistungsorientierten Ermittlung auf die in früheren Projektphasen angewendete elementenorientierte Ermittlung. Somit ist eine Verbreiterung in alle einzelnen Phasen wie auch über die Phasengrenzen hinweg möglich. So könnten z.B. auch Bewilligungsrisiken in die Kosten- und Zeitermittlung eingegliedert werden.

4.2 Diskussion

Wie schon aus der deterministischen Betrachtung ersichtlich sind die Ergebnisse auch beim probabilistischen Vorgehen stark von den Eingaben/Eingabedaten abhängig. Die Werte sowie die Formen der Eingabeverteilungen können aufgrund theoretischer Überlegungen, Befragungen oder historischer Daten aufgezeigt/generiert werden. Die Unsicherheit mit denen dieses Vorgehen behaftet ist, ist z.B. aus den grossen Differenzen der Einschätzungen der Aufwendungen aus der Literatur (Anhang 3) wie auch aus den einzelnen Einschätzungen der in dieser Arbeit durchgeführten Umfrage (Anhang 1) ersichtlich. Es ist somit ersichtlich, dass die Daten, die für die Berechnung der Baukosten wie auch der Bauzeit beigezogen werden, plausibilisiert und gegebenenfalls angepasst werden müssen. Es kann vermutet werden, dass grosse Datenbanken z.B. im Zusammenhang mit einzelnen Aufwendungen für Bauprozesse (Schalen, Bewehren etc.) heute nicht vorhanden sind bzw. nicht systematisch erfasst und/oder nicht ausgewertet werden. Es stellt sich an dieser Stelle die Frage, ob die Baubranche die Digitalisierung, die stattfindet, z.B. im Hinblick auf BIM, nutzen und somit vom Potential, welches die Digitalisierung mit sich bringt, profitieren wird.

Ähnlich herausfordernd wie die Generierung der Verteilungen, aber für die Einschätzung um einiges schwieriger, ergeben sich die Ermittlungen der Zusammenhänge zwischen den Eingabegrössen (Korrelationen). Wie aus der Literatur und deren Beispielen ersichtlich werden diese nicht oder mittels pauschaler Werte über alle Variablen angenommen. Gleichzeitig ist aus der Literatur auch eine Tendenz zu positiven Korrelationen erkennbar (Flemming & Netzker & Schöttle, 2011, S. 100), was aber im jedem Fall aufgrund der unterschiedlichsten Risiken je Fall (Projekt) untersucht werden soll. Es kann davon ausgegangen werden, dass die Digitalisierung und die damit verbundene Datenerhebung besonders bei der Ermittlung der Korrelationen den grössten Nutzen mit sich bringt. Dies kann damit begründet werden, dass Korrelationen für Menschen sehr schwer einschätzbar und zum Teil überhaupt nicht erkennbar sind. Mit einer grossen Datenbank können diese aber mittels statistischer Vorgehen ermittelt werden.

Dies führt zu dem in der Literatur meist schon genannten Nachteil des probabilistischen Vorgehens, somit auch bei der Monte-Carlo-Simulation, den mangelnden Kenntnissen der Statistik sowie zu der daraus folgenden kritischen Betrachtung des probabilistischen Vorgehens der Praxis. Dies beruht zum Teil auf der relativ statischen Blickweise der Baubranche, die genau wie die Statik auf die exakte Berechnung der daraus resultierenden exakten Zahl fokussiert ist. Wie daraus ersichtlich, ist aber leider die Baukosten- sowie die Bauzeitermittlung keine exakte Vorgehensweise mit einem exakten Resultat. Stattdessen ist sie mit (nicht)linearen Unsicherheiten, Zusammenhängen etc. behaftet. Wird versucht die statische Blickweise der Baubranche, z.B. bei den Bauingenieuren, zu begründen, so ist schnell ersichtlich, dass diese aufgrund der Ausbildung auf das deterministische Vorgehen fokussiert sind und folglich ebenso mangelnde Statistikkenntnisse aufweisen. Andererseits ist aber auch bei Bauingenieuren aufgrund verschiedenster neuer Vorgehensweisen, z.B. aufgrund aussergewöhnlicher Natureinwirkungen (z.B. Erdbeben), sowie neuer Herausforderungen, z.B. grosser Sanierungsbedarf der Kunstbauten/Infrastruktur, eine Affinität für die Probabilistik erkennbar.

Aus dieser Forschungsarbeit ist ersichtlich, dass die Ergebnisse der Baukosten sowie der Baukostenermittlung mittels Monte-Carlo-Simulation im Vergleich zum deterministischen Vorgehen realistischer und aussagekräftiger sind. So resultiert aus der Ermittlung nicht nur eine einzelne Zahl, sondern eine Bandbreite der Kosten/Dauer, bei der so die Kosten wie auch das Risiko auslesbar sind. Wird die Berechnung mittels des Programmes @Risk durchgeführt, so können noch weitere hilfreiche Ergebnisse, wie z.B. Auswertung der Variable mit dem höchsten Einfluss, dargestellt werden.

Allgemein ist aus dieser Arbeit ersichtlich, dass z.B. mittels des Programmes @Risk in der äusserst verbreiteten MC Excel-Umgebung eine Monte-Carlo-Simulation auch in der Praxis durchführbar ist. Es ist klar, dass die Komplexität dieses Vorgehens im Vergleich zum klassischen deterministischen viel höher ist, trotz allem ermöglicht dem Anwender aber z.B. @Risk verschiedene Hilfen im Hinblick auf den Input. Wie auch im Beispiel angewendet, können Datensammlungen automatisch in verschiedenen Verteilungsformen hinterlegt werden und der Anwender hat freie Wahl diese seinerseits bestbeschriebene zu wählen.

Auch wenn die Ermittlungen der Baukosten/Bauzeit mit einer unendlichen Vielzahl von Variablen behaftet sind, können z.B. die Einflussreichen mittels einer Sensitivitätsanalyse herausgehoben werden, andererseits können aber in der Praxis auch

die Ermittler aufgrund ihrer Erfahrung die einflussreichen Variablen einschätzen. Des Weiteren können für Risikoposten z.B. in frühen Projektphasen auch Experteneinschätzungen eingeholt werden und so mit kontinuierlichen bzw. diskreten Verteilungen hinterlegt werden. Im gesamten Prozess muss daher hohe Aufmerksamkeit der Kommunikation, zwischen allen Parteien sowie einem reibungslosen Informationsfluss gewidmet werden.

Schlussendlich profitiert die Praxis bei einer täglichen Anwendung von der Ermittlung mittels der Monte-Carlo-Simulation, auch wenn nicht alle Variablen berücksichtigt werden und mathematisch gesehen Vereinfachungen angenommen werden, so ergeben sich im Hinblick auf die Genauigkeit trotz allem im Vergleich zum deterministischen Vorgehen viele aussagekräftige Resultate. Diese dienen so beiden Parteien - den Investoren und den Ausführenden - so bezüglich der Kostenübersicht wie des eingegangenen Risikos. Daraus folgen realistischere Budgets sowie wettbewerbsfähigere Angebote.

4.3 Ausblick

Damit die Monte-Carlo-Simulation in der Praxis der Baukosten/Bauzeit-Ermittlung auch zur Anwendung kommt, muss diese erst dafür sensibilisiert werden. Die schon erwähnten statistischen Lücken sowie die Abneigung der Praxis zu einer komplexen Monte-Carlo-Simulation könnte in der Praxis auch mittels Trainingsprogramme angegangen werden (Avlijaš, 2018, S. 10). Mit einer Ausbreitung dieses Vorgehens in der Praxis können aufgrund verschiedenster Variationen der Bauprojekte Lücken erkannt und mittels neuer Forschung weiterentwickelt werden. Im Hinblick auf die Stahlbetonarbeiten besteht aber noch Forschungsbedarf bei den Korrelationskoeffizienten.

Diese Lücken könnten vermutlich mit einer Ausbreitung der Ermittlung mittels Monte-Carlo-Simulation in der Praxis effizienter angegangen werden. Die in der Praxis immer mehr spürbare Digitalisierung könnte dafür die entsprechende Datenbasis liefern.

Gleichzeitig könnten mittels der Monte-Carlo-Simulation in das Vorgehen der Ermittlung der Baukosten und eventuell noch bedeutender - im Hinblick auf die Vielzahl möglicher Bewältigungsvorgehen bei Bauverzögerungen der Bauzeit - Optimierungsprozesse in der Operative integriert werden.

Ähnlich den operativen Optimierungen könnten aber auch Optimierungen z.B. im Nachhaltigkeitsbereich (Marzouk, Azab & Metawie, 2018, S. 225) sowie Möglichkeiten

der zukünftigen Optionen, z.B. im Hinblick auf die Architektur und folglich der Nutzung, offengehalten werden. Diese letztere flexiblere Entscheidungsbetrachtung kann, wenn die Unsicherheiten diesbezüglich hoch sind, zu einer Maximierung der Nutzung und folglich aller damit verbundener Parameter führen. Dies gilt sowohl für Infrastrukturbauten sowie für den Hochbau. Für einen vertieften Einblick in diese Thematik kann auf Esders (2017) verwiesen werden.

Wie auch in dieser Arbeit erwiesen, sind Kosten und Zeit miteinander verbunden, es darf aber nicht vergessen werden, dass eine effiziente Kostensteuerung einen Kräfte-Dreieck bildet in dem neben den erwähnten Kosten und der Zeit noch die Qualität eine wesentliche Rolle spielt. So könnten aus der Qualität des Bauens wie der Einbauten die daraus folgenden Betriebskosten sowie die Sanierungskosten (Chou, 2010, S. 716) in die Ermittlung integriert und berücksichtigt werden. Dies würde zur einer gesamtheitlichen lebenszyklischen Betrachtung der Kosten führen und somit einen wesentlichen Beitrag und Mehrwert in allen Aspekten des Immobilienbereiches schaffen.

Literaturverzeichnis

- Agrometeo (2020). Wetterdaten. Gefunden unter <http://www.agrometeo.ch/de/meteorology/datas>.
- Avlijaš, G. (2018). Examining the Value of Monte Carlo Simulation for Project Time Management. *Management: Journal Of Sustainable Business And Management Solutions In Emerging Economies*. 24 (1), 11-23.
- Baccarini, D. (2005, 4-5 Juli). *Understanding project cost contingency- A survey*. Präsentation anlässlich der Proceedings of the Queensland University of Technology Research Week 2005. Brisbane.
- Bouayed, Z. (2016). Using Monte Carlo simulation to mitigate the risk of project cost overruns. *Int. J. of Safety and Security Eng.*. 6 (2), 293–300.
- Bundesamt für Statistik BFS (2019). *Schweizerischer Baupreisindex - Entwicklung der Baupreise Detaillierte Ergebnisse*. Gefunden unter <https://www.bfs.admin.ch/bfs/de/home/statistiken/preise/baupreise/baupreisindex.as.setdetail.11368845.html>.
- Bundesamt für Statistik BFS (2020). *KBOB, Preisänderungen im Bauwesen*. Gefunden unter <https://www.bfs.admin.ch/asset/de/su-d-05.04-kbob-01>.
- Büchel F. & Dietrich W. (2010). *Taschenbuch für Bauführer und Poliere. Hoch- Tief- und Verkehrswegebau*. 25. Auflage. Olten: Baukader Schweiz.
- Chau, K. W. (1995). Monte Carlo simulation of construction cost using subjective data. *Construction Management and Economics*. 13 (5), 369-383.
- Choudhry, R. M., Rafiq, S., Ahmed, A. & Ahmed, T. (2018, 10-12. Juni). *Estimating Probabilistic Cost and Time Contingency for Residential Building Projects*. Präsentation anlässlich der 3. Internationalen Konferenz „Civil, Structural and Transportation Engineering (ICCSTE'18)“, Niagara Falls.
- Chou, J., S., (2010) Cost simulation in an item-based project involving construction engineering and management. *International Journal of Project Management*. 2011 (29) 706–717.
- Esders, M., C. (2017). *Consideration of Uncertain Future Demand and Decision Flexibility in the Determination of Intervention Programs for Buildings*. (Dissertation). Zürich: Institute of Construction and Infrastructure Management (IBI).
- Fleischmann, H. D. (1999). *Angebotskalkulation mit Richtwerten*. Düsseldorf: Werner Verlag.

- Flemming, C., Netzker, M. & Schöttle, A. (2011). Probabilistische Berücksichtigung von Kosten und Mengenrisiken in der Angebotskalkulation. *Bautechnik*. 2011 (88/2), 94-101.
- Hoffmann, F. (1997). *Aufwand und Kosten zeitgemässer Schalverfahren*. Frankfurt: Zeittechnik Verlag.
- Hoffmann, M. & Kremer P. (1996). *Zahlentafeln für den Baubetrieb*. 4 Auflage. Stuttgart: Teubner.
- Hofstadler, C. (2008). *Scholarbeiten. Technologische Grundlagen, Sichtbeton, Systemauswahl, Ablaufplanung, Logistik und Kalkulation*. Berlin Heidelberg: Springer.
- Hofstadler, C. (2014). *Produktivität im Baubetrieb. Bauablaufstörungen und Produktivitätsverlust*. Berlin Heidelberg: Springer.
- Kattenbusch, M. & Kuhne, V. (2002). Nachtragsbearbeitung in Bauunternehmen. *Bau- markt und Bauwirtschaft*. 2002 (04), 42-43.
- Kostka, G. (2015). *Studie: Grossprojekte in Deutschland – Zwischen Ambition und Realität*. Fact sheet 1. Hertie School of Governance GmbH.
- Kummer, M. (2015). *Aggregierte Berücksichtigung von Produktivitätsverlusten bei der Ermittlung von Baukosten und Bauzeiten. Deterministische und probabilistische Betrachtungen*. (Dissertation). Graz: Institut für Baubetrieb und Bauwirtschaft.
- Kummer., M. (2017, 1. Juli). *Calculation of the labor consumption rate for shuttering works whilst considering uncertainties*. Präsentation anlässlich der 9. International Structural Engineering and Construction Conference. Valencia.
- Lechner, H. (2007, 17. April). *Vergleichende Beurteilung von (Bau-) Kostenaussagen in frühen Planungsphasen*. Präsentation Institut für Baubetrieb und Bauwirtschaft der Technischen Universität Graz, Graz.
- Lederer, S. (1982). *Die Mittelbereitstellung für Bauleistungen unter Berücksichtigung der Unsicherheiten in der Planung*. (Dissertation). Münschen: Institut für Bauingenieurwesen IV Tunnelbau und Baubetriebslehre der Technischen Universität München.
- Levsen, P. (1981). *Kalkulationstabellen Hoch- und Ingenieurbau*. Berlin: Schniele und Schön.
- Maier, E. (1984). *Zeitaufwandtafeln*. Wiesbaden: Bauverlag.
- Marzouk, M., Azab, S. & Metawie, M. (2018). BIM-based approach for optimizing life cycle costs of sustainable buildings. *Journal of Cleaner Production*. 2018 (118), 217-226.

- Para-González, L., Mascaraque-Ramírez, C. & Madrid, A. E. (2018). Obtaining the budget contingency reserve through the monte carlo methode: study of a ferry construction project. *Blodograndja*. 2018 (69/3), 79-95.
- Pant, D. & Srinivas, K. (2019). Cost Estimation of Construction Project Using Monte Carlo Simulation. *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR-JMCE)*. 2019 (16/2), 13-19.
- Platz, H. (1982). Tabellen für Aufwand und Preise. In A., Schub & G., Meyran, (Hrsg.). *Praxis-Kompndium Baubetrieb*. Wiesbaden: Bauverlag.
- Plümecke, K. (1995). *Preisermittlung für Bauarbeiten*. Köln: Rudolf Müller Verlag.
- Raftery, J. (1999), *Risk Analysis – In Project Management*. London: E & FN Spon, an Imprint of Routledge.
- Sander, P. (2012). *Probabilistische Risiko-Analyse für Bauprojekte – Entwicklung eines branchenorientierten softwaregestützten Risiko-Analyse-Systems*. (Dissertation). Innsbruck: Fakultät für Bauingenieurwissenschaften der Leopold-Franzens-Universität Innsbruck.
- Sander, P., Spiegl, M. & Schreider, E. (2009). Probabilistische Kosten und Risiko-Analyse für grosse Bauprojekte. In *Festschrift TU Graz zum 40-Jahr-Jubiläum des Instituts für Baubetriebs und Bauwirtschaft* (S. 507-518). Graz: Verlag der TU Graz.
- Schach, R. (2005). Stochastische Investitionskostenberechnung für Verkehrsinfrastrukturprojekte. In R., Schach & J., Otto (Hrsg.). *Tagungsband zur 5. Dresdner Fachtagung Transrapid am 29.09.2005* (S. 107-125). Dresden: Verlag der Technischen Universität Dresden.
- Schweizerischer Baumeisterverband SBV (2020). *Technik & Betriebswirtschaft*. Daten unter <https://www.tb-viewer.ch> [abgerufen am 29.06.2020].
- Traynor, B. A. & Mahmoodian M. (2019). Time and cost contingency management using Monte Carlo simulation. *Australian journal of civil engineering*. 17 (1), 11–18.
- Touran, A. (2006). Owners risk reduction techniques using a CM. CMAA Research Report, *Construction Management Association of America*, Virginia.
- Urschel, O. (2009). *Risikomanagement in der Immobilienwirtschaft. Ein Beitrag zur Verbesserung der Risikoanalyse und –bewertung*. (Dissertation). Karlsruhe: KIT Scientific Publishing.
- Vanhoucke, M. (2013). An overview of recent research results and future research avenues using simulation studies in project management. *ISRN Computational Mathematics*. 2013, 1-19.

Wirth, A. (2012). Das Problem der Nachträge besteht weiter. In *Jahrbuch Baurecht* 2002 (S. 87-105). 5. Jahrgang. Düsseldorf : Werner Verlag.

Xenidis, Y. & Stavrakas E. (2013). Risk Based Budgeting of Infrastructure Projects. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*. 2013 (74), 478 – 487.

Anhang

Anhang 1: Umfrage – Aufwendungen

Anhang 2: Umfrage - Bewehrungsgehalt

Anhang 3: Aufwendungen aus der Literatur

Anhang 1: Umfrage - Aufwendungen

Für die Bestimmung der benötigten Aufwendungen für die Schalung, Bewehrung und Betonarbeiten wurde folgende online Umfrage im Juni 2020 durchgeführt:

Qualtrics Survey Software

01.06.20, 10:48



Einführung

Expertenbefragung

Vielen Dank für Ihre Teilnahme an der Umfrage bezüglich der Zeitabschätzung für Betonarbeiten (Schalung, Bewehrung, Beton).

Die Beantwortung der Fragen dauert ca. 10 min und unterstützt mich bei meiner Abschlussarbeit "Verwendung von mathematischen Simulationen bei der Kosten und Zeit Ermittlung".

Alle Daten werden nur anonymisiert für Forschungszwecke ausgewertet.

Bei Fragen können Sie mich unter der am Ende der Umfrage angegebenen Mailadresse kontaktieren.

Bitte geben Sie Ihre Beruf an:

Wie viele Jahre Berufserfahrung haben Sie im oben genannten Beruf:

Aufwandschätzung Schararbeiten

Bitte beantworten Sie die Fragen basierend auf Ihren Erfahrungswerten und geben Sie Durchschnittswerte an. Es sollen alle Arbeiten berücksichtigt werden, z.B. Schararbeiten (Schalung, Spriessung, Abschalung...). Es sollen drei Werte geschätzt werden: der Minimalwert, wenn alles sehr gut läuft, der Normalfall (Mittelwert) und der Maximalwert, wenn die Komplexität steigt und evtl. etwas schief läuft. Gehen Sie bitte von einer Schalung Typ 2 aus.

Welchen Zeitaufwand schätzen Sie für die Schararbeiten für Decken?

Stunden/m² Minimal

Stunden/m²
Normalfall (Mittelwert)

Stunden/m² Maximal

Welchen Zeitaufwand schätzen Sie für die Schararbeiten für Wände?



Stunden/m² Minimal

Stunden/m²
Normalfall (Mittelwert)

Stunden/m² Maximal

Welche der zwei Verteilungsformen wäre ihrer Meinung nach die angemessenste,

um die Aufwandsschätzung für die Schalarbeiten zu beschreiben? Sind die oben angegebenen Extremwerte (minimal und maximal) wahrscheinlich oder unwahrscheinlich?

- Wahrscheinlicher 
- Unwahrscheinlicher 

Block 5

An diesem Punkt werden die gleichen Fragen gestellt wie schon im ersten Abschnitt, aber hier mit den Leistungswerten aus dem Taschenbuch der Bauführer. Bitte schätzen Sie den Zeitaufwand nochmals

Welchen Zeitaufwand schätzen Sie für die Schalarbeiten für Decken?
Gemäss Taschenbuch beträgt dieser zwischen 0.60 St./m² und 0.90 St./m².

Stunden/m² Minimal

Stunden/m²
Normalfall (Mittelwert)

Stunden/m² Maximal

Welchen Zeitaufwand schätzen Sie für die Schalarbeiten für Wände?
Gemäss Taschenbuch beträgt diese zwischen 0.65 St./m² und 0.90 St./m².

Stunden/m² Minimal

Stunden/m²

Normalfall (Mittelwert)

Stunden/m² Maximal

Aufwandsschätzung Eisenlegen

Folgend die Fragen bezüglich der Aufwandsschätzung für die Bewehrungsarbeiten.
Es ist wie bei den Schalarbeiten der gesamte Aufwand zu betrachten.

Welchen Zeitaufwand schätzen Sie für die Eisenlegung für Decken? Die Angabe ist in
Stunden pro Tonne Bewehrung.

Stunden / t Minimal

Stunden / t

Normalfall (Mittelwert)

Stunden / t Maximal

Welchen Zeitaufwand schätzen Sie für die Eisenlesung für Wände? Die Angabe ist in
Stunden pro Tonne Bewehrung.

Stunden / t Minimal

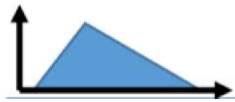
Stunden / t

Normalfall (Mittelwert)

Stunden / t Maximal

Welche der zwei Verteilungsformen wäre ihrer Meinung nach die angemessenste, um die Aufwandsschätzung für Bewehrungsarbeiten zu beschreiben? Sind die oben angegeben Extremwerte (minimal und maximal) wahrscheinlich oder unwahrscheinlich?

Wahrscheinlicher



Unwahrscheinlicher



Aufwandsschätzung Betonarbeiten

In diesen Abschnitt wenden wir uns dem Betonieren zu. Alle Angabe sind in Stunden pro Kubikmeter Beton einzugeben. Gehen sie bei der minimalen Angabe von einer eher starken Decke/Wand bzw. im Maximalfall von einer dünnen Decke/Wand aus.

Welchen Zeitaufwand schätzen Sie für das Betonieren der Decken?

Stunden/m³ Minimal

Stunden/m³

Normalfall (Mittelwert)

Stunden/m³ Maximal

Welchen Zeitaufwand schätzen Sie für das Betonieren der Wände?

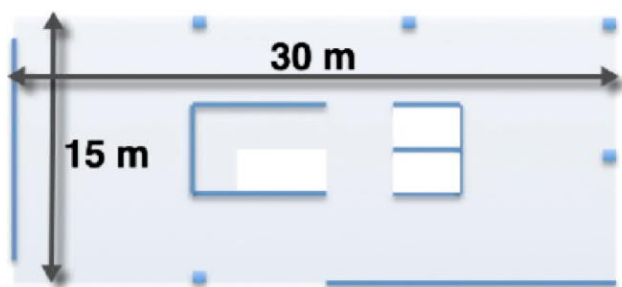
Stunden/m³ Minimal

Stunden/m³
Normalfall (Mittelwert)

Stunden/m³ Maximal

Fragen

Beispiel Objekt mit einer Grundrissfläche von 15m x 30 m und 5 Geschossen. Die Decken und Wände werden in Beton ausgeführt.



Wie viele Arbeitskräfte würden Sie Ihrer auf Grund Ihrer Erfahrung in der abgebildeten Situation einsetzen?



0

10

20

30

40

Qualtrics Survey Software

01.06.20, 10:48

Schalarbeiten	<input type="radio"/>	<input type="text"/>
Einsanlegung	<input checked="" type="radio"/>	<input type="text"/>
Betonierung	<input type="radio"/>	<input type="text"/>

Wie würden Sie vorgehen wenn Sie eine Zeitplan (Bauprogram) nicht einhalten können bzw. wie würden Sie probieren die Zeit wieder aufholen?

Powered by Qualtrics

Auswertung der durchgeführten Umfrage:

Massnahmen ³		A,Z	Z	Z	A,Z		Z		A	A, I														
Kosten und Dauer verbunden		ja	ja	ja	ja		ja		ja	ja														
Anzahl Arbeits- kräfte	Betonieren			6	4	4		4		6	5													
	Bewehren		6	8	4	4		4		5	3													
	Schalen		4	6	4	7		5		4	4													
Geschätzte Aufwendungen												Betonieren	Wände	max.	0.65	2.50	1.33	0.60		0.40		0.70	1.25	
														Ø	0.50	1.50	0.59	0.50		0.30		0.50	0.57	
														min.	0.25	0.75	0.30	0.40		0.20		0.50	0.44	
													Decke	max.	0.45	2.00	0.27	0.50		0.20		0.35	1.0	
														Ø	0.25	1.00	0.23	0.40		0.12		0.25	0.42	
														min.	0.10	0.50	0.20	0.30		0.10		0.20	0.24	
												Bewehrung	Verteilung ¹		D	P	D	D		P		D	P	
													Wände	max.	1.50	12	18	5		5.00		5.5	0.3	
														Ø	1.25	10	10	4		4.00		4.5	0.24	
														min.	1.00	8	9	3		3.50		3.5	0.02	
													Decke	max.	1.25	20	9	4		3.50		5	0.25	
														Ø	1.00	15	6	3		2.00		4	0.20	
												min.		0.85	10	4	2		1.00		3	0.03		
												Schalen mit Anregung ²	Wände	max.	0.9	1.25	0.90	0.50	0.63	1.50		0.75	1.00	
														Ø	0.75	1.00	0.60	0.40	0.10	1.00		0.70	0.33	
														min.	0.55	0.60	0.50	0.30	0.08	0.50		0.65	0.25	
													Decke	max.	0.75	2.00	0.80	0.40	0.14	1.50		0.70	1.00	
														Ø	0.60	1.00	0.50	0.30	0.10	1.00		0.65	0.35	
														min.	0.45	0.50	0.40	0.20	0.08	0.50		0.60	0.25	
												Schalen	Verteilung ¹		D	P	D	P	D	D			P	P
													Wände	max.	0.13	1.25	0.49	0.70	0.63	1.50		0.40	0.5	1.50
														Ø	0.09	0.75	0.42	0.50	0.10	1.00		0.35	0.33	1.00
														min.	0.07	0.60	0.35	0.30	0.08	0.50		0.30	0.22	0.50
													Decke	max.	0.40	2.00	0.40	0.40	0.14	1.50	0.08	0.40	0.5	1.50
Ø	0.29	1.00	0.24	0.30	0.10	1.00	0.04	0.33	0.35	1.00														
min.	0.20	0.50	0.16	0.20	0.08	0.50	0.02	0.25	0.25	0.50														
Schätzung		Jahre Berufserfahrung		10	35	30	27	18	11	30	4	4	12											
		Beruf		Maurer	Bauing.	Bauing.	Maurer	Fachbauarb.	Bauleiter	Bauing.	Bauführer	Kalkulator	Bauleiter											
		Datum		09.06.20	10.06.20	11.06.20	11.06.20	16.06.20	17.06.20	17.06.20	18.06.20	18.06.20	24.06.20											
		Nr.		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10											

Tabelle 18: Ergebnisse der Umfrage, Teil 1/2

Massnahmen ³		A	Z			A	6/10 A; 6/10 Z; 1/10 I				
Kosten und Dauer verbunden		ja	ja	ja	ja	ja	100% ja				
Anzahl Arbeits- kräfte	Betonieren	3	4	4	3	6	4.45	4.00			
	Bewehren	3	5	4	3	8	4.83	4.00			
	Schalen	4	5	5	6	12	5.50	5.00			
Geschätzte Aufwendungen		Betonieren	Wände	max.	0.25	0.70	1.20	0.10	1.30	0.92	0.70
				Ø	0.20	0.50	0.80	0.10	1.20	0.61	0.50
				min.	0.15	0.30	0.50	0.10	1.10	0.42	0.37
			Decke	max.	0.20	0.50	0.40	0.10	1.20	0.60	0.43
				Ø	0.15	0.30	0.30	0.10	1.00	0.38	0.28
				min.	0.10	0.10	0.25	0.10	0.8	0.25	0.20
		Bewehrung	Verteilung ¹		P	D	P	D	55% D und 45% P		
			Wände	max.	2.00	7	30	5		8.30	5.00
				Ø	1.50	4	25	5		6.32	4.00
				min.	1.00	2	22	5		5.27	3.50
			Decke	max.	2.00	7	25	5		7.45	5.00
				Ø	1.50	5	22	5		5.88	4.00
		min.		1.00	3	20	5		4.53	3.00	
		Schalen mit Anregung ²	Wände	max.	0.80	1.00	0.40	0.65	1.20	0.88	0.90
				Ø	0.60	0.50	0.30	0.65	0.90	0.60	0.60
				min.	0.50	0.33	0.25	0.65	0.60	0.44	0.50
			Decke	max.	0.80	1.00	0.40	0.60	1.10	0.86	0.80
				Ø	0.70	0.50	0.30	0.60	0.90	0.58	0.60
min.	0.60			0.33	0.25	0.60	0.60	0.41	0.45		
Schalen	Verteilung ¹		D	P	P	D	D	54% D und 46% P			
	Wände	max.	0.80	0.50	0.30	0.20	1.20	0.72	0.56		
		Ø	0.70	0.25	0.25	0.20	0.90	0.49	0.39		
		min.	0.60	0.17	0.20	0.20	0.60	0.33	0.30		
	Decke	max.	1.00	0.50	0.30	0.20	1.50	0.72	0.40		
		Ø	0.70	0.25	0.25	0.20	1.30	0.49	0.30		
min.		0.50	0.17	0.20	0.20	1.10	0.32	0.20			
Schätzung		Jahre Berufserfahrung	20	7	7	6	38	17.3	12		
		Beruf	Kranfahrer	Projektleiter	Bauführer	Bauleiter	Projektleiter				
		Datum	24.06.20	24.06.20	29.06.20	30.06.20					
		Nr.	11	12	13	14	15				
			arithmetisches Mittel								
			Median								

¹Verteilungen:

D – Dreiecksverteilung

P – PERT-Verteilung

² Richtwerte gem. Taschenbuch für Bauführer (2010)

³ Massnahmen bei Bauverzögerungen:

A – Erhöhung der Anzahl Arbeitskräfte

Z - Arbeitszeiterhöhung

I – zusätzliche Installationen (Geräte)

Tabelle 19: Ergebnisse der Umfrage, Teil 2/2

Grafische Auswertung der Ergebnisse:

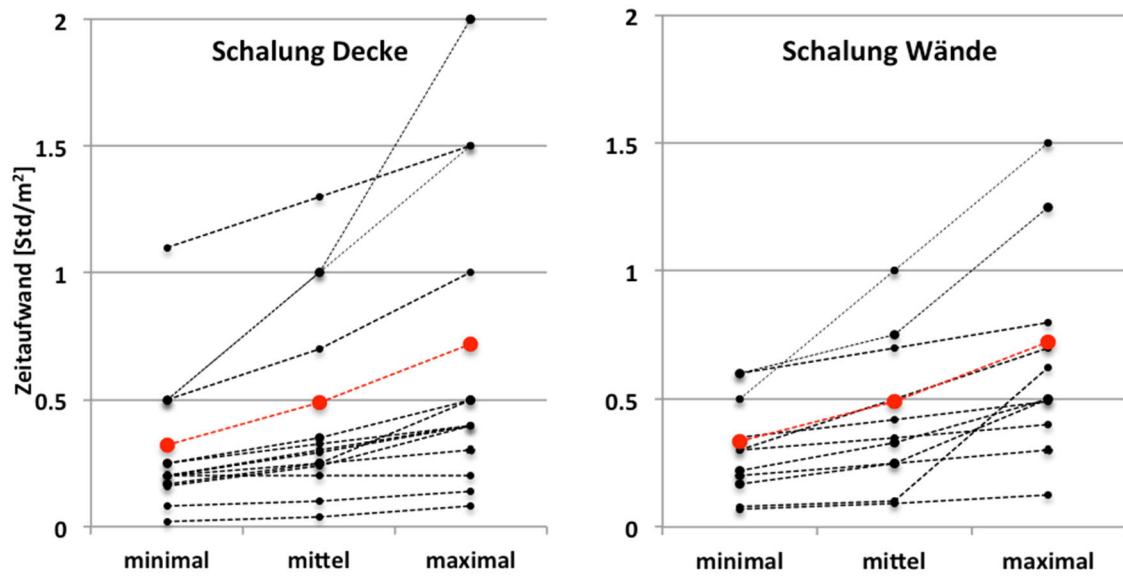


Abbildung 29: Grafische Auswertung aller Aufwendungsschätzungen bezüglich Schalarbeiten bei Decken (links) und Wänden (rechts) aus der durchgeführten Umfrage sowie das daraus resultierende arithmetische Mittel des Aufwandes

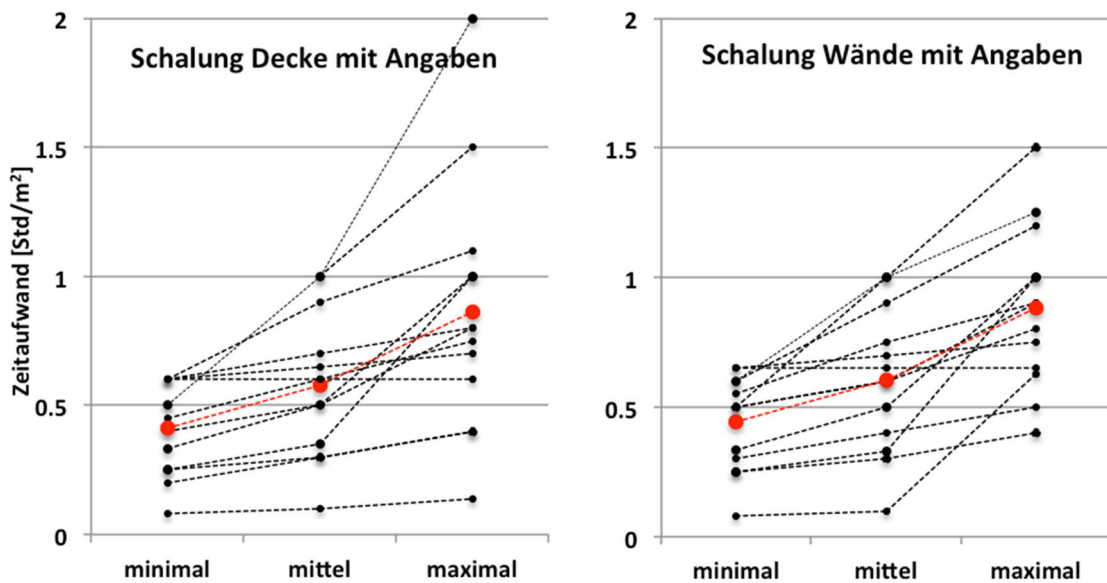


Abbildung 30: Grafische Auswertung aller Aufwendungsschätzungen bezüglich Schalarbeiten bei Decken (links) und Wänden (rechts) aus der durchgeführten Umfrage mit Angaben (Richtwerten) sowie das daraus resultierende arithmetische Mittel des Aufwandes

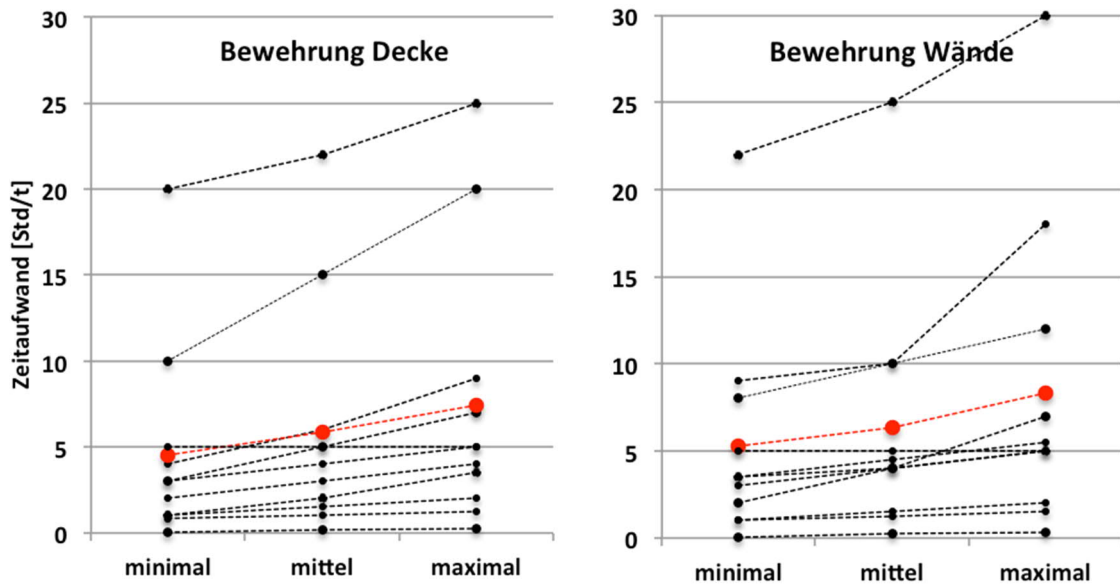


Abbildung 31: Grafische Auswertung aller Aufwendungsschätzungen bezüglich Bewehrungsarbeiten bei Decken (links) und Wänden (rechts) aus der durchgeführten Umfrage mit sowie das daraus resultierende arithmetische Mittel des Aufwandes

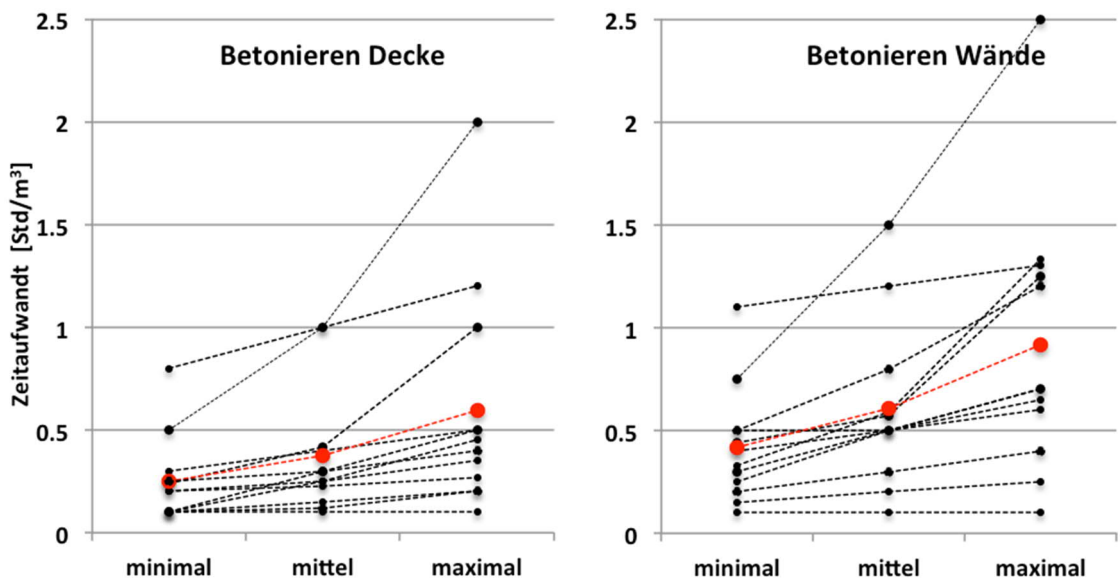


Abbildung 32: Grafische Auswertung aller Aufwendungsschätzungen bezüglich Betonierarbeiten bei Decken (links) und Wänden (rechts) aus der durchgeführten Umfrage mit sowie das daraus resultierende arithmetische Mittel des Aufwandes

Anhang 2: Umfrage - Bewehrungsgehalt

Für die Bestimmung des erforderlichen Bewehrungsgehaltes wurde in dieser Arbeit eine Schätzung durchgeführt. 9 Bauingenieure mit einer durchschnittlichen Berufserfahrung von ca. 19 Jahren wurden in Juni 2020 nach dem minimalen durchschnittlichen und maximalen Bewehrungsgehalt für Wände sowie Deckenelemente befragt. Die Ergebnisse der Schätzungen sind in der unteren Tabelle 20 zusammengefasst.

Jahre Berufserfahrung	Bewehrungsgehalt [kg/m ³]					
	Decken			Wände		
	min.	Ø	max.	min.	Ø	max.
7	80	85	90	90	95	100
30	100	125	150	120	160	200
12	90	110	150	90	110	150
34	100	115	130	80	100	130
17	100	110	140	80	90	140
15	75	80	110	78	90	110
30	100	110	140	100	110	120
17	90	100	110	115	120	125
9	100	125	170	95	105	120
Arithmetisches Mittel	93	107	132	94	109	133

Tabelle 20: Ergebnisse der Schätzung in Bezug auf das erforderliche Bewehrungsgehalt für die Decken sowie Wände

Anhang 3: Aufwendungen aus der Literatur

Um einen Vergleich zwischen verschiedenen Autoren aus der deutschsprachigen Literatur für Aufwendungen bei Stahlbetonarbeiten darzustellen, wurde in den folgenden Tabelle 21 bis Tabelle 26 eine Auswahl zusammengefasst. Aus dem Vergleich ist ersichtlich, dass die Aufwendungen verschiedener Autoren extrem hohe Differenzen aufweisen. Dies bestätigt nochmals die Bedeutung einer Plausibilisierung der Input-Daten vor der Durchführung einer Berechnung/Ermittlung.

Aufwendungen für Schalarbeiten bei Decken [Std/m²]			
Autor	minimal	Durchschnitt	maximal
Fleischmann (1999)	1.00	1.25	1.50
Hoffmann und Kremer (1996)	0.80	0.90	1.00
Hoffmann (1997)	0.40	0.68	0.95
Levsen (1981)	1.00	1.70	2.40
Meier (1984)	0.80	0.86	0.92
Platz (1982)	0.60	1.45	2.30
Plümecke (1995)	0.65	0.68	0.70

Tabelle 21: Aufwendungen für Schalarbeiten bei Decken [Std/m²], Auswahl deutschsprachiger Literatur

Aufwendungen für Schalarbeiten bei Wänden [Std/m²]			
Autor	minimal	Durchschnitt	maximal
Fleischmann (1999)	1.20	1.30	1.40
Hoffmann und Kremer (1996)	0.70	1.15	1.60
Hoffmann(1997)	0.65	0.98	1.30
Levsen (1981)	0.70	1.25	1.80
Meier (1984)	1.13	1.55	1.96
Platz (1982)	0.75	1.73	2.70
Plümecke (1995)	0.51	0.91	1.30

Tabelle 22: Aufwendungen für Schalarbeiten bei Wänden [Std/m²], Auswahl deutschsprachiger Literatur

Aufwendungen für Bewehrungsarbeiten bei Decken [Std/t]			
Autor	minimal	Durchschnitt	maximal
Hoffmann und Kremer (1996)	12.00	22.50	33.00
Levsen (1981)	12.00	27.00	42.00
Meier (1984)	16.00	28.98	41.95
Platz (1982)	9.00	23.50	38.00
Plümecke (1995)	9.00	25.50	42.00

Tabelle 23: Aufwendungen für Bewehrungsarbeiten bei Decken [Std/t], Auswahl deutschsprachiger Literatur

Aufwendungen für Bewehrungsarbeiten bei Wänden [Std/t]			
Autor	minimal	Durchschnitt	maximal
Fleischmann (1999)	16.00	26.00	36.00
Hoffmann und Kremer (1996)	13.00	22.75	32.50
Levsen (1981)	19.00	34.18	49.35
Meier (1984)	17.00	31.50	46.00
Platz (1982)	10.50	28.25	46.00
Plümecke (1995)	10.00	26.00	42.00
Hoffmann und Kremer (1996)	16.00	26.00	36.00

Tabelle 24: Aufwendungen für Bewehrungsarbeiten bei Wänden [Std/t], Auswahl deutschsprachiger Literatur

Aufwendungen für Betonarbeiten bei Decken [Std/m³]			
Autor	minimal	Durchschnitt	maximal
Fleischmann (1999)	1.20	1.35	1.50
Hoffmann und Kremer (1996)	0.30	0.55	0.80
Levsen (1981)	2.05	3.73	5.40
Meier (1984)	1.00	1.68	2.35
Platz (1982)	0.70	2.00	3.30
Plümecke (1995)	0.37	0.89	1.40

Tabelle 25: Aufwendungen für Betonarbeiten bei Decken [Std/m³], Auswahl deutschsprachiger Literatur

Aufwendungen für Betonarbeiten bei Wänden [Std/m³]			
Autor	minimal	Durchschnitt	maximal
Fleischmann (1999)	1.50	1.60	1.70
Hoffmann und Kremer (1996)	0.35	0.88	1.40
Levsen (1981)	1.80	3.60	5.40
Meier (1984)	1.15	1.80	2.45
Platz (1982)	1.20	2.90	4.60
Plümecke (1995)	0.64	2.05	3.45

Tabelle 26: Aufwendungen für Betonarbeiten bei Wänden [Std/m³], Auswahl deutschsprachiger Literatur

Ehrenwörtliche Erklärung

Ich versichere hiermit, dass ich die vorliegende Arbeit mit dem Thema „Erweiterung der Immobilienbewertungs-Toolbox: Die Verwendung von Monte-Carlo-Simulationen in der Projektentwicklung - mit einem Fokus auf Baukosten und im Speziellen Stahlbetonarbeiten“ selbstständig verfasst und keine anderen Hilfsmittel als die angegebenen benutzt habe.

Alle Stellen die wörtlich oder sinngemäss aus veröffentlichten oder nicht veröffentlichten Schriften entnommen sind, habe ich in jedem einzelnen Falle durch Angabe der Quelle (auch der verwendeten Sekundärliteratur) als Entlehnung kenntlich gemacht.

Die Arbeit hat in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegen und wurde auch noch nicht veröffentlicht.

Zürich, den 09.09.2020



Matjaz Vrbeč