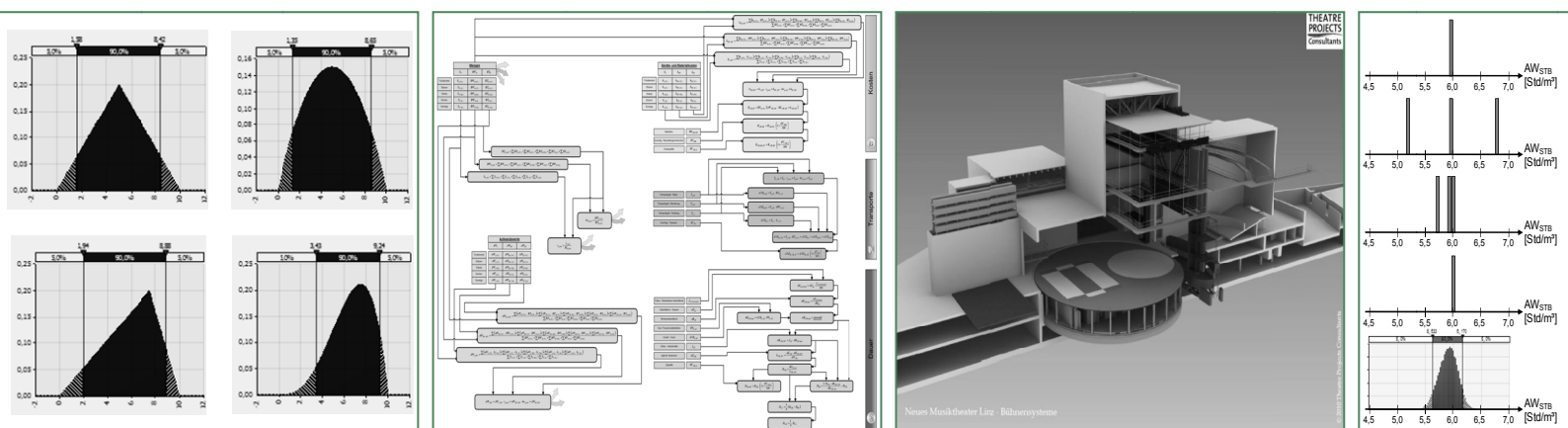


# MASTERARBEIT



## EINSATZ DER MONTE-CARLO SIMULATION ZUR BERECHNUNG VON BALKOSTEN UND BAUZEIT

Kummer Markus Klaus, BSc

Vorgelegt am  
Institut für Baubetrieb und Bauwirtschaft  
Projektentwicklung und Projektmanagement

Betreuer  
Assoc.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Christian Hofstadler

Graz am 03. Jänner 2012



## EIDESSTÄTTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Graz, am .....

.....

(Unterschrift)

## STATUARY DECLARATION

I declare that I have authored this thesis independently, that I have not used other than the declared sources/resources, and that I have explicitly marked all material which has been quoted either literally or by content from the used sources.

Graz, .....

date

.....

(signature)

## Danksagung

An dieser Stelle möchte ich all jenen Personen danken, die mir während meines Studiums und bei meiner Masterarbeit mit Rat und Tat zur Seite standen.

Für die Betreuung von universitärer Seite bedanke ich mich bei Herrn Assoc.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Christian Hofstadler.

Besonderer Dank gebührt meinen Eltern, die mich die gesamte Ausbildungszeit hindurch unterstützt haben.

Graz, am (Datum)

\_\_\_\_\_  
(Unterschrift des Studenten)



## Kurzfassung

Diese Masterarbeit befasst sich mit dem Einsatz der Monte-Carlo Simulation für die Berechnung der Baukosten, Bauzeit und Anzahl der Transporte, mit speziellem Fokus auf die Stahlbetonarbeiten. Die Monte-Carlo Methode wird als Werkzeug für das Risikomanagement bzw. generell für die Handhabung und Beurteilung von Risiken eingesetzt.

In den Grundlagen werden der Risikobegriff, die Risikoeinteilung und der Umgang mit Risiken erläutert. Weiters werden die erforderlichen Gleichungen für die Berechnung der Bauzeit, Baukosten und der Anzahl an Transporten für die Stahlbetonarbeiten beschrieben.

Aufbauend auf diese Grundlagen wird auf die Anwendung der Monte-Carlo Methode eingegangen. Besonderes Augenmerk liegt dabei auf der Wahl der Verteilungsfunktionen und dem Einsatz von Korrelationen. Weiters werden die Probenerhebungsmethoden Latin Hypercube und Monte-Carlo, welche vom verwendeten Softwareprogramm @Risk eingesetzt werden, verglichen.

Mit dem Musiktheaters Linz als Berechnungsbeispiel, werden die Resultate der Monte-Carlo Methode jenen von vier anderen Berechnungsmethoden, die in der Praxis üblicherweise Anwendung finden, gegenübergestellt. Abschließend erfolgt eine Zusammenfassung der Vorteile, die der Einsatz der Monte-Carlo Methode mit sich bringt.

## Abstract

This master thesis deals with the application of the Monte-Carlo simulation for the calculation of building costs, building time and the number of transports, with a special focus on reinforced concrete works. The Monte-Carlo method is a tool for risk management and the treatment and evaluation of risks.

The paper first presents a definition of the term "risk", a classification of risks and ways of handling risks. Furthermore the equations required to calculate building costs, building time and the number of transports for reinforced concrete works are described.

Based on these fundamentals the use of the Monte-Carlo method is shown. The software used for the investigations is called @Risk. Particular attention is paid to the choice of the distribution functions and the application of correlations. Moreover a comparison is made between the two sampling methods employed by the software (Latin Hypercube and Monte-Carlo sampling).

Using the example of "Musiktheater Linz" the results of the Monte-Carlo method are compared to those of four other calculation methods that are generally employed. Finally, the advantages of the Monte-Carlo method are summarized.

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Risiken bei Bauprojekten</b>	<b>4</b>
2.1	Risikobegriff .....	4
2.2	Einteilung der Risiken .....	5
2.3	Umgang mit Risiken – Risikomanagement (RM) .....	6
2.3.1	Risikopolitik .....	7
2.3.2	Risikobeurteilung.....	7
2.3.3	Risikobewältigung .....	10
2.3.4	Information und Kommunikation .....	12
2.3.5	Risikoverfolgung – Monitoring.....	12
2.3.6	Risikonachbetrachtung.....	13
2.4	Risiken bei Stahlbetonarbeiten .....	13
<b>3</b>	<b>Ermittlung von Baukosten für Stahlbetonarbeiten</b>	<b>15</b>
3.1	Allgemeines.....	15
3.2	Kostentoleranz .....	15
3.3	Kostenermittlungsverfahren .....	17
3.3.1	Nutzungsbezogene Verfahren .....	17
3.3.2	Bauwerksbezogene Verfahren.....	17
3.3.3	Ausführungsorientierte Verfahren .....	18
3.3.4	Baelementeverfahren.....	18
3.3.5	Mischverfahren.....	18
3.3.6	Analyse der Kostenermittlungsverfahren .....	18
3.4	Grobkalkulation .....	19
3.5	Detailkalkulation .....	21
3.5.1	Schalungsfläche $S_{F,bwk}$ .....	21
3.5.2	Bewehrungsmenge $BW_{M,bwk}$ .....	21
3.5.3	Betonmenge $BT_{M,bwk}$ .....	21
3.5.4	Schalungsgrad $S_{g,bwk}$ .....	21
3.5.5	Bewehrungsgrad $bw_{g,bwk}$ .....	22
3.5.6	Gesamt-Aufwandswert $AW_{STB}$ .....	22
3.5.7	Aufwandswert für Schalarbeiten $AW_{S,MW}$ .....	23
3.5.8	Aufwandswert für Bewehrungsarbeiten $AW_{BW,MW}$ .....	24
3.5.9	Aufwandswert für Betonarbeiten $AW_{BT,MW}$ .....	24
3.5.10	Mittellohnkosten $ML_{STB,MW}$ .....	24
3.5.11	Geräte- und Materialkosten $k_{STB,MW}$ .....	25
<b>4</b>	<b>Ermittlung der Bauzeit für Stahlbetonarbeiten</b>	<b>26</b>
4.1	Grobbetrachtung .....	26
4.1.1	Leistung der Stahlbetonarbeiten $L_{STB}$ .....	26
4.1.2	Anzahl der Arbeitskräfte $AK_{STB}$ .....	27
4.1.3	Dauer der Hauptbauphase $D_{HP}$ .....	29
4.1.4	Dauer der Anlauf- $D_{AN}$ und Auslaufphase $D_{AUS}$ .....	29
4.2	Detailbetrachtung .....	30
<b>5</b>	<b>Ermittlung der Anzahl an Transporten für Stahlbetonarbeiten</b>	<b>31</b>
5.1	Grobplanung .....	31
5.2	Feinplanung .....	32
5.2.1	Transportgrad der Schalung $tp_{g,S}$ .....	32
5.2.2	Transportgrad der Bewehrung $tp_{g,BW}$ .....	33

5.2.3	Transportgrad des Betons $tp_{g,BT}$ .....	33
<b>6</b>	<b>Monte-Carlo Methode</b> .....	<b>35</b>
6.1	Definition der Monte-Carlo Methode .....	35
6.2	Geschichte der Monte-Carlo Methode .....	35
6.3	Generierung von Zufallszahlen .....	37
6.4	Anwendung der Monte-Carlo Methode .....	38
6.4.1	Beispiel für die Anwendung der Monte-Carlo Methode auf ein stochastisches Problem .....	39
6.4.2	Erkenntnisse aus diesem Beispiel .....	40
6.5	Begriffsdefinitionen .....	40
6.5.1	Stochastik .....	40
6.5.2	Determinismus .....	41
6.5.3	Probabilismus .....	41
6.5.4	Schiefe .....	41
6.5.5	Median .....	42
6.5.6	Modus .....	42
6.5.7	Mittelwert .....	42
6.5.8	Erwartungswert .....	43
6.5.9	Varianz .....	44
6.5.10	Standardabweichung .....	45
6.5.11	Quantil, Quartil, Quintil, Dezil .....	45
6.5.12	Iteration .....	46
6.6	Wahl der Verteilungsfunktionen .....	46
6.7	Korrelationen .....	49
6.8	Einfluss von Korrelationen auf die Berechnung .....	51
6.8.1	Addition .....	52
6.8.2	Subtraktion .....	53
6.8.3	Multiplikation .....	55
6.8.4	Division .....	57
6.8.5	Gegenüberstellung .....	58
6.8.6	Einfluss von Korrelationen auf die Berechnung .....	59
6.9	Korrelationen bei Stahlbetonarbeiten .....	60
6.9.1	Zusammenhang zwischen Schalungsfläche und Betonmenge – Beispiel .....	62
6.9.2	Erkenntnisse aus dem Beispiel .....	64
6.10	Situationsanalyse – Literaturrecherche .....	64
<b>7</b>	<b>@Risk</b> .....	<b>68</b>
7.1	Warum @Risk? .....	68
7.1.1	Vorteile (demonstrativ) .....	69
7.1.2	Nachteile (demonstrativ) .....	69
7.2	Simulation .....	69
7.3	Probenerhebung .....	71
7.3.1	Summenverteilung .....	72
7.3.2	Monte-Carlo Probenerhebungsmethode .....	74
7.3.3	Latin Hypercube Probenerhebungsmethode .....	74
7.3.4	Vergleich der Latin Hypercube und Monte-Carlo Probenerhebungsmethode .....	76
<b>8</b>	<b>Berechnungsbeispiel</b> .....	<b>78</b>
8.1	Berechnungsmodus 1: deterministischer Ansatz .....	80
8.1.1	Mengen .....	81
8.1.2	Aufwandswerte .....	81
8.1.3	Geräte- und Materialkosten .....	82
8.1.4	Einzelkosten/Herstellkosten .....	84

8.1.5	Maximale Arbeitskräfteanzahl .....	84
8.1.6	Mittlere Arbeitskräfteanzahl.....	85
8.1.7	Stahlbetonleistung.....	85
8.1.8	Dauer der Stahlbetonarbeiten .....	85
8.1.9	Anzahl der Transporte.....	86
8.2	Berechnungsmodus 2: verbesserter deterministischer Ansatz .....	87
8.2.1	Mengen .....	87
8.2.2	Aufwandswerte.....	88
8.2.3	Geräte- und Materialkosten.....	90
8.2.4	Einzelkosten/Herstellkosten .....	92
8.2.5	Maximale Arbeitskräfteanzahl .....	94
8.2.6	Mittlere Arbeitskräfteanzahl.....	95
8.2.7	Stahlbetonleistung.....	95
8.2.8	Dauer der Stahlbetonarbeiten .....	96
8.2.9	Anzahl der Transporte.....	97
8.3	Berechnungsmodus 3: PERT-Methode .....	99
8.3.1	Mengen .....	99
8.3.2	Aufwandswerte.....	100
8.3.3	Geräte- und Materialkosten.....	102
8.3.4	Einzelkosten/Herstellkosten .....	103
8.3.5	Maximale Arbeitskräfteanzahl .....	104
8.3.6	Mittlere Arbeitskräfteanzahl.....	106
8.3.7	Stahlbetonleistung.....	106
8.3.8	Dauer der Stahlbetonarbeiten .....	106
8.3.9	Anzahl der Transporte.....	107
8.4	Berechnungsmodus 4: vereinfachter probabilistischer Ansatz .....	108
8.4.1	Mengen .....	109
8.4.2	Aufwandswerte.....	110
8.4.3	Geräte- und Materialkosten.....	112
8.4.4	Einzelkosten/Herstellkosten .....	114
8.4.5	Maximale Arbeitskräfteanzahl .....	115
8.4.6	Mittlere Arbeitskräfteanzahl.....	116
8.4.7	Stahlbetonleistung.....	116
8.4.8	Dauer der Stahlbetonarbeiten .....	117
8.4.9	Anzahl der Transporte.....	117
8.5	Berechnungsmodus 5: Monte-Carlo Simulation.....	119
8.5.1	Mengen .....	119
8.5.2	Aufwandswerte.....	122
8.5.3	Geräte- und Materialkosten.....	124
8.5.4	Einzelkosten/Herstellkosten .....	127
8.5.5	Maximale Arbeitskräfteanzahl .....	130
8.5.6	Stahlbetonleistung.....	132
8.5.7	Dauer der Stahlbetonarbeiten .....	132
8.5.8	Anzahl der Transporte.....	135
<b>9</b>	<b>Gegenüberstellung der Ergebnisse aus dem Berechnungsbeispiel</b> .....	<b>138</b>
9.1	Gesamt-Aufwandswert.....	138
9.2	Kosten .....	139
9.3	Dauer der Stahlbetonarbeiten .....	142
9.4	Anzahl der Transporte.....	144
9.5	Vergleich – PERT- und Dreiecksverteilung.....	146
<b>10</b>	<b>Vorteile der Monte-Carlo Methode</b> .....	<b>149</b>

11	<b>Zusammenfassung</b>	<b>150</b>
12	<b>Ausblick</b>	<b>153</b>
13	<b>Anhang</b>	<b>154</b>
14	<b>Abkürzungsverzeichnis</b>	<b>156</b>
15	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>163</b>

## Abbildungsverzeichnis

Bild 1–1	Arbeitsvorbereitung im Regelkreis [ <i>Hofstadler</i> ] .....	1
Bild 2–1	Risikodefinition [eigene Abbildung in Anlehnung an <i>Flemming/Netzker/Schöttle</i> ] .....	5
Bild 2–2	Zusammenhang zwischen Einzelrisiken, Risikoarten und Risikofeldern [ <i>Girmscheid/Busch</i> ] .....	6
Bild 2–3	Risikomanagementprozess [in Anlehnung an die ÖNORM ISO 31000:2010 und die ÖNR 49001:2010] .....	7
Bild 2–4	Beispiel einer Risikocheckliste mit zusätzlicher Tabelle zur Risikoeinschätzung [ <i>Link/Stempkowski</i> ].....	8
Bild 2–5	Qualitative Bewertung von Risiken [in Anlehnung an <i>Link/Stempkowski</i> ] .....	9
Bild 2–6	Methoden zur Risikobewältigung [in Anlehnung an <i>Girmscheid/Busch</i> ] .....	11
Bild 2–7	Risikobewältigung [in Anlehnung an <i>Link/Stempkowski</i> ] .....	12
Bild 2–8	Risiken bei Stahlbetonarbeiten [in Anlehnung an <i>Hofstadler</i> ].....	14
Bild 3–1	Planungssystem lt. ÖNORM B 1801-1:2009 .....	15
Bild 3–2	Kostentoleranzen [in Anlehnung an <i>Lechner/Liebenau</i> ] .....	16
Bild 3–3	Vergleich der Kostengliederungsebenen der ÖNORM B 1801-1:2009 und der DIN 276- 1:2008 [in Anlehnung an <i>Lechner/Liebenau</i> ].....	19
Bild 3–4	Einflüsse auf Aufwandswerte – Beispiel: Schalarbeiten [ <i>Hofstadler</i> ].....	22
Bild 3–5	Differenzierung von Aufwandswerten [ <i>Hofstadler</i> ].....	23
Bild 3–6	Gerätekostenmatrix – Schalarbeiten [ <i>Hofstadler</i> ] .....	25
Bild 4–1	Einflüsse auf Leistungswerte [ <i>Hofstadler</i> ].....	27
Bild 4–2	Trapezverteilung der Arbeitskräfteanzahl über die Bauzeit [in Anlehnung an <i>Hofstadler</i> ] ....	29
Bild 4–3	Detailbetrachtung der Stahlbetonarbeiten für die Fließfertigung bei Decken – Ausschnitt aus dem Ablaufplan [ <i>Hofstadler</i> ].....	30
Bild 6–1	Nadelproblem von Buffon .....	36
Bild 6–2	Beispielhafte Darstellung des Histogramms für den Wert U inkl. der angenäherten Verteilungsdichtefunktion [in Anlehnung an <i>Sobo</i> ] .....	40
Bild 6–3	Linksschiefe Verteilung (links) – rechtsschiefe Verteilung (rechts).....	42
Bild 6–4	Unterschied Median, Modus und Mittelwert am Beispiel von PERT-Verteilungen.....	43
Bild 6–5	Verteilungskurve mit geringer (rot) und großer Varianz (grün) .....	44
Bild 6–6	Quantilwert einer Verteilungsfunktion [ <i>Henze</i> ].....	45
Bild 6–7	Mögliche Verteilungsfunktionen.....	46
Bild 6–8	Rechtsschiefe Verteilungsfunktion für Baukosten (schematische Darstellung) [ <i>Chau</i> ].....	48
Bild 6–9	Korrelationen zwischen zwei Parametern A und B.....	50
Bild 6–10	Korrelationen zwischen zwei Parametern A und B in Vektorform.....	50
Bild 6–11	Korrelationsmatrizen in @Risk (links: Darstellung mit Zahlenwerten; rechts: Darstellung mit Punktwolken) .....	51
Bild 6–12	Verteilungsfunktionen der Eingangsparameter A (links) und B (rechts) .....	52
Bild 6–13	Verteilungsfunktionen – Addition von A und B.....	53
Bild 6–14	Verteilungsfunktion – Subtraktion von A und B .....	54
Bild 6–15	Verteilungsfunktion – Subtraktion von A und B (ohne linear positive Korrelation).....	55
Bild 6–16	Verteilungsfunktion – Multiplikation von A und B.....	56

Bild 6–17	Verteilungsfunktion – Multiplikation von A und B (ohne negativ lineare Korrelation) .....	57
Bild 6–18	Verteilungsfunktion – Division von A und B .....	58
Bild 6–19	Simulationen für den Gesamt-Aufwandswert mit unterschiedlichen Korrelationen [in Anlehnung an <i>Hofstadler</i> ] .....	59
Bild 6–20	Ergebnisse der 3 Simulationen zur Ermittlung des Gesamt-Aufwandswertes .....	60
Bild 6–21	Minimale, erwartete und maximale Stützenabmessungen .....	62
Bild 6–22	Verteilungsfunktionen für Schalungsfläche und Betonmenge – gerechnet .....	63
Bild 6–23	Verteilungsfunktionen für Schalungsfläche (gerechnet) und Betonmenge (geschätzt) .....	64
Bild 6–24	Unterteilung eines Bauwerks in Ablaufabschnitte nach REFA [ <i>Hofstadler/Franzl</i> ] .....	65
Bild 6–25	Situationsanalyse .....	66
Bild 7–1	Gleichungsübersicht für Kosten, Dauer und Anzahl der Transporte [in Anlehnung an <i>Hofstadler</i> ] .....	70
Bild 7–2	Vergleich der Annäherung an eine gewählte Verteilungsfunktion mit Monte-Carlo (oben) und Latin Hypercube (unten) .....	72
Bild 7–3	Summenverteilungskurven für unterschiedliche Verteilungsfunktionen .....	73
Bild 7–4	Beispiel für eine Probenerhebung (Schritte 1 bis 4) .....	73
Bild 7–5	Monte-Carlo Probenerhebungsverfahren .....	74
Bild 7–6	Latin Hypercube – Probenerhebungsmethode .....	75
Bild 7–7	100 Iterationen – Links: Monte-Carlo – Rechts: Latin Hypercube .....	76
Bild 7–8	500 Iterationen – Links: Monte-Carlo – Rechts: Latin Hypercube .....	77
Bild 7–9	1000 Iterationen – Links: Monte-Carlo – Rechts: Latin Hypercube .....	77
Bild 8–1	Musiktheater Linz .....	78
Bild 8–2	Übersicht der durchgeführten Berechnungsmodi 1 bis 5 .....	80
Bild 8–3	Prozentuale Bandbreite der Herstellkosten für die Stahlbetonarbeiten inkl. Kostenpuffer – Berechnungsmodus 2 .....	93
Bild 8–4	Prozentuale Bandbreite der Herstellkosten für die Stahlbetonarbeiten inkl. Kostenpuffer – Berechnungsmodus 3 .....	104
Bild 8–5	Gesamt-Schalungsfläche [m <sup>2</sup> ] – Berechnungsmodus 5 .....	120
Bild 8–6	Gesamt-Bewehrungsmenge [t] – Berechnungsmodus 5 .....	120
Bild 8–7	Gesamt-Betonmenge [m <sup>3</sup> ] – Berechnungsmodus 5 .....	121
Bild 8–8	Schalungsgrad [m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup> ] – Berechnungsmodus 5 .....	121
Bild 8–9	Bewehrungsgrad [t/m <sup>3</sup> ] – Berechnungsmodus 5 .....	122
Bild 8–10	Mittlerer Aufwandswert – Schalungsarbeiten [Std/m <sup>2</sup> ] – Berechnungsmodus 5 .....	122
Bild 8–11	Mittlerer Aufwandswert – Bewehrungsarbeiten [Std/t] – Berechnungsmodus 5 .....	123
Bild 8–12	Mittlerer Aufwandswert – Betonierarbeiten [Std/m <sup>3</sup> ] – Berechnungsmodus 5 .....	123
Bild 8–13	Gesamt-Aufwandswert der Stahlbetonarbeiten [Std/m <sup>3</sup> ] – Berechnungsmodus 5 .....	124
Bild 8–14	Mittlere Gerätekosten – Schalung [€/m <sup>2</sup> ] – Berechnungsmodus 5 .....	124
Bild 8–15	Mittlere Gerätekosten – Bewehrung [€/t] – Berechnungsmodus 5 .....	125
Bild 8–16	Mittlere Gerätekosten – Beton [€/m <sup>3</sup> ] – Berechnungsmodus 5 .....	125
Bild 8–17	Mittlere Materialkosten – Schalung [€/m <sup>2</sup> ] – Berechnungsmodus 5 .....	125
Bild 8–18	Mittlere Materialkosten – Bewehrung [€/t] – Berechnungsmodus 5 .....	126
Bild 8–19	Mittlere Materialkosten – Beton [€/m <sup>3</sup> ] – Berechnungsmodus 5 .....	126

Bild 8–20	Mittlere Geräte- und Materialkosten – Stahlbetonarbeiten [€/m <sup>3</sup> ] – Berechnungsmodus 5 .....	127
Bild 8–21	Einzelkosten der Stahlbetonarbeiten [€] – Berechnungsmodus 5 .....	128
Bild 8–22	Herstellkosten der Stahlbetonarbeiten [€] – Berechnungsmodus 5 .....	128
Bild 8–23	Herstellkosten der Stahlbetonarbeiten inkl. Kostenpuffer [€] – Berechnungsmodus 5 .....	129
Bild 8–24	Vergleich Einzelkosten (links), Herstellkosten (mittig) und Herstellkosten inkl. Puffer (rechts) für Stahlbetonarbeiten [€] – Berechnungsmodus 5 .....	129
Bild 8–25	Prozentuale Bandbreite der Herstellkosten für die Stahlbetonarbeiten inkl. Kostenpuffer – Berechnungsmodus 5 .....	130
Bild 8–26	Vergleich der maximalen Arbeitskräfteanzahlen [Std/h] – Berechnungsmodus 5 .....	131
Bild 8–27	Mittlere Arbeitskräfteanzahl [Std/h] – Berechnungsmodus 5 .....	132
Bild 8–28	Mittlere tägliche Leistung der Stahlbetonarbeiten [m <sup>3</sup> /d] – Berechnungsmodus 5 .....	132
Bild 8–29	Dauer der Stahlbetonarbeiten [d] – Berechnungsmodus 5 .....	133
Bild 8–30	Dauer der Anlaufphase [d] – Berechnungsmodus 5 .....	133
Bild 8–31	Dauer der Hauptbauphase [d] – Berechnungsmodus 5 .....	134
Bild 8–32	Dauer der Auslaufphase [d] – Berechnungsmodus 5 .....	134
Bild 8–33	Dauer der Stahlbetonarbeiten inkl. Zeitpuffer [d] – Berechnungsmodus 5 .....	134
Bild 8–34	Vergleich der Dauern für Stahlbetonarbeiten [d] – Berechnungsmodus 5 .....	135
Bild 8–35	Anzahl der Transporte für Schalung [TR] – Berechnungsmodus 5 .....	135
Bild 8–36	Anzahl der Transporte für Bewehrung [TR] – Berechnungsmodus 5 .....	136
Bild 8–37	Anzahl der Transporte für Beton [TR] – Berechnungsmodus 5 .....	136
Bild 8–38	Gesamtanzahl der Transporte [TR] – Berechnungsmodus 5 .....	136
Bild 8–39	Gesamtanzahl der Transporte inkl. Zuschlag [TR] – Berechnungsmodus 5 .....	137
Bild 8–40	Vergleich der Anzahl an Transporten [TR] – Berechnungsmodus 5 .....	137
Bild 9–1	Vergleich der 5 Berechnungsmodi – Gesamt-Aufwandswert .....	138
Bild 9–2	Vergleich der 5 Berechnungsmodi - Einzelkosten .....	140
Bild 9–3	Vergleich der 5 Berechnungsmodi – Dauer der Stahlbetonarbeiten .....	143
Bild 9–4	Vergleich der 5 Berechnungsmodi – Anzahl der Transporte .....	145
Bild 9–5	Vergleiche der Ergebnisse des Gesamt-Aufwandswertes [Std/m <sup>3</sup> ], der Einzelkosten [€], Bauzeit [d] und Gesamtanzahl der Transporte [TR] für Dreiecks- (blau) und PERT-Verteilungen (rot) .....	147
Bild 11–1	Vergleich der prozentualen Bandbreiten der Herstellkosten für die Stahlbetonarbeiten inkl. Kostenpuffer - Berechnungsmodi 2, 3 und 5 .....	152



## Tabellenverzeichnis

Tabelle 4.1	Richtwerte für Proportionalitätsfaktoren bei Betonarbeiten [in Anlehnung an <i>Schach/Otto</i> ]	28
Tabelle 6.1	Beispiel für die Mid-Square-Methode nach <i>Neumann</i>	38
Tabelle 6.2	Beispiele für die Anwendung der Monte-Carlo Methode	38
Tabelle 6.3	Korrelationskoeffizienten	52
Tabelle 6.4	Einfluss von Korrelationen auf die Streuung der Ergebnisse getrennt nach Rechenoperationen	58
Tabelle 6.5	Übersicht der Eingabewerte zur Berechnung des Gesamt-Aufwandwertes	59
Tabelle 6.6	Mögliche Abhängigkeiten bei Stahlbetonarbeiten (demonstrativ)	61
Tabelle 6.7	Kategorien der Korrelationskoeffizienten nach <i>Chau</i>	61
Tabelle 7.1	Vergleich zwischen Latin Hypercube und Monte-Carlo – Eingangswerte	76
Tabelle 8.1	Mengenermittlung – Musiktheater Linz	79
Tabelle 8.2	Aufwandswerte für das Schalen, Bewehren und Betonieren – Berechnungsmodus 1	82
Tabelle 8.3	Mittlere Aufwandswerte für das Schalen, Bewehren und Betonieren – Berechnungsmodus 1	82
Tabelle 8.4	Gerätekosten für Schalung, Bewehrung und Beton – Berechnungsmodus 1	83
Tabelle 8.5	Materialkosten für Schalung, Bewehrung und Beton – Berechnungsmodus 1	83
Tabelle 8.6	Mittlere Geräte- und Materialkosten für Schalung, Bewehrung und Beton – Berechnungsmodus 1	83
Tabelle 8.7	Transportgrade für Schalung, Bewehrung und Beton – Berechnungsmodus 1	86
Tabelle 8.8	Anzahl der Transporte für Schalung, Bewehrung und Beton sowie die Gesamtanzahl der Transporte für die Stahlbetonarbeiten – Berechnungsmodus 1	86
Tabelle 8.9	Schalungsflächen – Berechnungsmodus 2	87
Tabelle 8.10	Bewehrungsmengen – Berechnungsmodus 2	88
Tabelle 8.11	Betonmengen – Berechnungsmodus 2	88
Tabelle 8.12	Bandbreite des Schalungs- und Bewehrungsgrades für das gesamte Bauwerk – Berechnungsmodus 2	88
Tabelle 8.13	Aufwandswerte für das Schalen – Berechnungsmodus 2	89
Tabelle 8.14	Aufwandswerte für das Bewehren – Berechnungsmodus 2	89
Tabelle 8.15	Aufwandswerte für das Betonieren – Berechnungsmodus 2	89
Tabelle 8.16	Mittlere Aufwandswerte für Schalen, Bewehren und Betonieren sowie der Gesamt-Aufwandwert für Stahlbetonarbeiten – Berechnungsmodus 2	90
Tabelle 8.17	Gerätekosten Schalung – Berechnungsmodus 2	90
Tabelle 8.18	Gerätekosten Bewehrung – Berechnungsmodus 2	90
Tabelle 8.19	Gerätekosten Beton – Berechnungsmodus 2	91
Tabelle 8.20	Materialkosten Schalung – Berechnungsmodus 2	91
Tabelle 8.21	Materialkosten Bewehrung – Berechnungsmodus 2	91
Tabelle 8.22	Materialkosten Beton – Berechnungsmodus 2	92
Tabelle 8.23	Mittlere Geräte- und Materialkosten für Schalung, Bewehrung und Beton sowie für die gesamten Stahlbetonarbeiten – Berechnungsmodus 2	92

Tabelle 8.24	Mittellohnkosten, Zuschlag für Baustellengemeinkosten und Kostenpuffer – Berechnungsmodus 2.....	92
Tabelle 8.25	Einzel- und Herstellkosten der Stahlbetonarbeiten – Berechnungsmodus 2.....	93
Tabelle 8.26	Eingangswerte zur Berechnung der maximalen Arbeitskräfteanzahl auf Basis der Krananzahl – Berechnungsmodus 2 .....	94
Tabelle 8.27	Maximale Arbeitskräfteanzahl auf Basis der Krananzahl – Berechnungsmodus 2.....	94
Tabelle 8.28	Eingangswerte zur Berechnung der maximalen Arbeitskräfteanzahl auf Basis der Mindestarbeitsfläche – Berechnungsmodus 2.....	94
Tabelle 8.29	Maximale Arbeitskräfteanzahl auf Basis der Mindestarbeitsfläche – Berechnungsmodus 2.....	94
Tabelle 8.30	Optimistische, erwartete und pessimistische maximale Arbeitskräfteanzahl – Berechnungsmodus 2.....	95
Tabelle 8.31	Arbeitskräfteverhältnis – Berechnungsmodus 2 .....	95
Tabelle 8.32	Mittlere Arbeitskräfteanzahl – Berechnungsmodus 2 .....	95
Tabelle 8.33	Tägliche Arbeitszeit – Berechnungsmodus 2 .....	96
Tabelle 8.34	Mittlere tägliche Leistung der Stahlbetonarbeiten – Berechnungsmodus 2.....	96
Tabelle 8.35	Dauer der Stahlbetonarbeiten – Berechnungsmodus 2.....	96
Tabelle 8.36	Anlauf-, Hauptbau- und Auslaufphase – Berechnungsmodus 2.....	97
Tabelle 8.37	Gesamtdauer der Stahlbetonarbeiten inkl. Puffer – Berechnungsmodus 2.....	97
Tabelle 8.38	Transportgrade für Schalung, Bewehrung und Beton – Berechnungsmodus 2 .....	98
Tabelle 8.39	Mittlerer Transportgrad für Stahlbetonarbeiten und Anzahl der Transporte – Berechnungsmodus 2.....	98
Tabelle 8.40	Schalungsflächen – Berechnungsmodus 3 .....	100
Tabelle 8.41	Bewehrungsmengen – Berechnungsmodus 3.....	100
Tabelle 8.42	Betonmengen – Berechnungsmodus 3 .....	100
Tabelle 8.43	Schalungs- und Bewehrungsgrad für das gesamte Bauwerk – Berechnungsmodus 3 .....	100
Tabelle 8.44	Aufwandswerte für das Schalen – Berechnungsmodus 3 .....	101
Tabelle 8.45	Aufwandswerte für das Bewehren – Berechnungsmodus 3.....	101
Tabelle 8.46	Aufwandswerte für das Betonieren – Berechnungsmodus 3.....	101
Tabelle 8.47	Mittlere Aufwandswerte für Schalen, Bewehren und Betonieren sowie der Gesamt- Aufwandswert für Stahlbetonarbeiten – Berechnungsmodus 3.....	101
Tabelle 8.48	Geräte- und Materialkosten Schalung – Berechnungsmodus 3 .....	102
Tabelle 8.49	Geräte- und Materialkosten Bewehrung – Berechnungsmodus 3 .....	102
Tabelle 8.50	Geräte- und Materialkosten Beton – Berechnungsmodus 3.....	102
Tabelle 8.51	Mittlere Geräte- und Materialkosten für Schalung, Bewehrung und Beton sowie für die gesamten Stahlbetonarbeiten – Berechnungsmodus 3.....	103
Tabelle 8.52	Mittellohnkosten, Zuschlag für Baustellengemeinkosten, Kostenpuffer – Berechnungsmodus 3.....	103
Tabelle 8.53	Einzel- und Herstellkosten der Stahlbetonarbeiten – Berechnungsmodus 3.....	103
Tabelle 8.54	Eingangswerte zur Berechnung der maximalen Arbeitskräfteanzahl auf Basis der Krananzahl – Berechnungsmodus 3 .....	104
Tabelle 8.55	Maximale Arbeitskräfteanzahl auf Basis der Krananzahl – Berechnungsmodus 3.....	105
Tabelle 8.56	Eingangswerte zur Berechnung der maximalen Arbeitskräfteanzahl auf Basis der Mindestarbeitsfläche – Berechnungsmodus 3.....	105

Tabelle 8.57	Maximale Arbeitskräfteanzahl auf Basis der Mindestarbeitsfläche – Berechnungsmodus 3.....	105
Tabelle 8.58	Optimistische, mittlere und pessimistische maximale Arbeitskräfteanzahl – Berechnungsmodus 3.....	105
Tabelle 8.59	Arbeitskräfteverhältnis – Berechnungsmodus 3 .....	106
Tabelle 8.60	Mittlere Arbeitskräfteanzahl – Berechnungsmodus 3 .....	106
Tabelle 8.61	Tägliche Arbeitszeit – Berechnungsmodus 3 .....	106
Tabelle 8.62	Mittlere tägliche Leistung der Stahlbetonarbeiten – Berechnungsmodus 3.....	106
Tabelle 8.63	Dauer der Stahlbetonarbeiten – Berechnungsmodus 3.....	107
Tabelle 8.64	Anlauf-, Hauptbau- und Auslaufphase – Berechnungsmodus 3.....	107
Tabelle 8.65	Zeitpuffer – Berechnungsmodus 3 .....	107
Tabelle 8.66	Gesamtdauer der Stahlbetonarbeiten inkl. Puffer – Berechnungsmodus 3.....	107
Tabelle 8.67	Transportgrade für Schalung, Bewehrung und Beton – Berechnungsmodus 3.....	108
Tabelle 8.68	Mittlerer Transportgrad für Stahlbeton und Anzahl der Transporte – Berechnungsmodus 3.....	108
Tabelle 8.69	Schalungsflächen – Berechnungsmodus 4 .....	109
Tabelle 8.70	Bewehrungsmengen – Berechnungsmodus 4.....	110
Tabelle 8.71	Betonmengen – Berechnungsmodus 4 .....	110
Tabelle 8.72	Schalungs- und Bewehrungsgrad für das gesamte Bauwerk – Berechnungsmodus 4 .....	110
Tabelle 8.73	Aufwandswerte für das Schalen – Berechnungsmodus 4 .....	111
Tabelle 8.74	Aufwandswerte für das Bewehren – Berechnungsmodus 4 .....	111
Tabelle 8.75	Aufwandswerte für das Betonieren – Berechnungsmodus 4.....	111
Tabelle 8.76	Mittlere Aufwandswerte für Schalen, Bewehren und Betonieren sowie der Gesamt- Aufwandswert für Stahlbetonarbeiten – Berechnungsmodus 4 .....	111
Tabelle 8.77	Gerätekosten Schalung – Berechnungsmodus 4 .....	112
Tabelle 8.78	Gerätekosten Bewehrung – Berechnungsmodus 4 .....	112
Tabelle 8.79	Gerätekosten Beton – Berechnungsmodus 4.....	112
Tabelle 8.80	Materialkosten Schalung – Berechnungsmodus 4 .....	113
Tabelle 8.81	Materialkosten Bewehrung – Berechnungsmodus 4 .....	113
Tabelle 8.82	Materialkosten Beton – Berechnungsmodus 4 .....	113
Tabelle 8.83	Mittlere Geräte- und Materialkosten für Schalung, Bewehrung und Beton sowie für die gesamten Stahlbetonarbeiten – Berechnungsmodus 4.....	113
Tabelle 8.84	Mittellohnkosten, Zuschlag für Baustellengemeinkosten, Kostenpuffer – Berechnungsmodus 4.....	114
Tabelle 8.85	Einzel- und Herstellkosten der Stahlbetonarbeiten – Berechnungsmodus 4.....	114
Tabelle 8.86	Eingangswerte zur Berechnung der maximalen Arbeitskräfteanzahl auf Basis der Krananzahl – Berechnungsmodus 4 .....	115
Tabelle 8.87	Maximale Arbeitskräfteanzahl auf Basis der Krananzahl – Berechnungsmodus 4.....	115
Tabelle 8.88	Eingangswerte zur Berechnung der maximalen Arbeitskräfteanzahl auf Basis der Mindestarbeitsfläche – Berechnungsmodus 4.....	115
Tabelle 8.89	Maximale Arbeitskräfteanzahl auf Basis der Mindestarbeitsfläche – Berechnungsmodus 4.....	116
Tabelle 8.90	Arbeitskräfteverhältnis – Berechnungsmodus 4 .....	116

Tabelle 8.91	Tägliche Arbeitszeit – Berechnungsmodus 4 .....	116
Tabelle 8.92	Dauer der gesamten Stahlbetonarbeiten sowie für die Anlauf-, Hauptbau- und Auslaufphase – Berechnungsmodus 4 .....	117
Tabelle 8.93	Zeitpuffer – Berechnungsmodus 4 .....	117
Tabelle 8.94	Transportgrade für Schalung, Bewehrung und Beton sowie der Zuschlag für die Anzahl der Transporte – Berechnungsmodus 4 .....	118
Tabelle 8.95	Mittlerer Transportgrad für Stahlbeton und Anzahl der Transporte – Berechnungsmodus 4.....	118
Tabelle 9.1	Vergleich des Gesamt-Aufwandswertes für Berechnungsmodus 1 bis 5 .....	139
Tabelle 9.2	Vergleich der Einzelkosten für Berechnungsmodus 1 bis 5.....	142
Tabelle 9.3	Vergleich der Dauern der Stahlbetonarbeiten für Berechnungsmodus 1 bis 5 .....	144
Tabelle 9.4	Vergleich der Anzahl der Transporte für Berechnungsmodus 1 bis 5 .....	146
Tabelle 9.5	Vergleich zwischen Dreiecks- und PERT-Verteilungen .....	147
Tabelle 11.1	Zusammenfassung der Ergebnisse aus der Monte-Carlo Simulation für das Berechnungsbeispiel .....	151

# 1 Einleitung

Die Ermittlung der Baukosten und der Bauzeit sind im Zuge eines Bauprojektes in allen Projektphasen sowohl für den Auftraggeber als auch für die ausführenden Firmen von wesentlicher Bedeutung.

Das Ziel einer baubetrieblichen und bauwirtschaftlichen Betrachtung ist eine effiziente Kombination der dispositiven und elementaren Produktionsfaktoren unter dem Einfluss der jeweiligen Bauwerks-, Betriebs-, Baustellen- und Bauverfahrensbedingungen. Von besonderer Bedeutung für einen störungsarmen Bauablauf ist die Arbeitsvorbereitung, deren Regelkreis in Bild 1–1 dargestellt ist.<sup>1</sup>

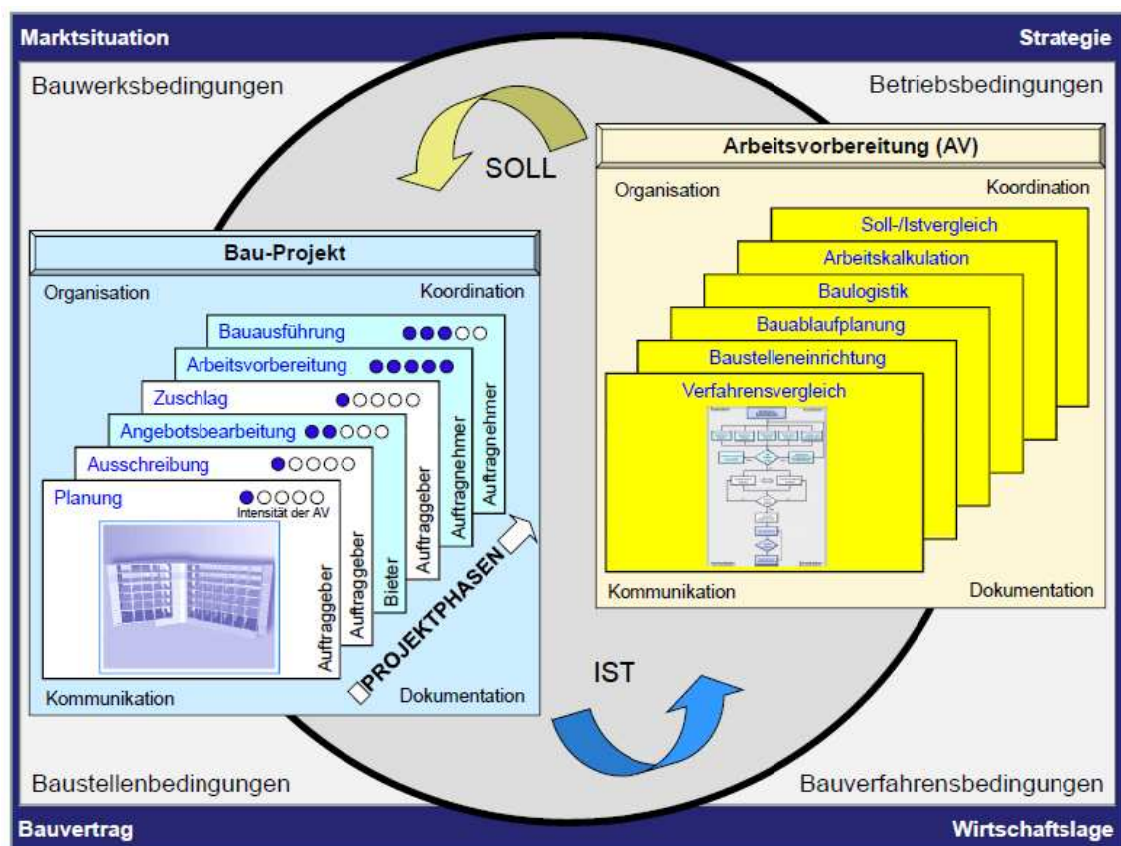


Bild 1–1 Arbeitsvorbereitung im Regelkreis [Hofstadler<sup>2</sup>]

<sup>1</sup> Vgl. HOFSTADLER, C.; FRANZL, G.: Bewehrungsarbeiten im Baubetrieb. S. 10

<sup>2</sup> HOFSTADLER, C.: Monte-Carlo Simulation in der Arbeits-/Projektvorbereitung - Anwendung bei der Berechnung der Bauzeit. In: Tagungsband - 8. Grazer Baubetriebs- und Bauwirtschaftssymposium - Arbeitsvorbereitung für Bauprojekte - Nutzen der Arbeitsvorbereitung für den Projekterfolg 2010. S. 152

Die Arbeitsvorbereitung für Stahlbetonarbeiten kann anhand folgender Planungsmaßnahmen verwirklicht werden:<sup>3</sup>

- Verfahrensvergleiche (z.B. Auswahl des wirtschaftlichsten Schalungssystems)
- Planung der Baustelleneinrichtung (z.B. Lagerflächen, Kranstandorte, Anzahl der Krane)
- Planung des Bauablaufs (Bauablaufplanung)
- Planung der Baulogistik (z.B. Anzahl der Transporte, Zufahrten, Entladestellen)
- Durchführung der Arbeitskalkulation (ausgehend von der Auftragskalkulation)
- Durchführung von Soll-/Istvergleichen (um den Status quo zu bestimmen und auf Störungen reagieren zu können)

Die Ermittlung der Bauzeit in Zusammenhang mit den Baukosten bietet sich an, da sich die beiden Bereiche gegenseitig beeinflussen. Bei sehr kurzen Bauzeiten beispielsweise müssen Forcierungsmaßnahmen getroffen werden, wodurch meist die Einzelproduktivität sinkt und die Kosten steigen.

Vor allem bei der Berechnung der Baukosten sind sich viele Autoren einig, dass dieser Vorgang mit erheblichen Unsicherheiten und Streuungen behaftet ist.

Raaber hält in diesem Zusammenhang folgendes fest:

*„Die verbreitete Vorstellung, es gäbe eine einigermaßen „exakte“ Baupreisermittlung, ist falsch. Es kann fast immer nur eine Abschätzung der zukünftigen Kosten angestellt werden, die mehr oder weniger zutreffend ist und dem AN nach Vertragsabschluss ein großes Risiko aufbürdet.“<sup>4</sup>*

Flemming/Netzker/Schöttle schreiben über die Kostenermittlung wie folgt:

*„Die Eingangsdaten für die Angebotskalkulation sind somit hinsichtlich ihrer tatsächlichen Realisierung in der Zukunft unsicher und stellen Risiken für das Bauunternehmen dar. Mit den gegenwärtig eingesetzten, deterministischen Berechnungsmethoden können diese Risiken nicht abgebildet werden.“<sup>5</sup>*

Weiters Sander/Spiegl/Schneider zur Berechnung mit deterministischen Methoden:

*„Der oft eingeschlagene Weg, die Risiken mittels deterministischer Methoden [...] zu ermitteln [...], führt zu Ergebnissen mit einer äußerst geringen Aussagekraft.“<sup>6</sup>*

Und weiter:

*„Die populäre Forderung nach einer exakten Zahl steht im direkten Widerspruch zum Wunsch nach einer möglichst genauen Prognose.“<sup>7</sup>*

<sup>3</sup> Vgl. HOFSTADLER, C.; FRANZL, G.: Bewehrungsarbeiten im Baubetrieb. S. 10

<sup>4</sup> RAABER, N.: Schriftenreihe des Instituts für Baubetrieb und Bauwirtschaft - Heft 15: Beitrag zu Ausschreibung und Vergabe von Bauleistungen. S. 163

<sup>5</sup> FLEMMING, C.; NETZKER, M.; SCHÖTTLE, A.: Probabilistische Berücksichtigung von Kosten- und Mengenrisiken in der Angebotskalkulation. In: Bautechnik 88 - Heft 2 02/2011. S. 95

<sup>6</sup> SANDER, P.; SPIEGL, M.; SCHNEIDER, E.: Die exakte Zahl - Gedanken im Umgang mit Unschärfen. In: Die Wirtschaftliche Seite des Bauens - Festschrift zum 60. Geburtstag von Rainer Wanninger. S. 606

<sup>7</sup> SANDER, P.; SPIEGL, M.; SCHNEIDER, E.: Die exakte Zahl - Gedanken im Umgang mit Unschärfen. In: Die Wirtschaftliche Seite des Bauens - Festschrift zum 60. Geburtstag von Rainer Wanninger. S. 606

Tautschnig/Fröch/Sander kritisieren die konventionelle Kostenermittlung:

*„Konventionelle Kostenermittlungen im Bauwesen stellen die Herstellungskosten als „exakte Zahlen“ ohne Schwankungsbreiten oder Streuungen dar. Dabei wird die Kostenermittlung [...] in deterministischer Weise durchgeführt. [...] Um den vorhandenen Unschärfen in Kostenermittlungen Rechnung zu tragen, erscheint es naheliegend, eine Erweiterung der deterministischen Kostenermittlung um eine probabilistische Komponente vorzunehmen.“<sup>8</sup>*

Die derzeit in der Praxis am häufigsten eingesetzten, deterministischen Methoden bieten keine Möglichkeit solche Unsicherheiten und Risiken in die Berechnungen einfließen zu lassen.

Eine Methode, die in weiterer Folge untersucht werden soll und mit der Unsicherheiten in die Berechnungen miteinbezogen werden können, ist die sogenannte Monte-Carlo Methode. Diese Methode kann, richtig eingesetzt, sowohl zur Berechnung von Baukosten als auch bei der Ermittlung der Bauzeit angewendet werden. Die vorliegende Masterarbeit beschäftigt sich in diesem Zusammenhang mit den Stahlbetonarbeiten, da diese einen bedeutenden wirtschaftlichen Einfluss in nahezu allen Bauprojekten aufweisen. Weiters soll gezeigt werden, dass die Einbeziehung von Unsicherheiten auch in anderen Bereichen, wie beispielsweise der Bauleistung, ein Thema ist. Zu diesem Zweck werden auch Berechnungen über die Anzahl der Transporte für die Stahlbetonarbeiten mit Hilfe der Monte-Carlo Methode durchgeführt.

Ziel dieser Arbeit ist es, die Funktionsweise der Monte-Carlo Methode zu erörtern und speziell auf die Wahl von Verteilungsfunktionen und den Einsatz von Korrelationen einzugehen. Weiters wird anhand eines komplexen Hochbauprojektes die Anwendung der Methode gezeigt. Die Ergebnisse der Monte-Carlo Simulation werden mit jenen, konventionell eingesetzter Verfahren verglichen. Insgesamt werden somit 5 Berechnungsmodi für die Berechnung von Baukosten, Bauzeit und Anzahl der Transporte für Stahlbetonarbeiten gegenübergestellt.

---

<sup>8</sup> TAUTSCHNIG, A.; FRÖCH, G.; SANDER, P.: Erfahrungen mit probabilistischen Kostenermittlungen im Hochbau. In: bauaktuell - Baurecht - Baubetriebswirtschaft - Baumanagement September/2010. S. 211



## 2 Risiken bei Bauprojekten

In diesem Kapitel sollen Definitionen des Begriffs ‚Risiko‘ wiedergegeben werden. Es wird außerdem auf die Risiken bzw. Chancen bei Bauprojekten sowie auf den Umgang mit und die Bewältigung von Risiken eingegangen. Ein eigener Punkt ist den Risiken bei der Durchführung von Stahlbetonarbeiten gewidmet.

Für eine intensivere Betrachtung des Risikomanagements sei an dieser Stelle auf die Dissertationen von *Feik*<sup>9</sup> und *Wiggert*<sup>10</sup> verwiesen.

### 2.1 Risikobegriff

Der Begriff ‚Risiko‘ wird im Sprachgebrauch als Synonym für ‚Wagnis‘ oder ‚Gefahr‘ verwendet.

Er wird auch als Unterschied zwischen Realität und Möglichkeit gesehen.<sup>11</sup>

Im *Brockhaus* wird der Begriff wie folgt beschrieben:

*„[...] Verlustgefahren, Unsicherheits- und Zufälligkeitsfaktoren, die mit jeder wirtsch. Tätigkeit verbunden sind. Unterschieden werden natürl. Risiken (z.B. Sturmschäden), techn. Risiken (z.B. Produktionsmängel), soziale Risiken (z.B. Fluktuation), persönl. Risiken (z.B. Krankheit), polit. Risiken (z.B. Verstaatlichung) und bes. Marktrisiken (z.B. Konjunkturreinbruch, Branchenkrise). [...]“<sup>12</sup>*

Die ÖNORM B 1801-1:2009 beschreibt Risiken als

*„Unwägbarkeiten und Unsicherheiten bei Planungen, Ermittlungen und Prognosen“<sup>13</sup>*

In der ÖNORM ISO 31000:2010 wird ein Risiko als eine

*„Auswirkung von Unsicherheit auf Ziele“<sup>14</sup>*

beschrieben. Wobei unter einer Auswirkung sowohl eine positive als auch eine negative Abweichung von Erwartungen verstanden wird. Als Unsicherheit wird in diesem Zusammenhang ein Zustand beschrieben, der sich aus dem gänzlichen oder teilweisen Fehlen von Informationen, Verständnis oder Wissen über ein Ereignis, seine Auswirkung oder seine Wahrscheinlichkeit ergibt.<sup>15</sup>

<sup>9</sup> FEIK, R.: Elektronisch gestütztes Risikomanagement im Bauwesen - Ein Konzept eines elektronischen Chancen- und Gefahrenmanagementsystems für Auftraggeber. Dissertation. S. 9ff

<sup>10</sup> WIGGERT, M.: Risikomanagement von Betreiber- und Konzessionsmodellen. Dissertation. S. 9ff

<sup>11</sup> Vgl. MARKOWITZ, J.: Kommunikation über Risiken. In: Schweizerische Zeitschrift für Soziologie 1990. S. 386f

<sup>12</sup> F.A. BROCKHAUS GMBH: Brockhaus in fünfzehn Bänden. S. 464 Band 11

<sup>13</sup> AUSTRIAN STANDARDS INSTITUTE: ÖNORM B 1801-1: Bauprojekt- und Objektmanagement - Teil 1: Objektterrichtung. S. 4

<sup>14</sup> AUSTRIAN STANDARDS INSTITUTE: ÖNORM ISO 31000: Risikomanagement - Grundsätze und Richtlinien. S. 6

<sup>15</sup> Vgl. AUSTRIAN STANDARDS INSTITUTE: ÖNORM ISO 31000: Risikomanagement - Grundsätze und Richtlinien. S. 6



Wiggert führt dazu folgendes an:

*„Risiko ist der Einfluss von Unsicherheiten auf die Performance<sup>16</sup>, ausgehend von bewusst oder unbewusst gesetzten Zielen. Eine potentielle Steigerung der relativen Performance wird als Chance und eine potentielle Verminderung als Wagnis bezeichnet.“<sup>17</sup>*

Ein ‚Risiko‘ beschreibt also den möglichen negativen Ausgang eines Ereignisses. Es ist dabei aber zu beachten, dass auch ein positiver Ausgang möglich ist, der dann meist als ‚Chance‘ beschrieben wird. Chancen und Gefahren stellen somit die positiven bzw. negativen Abweichungen von einem geplanten Soll dar (siehe Bild 2–1).

Diese Chance ist es, auf die Unternehmen setzen, wenn sie Risiken eingehen. Eine ganzheitliche Vermeidung von Risiken ist weder realistisch, noch sollte es das Ziel eines Unternehmens sein. Wohl aber muss man sich der Risiken bewusst sein und diese vor einer Entscheidung abwägen. Dieser Umgang mit Risiken wird als ‚Risikomanagement‘ bezeichnet und ist aus dem wirtschaftlichen Geschehen nicht mehr wegzudenken.

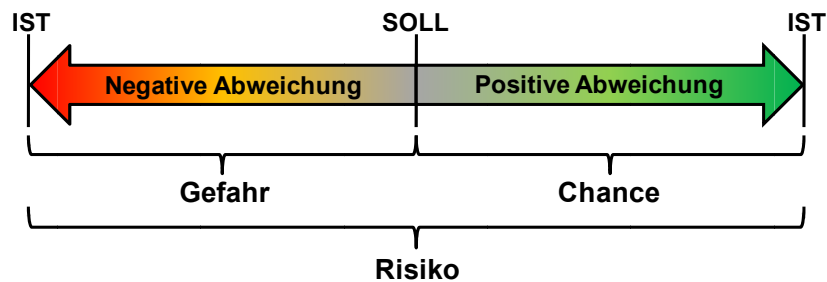


Bild 2–1 Risikodefinition [eigene Abbildung in Anlehnung an Fleming/Netzker/Schöttle<sup>18</sup>]

Im Bauwesen werden als Risiken auf Unternehmensebene meist die Abweichungen vom angestrebten Umsatz/Gewinn und auf Projektebene die Abweichungen bei Kosten, Terminen, Qualität und Funktionalität gesehen.<sup>19</sup>

## 2.2 Einteilung der Risiken

Zur strukturierten Erfassung von Risiken werden die sogenannten Einzelrisiken zu Risikoarten zusammengefasst. Dies hat auch den Vorteil, dass man sich beim Umgang mit bestimmten Risikoarten der Hilfe von Fachleuten bedienen kann. Eine Gliederung der Risiken nach deren Auswirkungen (z.B. finanzielle, terminliche, qualitative Folgen etc.) ist nicht sinnvoll, da ein Risikoeintritt oft mehrere Auswirkungen nach sich zieht (z.B. eine Massenänderung zieht sowohl terminliche als auch finanzielle Folgen nach sich). Nach Girmscheid/Busch ist eine Einteilung der Risikoarten nach gleichen Ursachen der Einzelrisiken

<sup>16</sup> Unter Performance wird in diesem Zusammenhang ein Maß der Zielerreichung verstanden.

<sup>17</sup> WIGGERT, M.: Risikomanagement von Betreiber- und Konzessionsmodellen. Dissertation. S. 114

<sup>18</sup> Vgl. FLEMMING, C.; NETZKER, M.; SCHÖTTLE, A.: Probabilistische Berücksichtigung von Kosten- und Mengenrisiken in der Angebotskalkulation. In: Bautechnik 88 - Heft 2 02/2011. S. 95

<sup>19</sup> Vgl. GIRMSCHIED, G.; BUSCH, T.: Konzept eines ganzheitlichen, quantitativen Risikomanagementmodells für Life-Cycle orientierte Gesamtleistungsanbieter. In: Baubetrieb und Bauwirtschaft - Festschrift Prof. Gert Stadler. S. 62

zielführender. Jene Bereiche, in denen die Risikoursachen liegen, werden als Risikofelder bezeichnet. Der Zusammenhang zwischen Einzelrisiken, Risikoarten und Risikofeldern wird in Bild 2–2 dargestellt.<sup>20</sup>

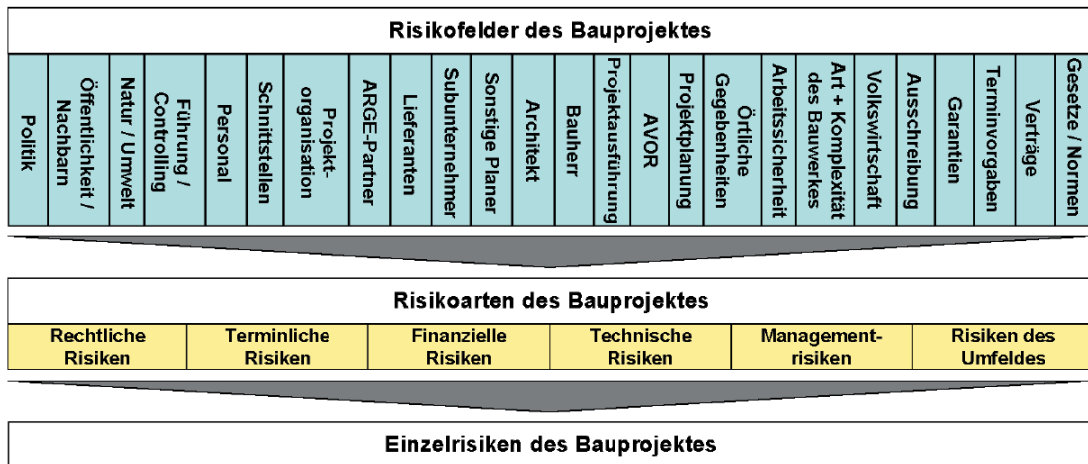


Bild 2–2 Zusammenhang zwischen Einzelrisiken, Risikoarten und Risikofeldern [Girmscheid/Busch<sup>21</sup>]

## 2.3 Umgang mit Risiken – Risikomanagement (RM)

Die Reihe der ON-Regeln 4900x:2010 sowie die dazugehörige ÖNORM ISO 31000:2010<sup>22</sup> befassen sich mit dem Risikomanagement und den damit verbundenen Prozessen. In Bild 2–3 ist beispielhaft ein Risikomanagementprozess dargestellt. Zu beachten ist, dass es sich dabei um einen iterativen Prozess handelt, der in Form eines Regelkreises aufgebaut ist. Umgelegt auf ein Bauprojekt ist dies auch durchaus schlüssig, da im Verlauf eines solchen Vorhabens unzählige Entscheidungen getroffen werden müssen, sich aber in der Rohbauphase andere Risiken ergeben als beispielsweise im Ausbau oder während der Nutzung.

Die Betrachtung von Unsicherheiten bei Stahlbetonarbeiten, bezogen auf Baukosten, Bauzeit und Anzahl der Transporte, ist dem Prozess der Risikobeurteilung – spezieller der Risikoanalyse und Risikobewertung – zuzuordnen.

<sup>20</sup> Vgl. GIRMSCHIED, G.; BUSCH, T.: Risikomanagement in Bauunternehmen - Projektrisikomanagement in der Angebotsphase. In: Bauingenieur 12/2003. S. 572

<sup>21</sup> GIRMSCHIED, G.; BUSCH, T.: Risikomanagement in Bauunternehmen - Projektrisikomanagement in der Angebotsphase. In: Bauingenieur 12/2003. S. 572

<sup>22</sup> Vgl. AUSTRIAN STANDARDS INSTITUTE: ÖNORM ISO 31000: Risikomanagement - Grundsätze und Richtlinien. S. 6ff

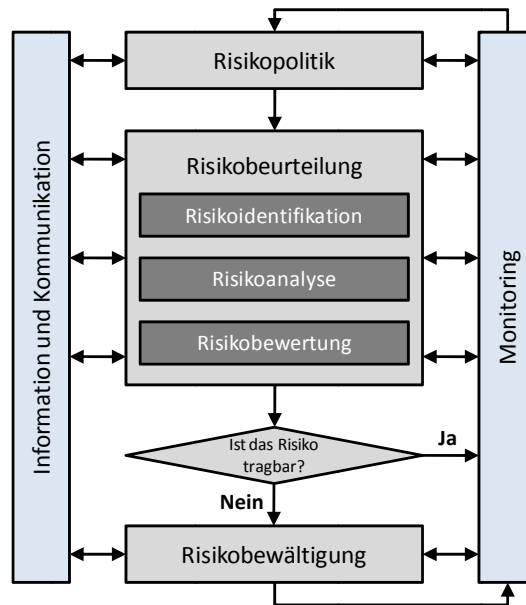


Bild 2–3 Risikomanagementprozess [in Anlehnung an die ÖNORM ISO 31000:2010<sup>23</sup> und die ÖNR 49001:2010<sup>24</sup>]

### 2.3.1 Risikopolitik

Bevor überhaupt mit der Identifikation und Betrachtung der Risiken begonnen wird, wird die Risikopolitik, also die Risikobereitschaft, festgelegt. Es werden dabei grundsätzliche Fragen der Strategie und KO-Kriterien bzw. ‚Go- und No-Go-Kriterien‘ für das gesamte Unternehmen oder aber für ein spezielles Projekt erarbeitet. So kann die Bearbeitung eines Projektes bereits an dieser Stelle abgebrochen werden. Die Risikopolitik ist meist die Aufgabe der Geschäftsleitung, sollte aber für alle Beteiligten schriftlich festgehalten werden, um ein Risikobewusstsein zu schaffen und eine Risikokultur im Unternehmen zu etablieren.<sup>25 26</sup>

### 2.3.2 Risikobeurteilung

Zum Bereich der Risikobeurteilung zählen sämtliche Prozessbestandteile der Risikoidentifikation, Risikoanalyse und Risikobewertung.

<sup>23</sup> Vgl. AUSTRIAN STANDARDS INSTITUTE: ÖNORM ISO 31000: Risikomanagement - Grundsätze und Richtlinien. S. 20

<sup>24</sup> Vgl. AUSTRIAN STANDARDS INSTITUTE: ONR 49001: Risikomanagement für Organisationen und Systeme - Risikomanagement - Umsetzung von ISO 31000 in die Praxis. S. 13

<sup>25</sup> Vgl. GIRMSCHIED, G.; BUSCH, T.: Risikomanagement in Bauunternehmen - Projektrisikomanagement in der Angebotsphase. In: Bauingenieur 12/2003. S. 572

<sup>26</sup> Vgl. LINK, D.; STEMPKOWSKI, R.: Grundlagen, praktische Anwendungen und Nutzen des Risikomanagements im Bauwesen. In: Risikomanagement in der Bauwirtschaft - Baubetriebs- und Bauwirtschaftssymposium 02. April 2004 - Tagungsband. S. 3

### 2.3.2.1 Risikoidentifikation

Ziel der Risikoidentifikation (oder auch Risikoerkennung) ist es, alle relevanten Risiken eines Projektes aufzuzeigen, denn

*„Nur erkannte Risiken können bewertet und im weiteren Entscheidungsprozeß berücksichtigt werden.“<sup>27</sup>*

Dafür steht eine Vielzahl an Instrumenten zur Verfügung – hier seien nur folgende angeführt:

- Pondering<sup>28</sup>
- Strukturierte Analyse der Projektunterlagen
- Mitarbeiterbefragungen
- Brainstorming/-writing
- Checklisten

Ein Beispiel für eine Risikocheckliste ist in Bild 2–4 dargestellt.

RISIKOART	Bemerkung Erläuterung Risiko- ursache <small>Risikoszenario</small>	Risiko- sphäre	Maß- nahmen erforder- lich ??	Verant- wort- licher	Termin <small>bis wann durchzu- führen?</small>	RISIKOEINSCHÄTZUNG				
						Eintritts- wahr- schein- lichkeit W (Pkt.)	Auswirkung Kosten A <sub>K</sub> (Pkt.)	Auswirkung Zeit A <sub>Z</sub> (Pkt.)	RISIKO R	
									Kosten <small>R=WxA<sub>K</sub></small>	Zeit <small>R=WxA<sub>Z</sub></small>
Risiko 1 ....										
Risiko 2 ....										

**Bild 2–4 Beispiel einer Risikocheckliste mit zusätzlicher Tabelle zur Risikoeinschätzung [Link/Stempkowski<sup>29</sup>]**

### 2.3.2.2 Risikoanalyse

Um ein Verständnis für die identifizierten Risiken zu schaffen, wird eine Risikoanalyse durchgeführt, bei der untersucht wird, welche Strategien und Methoden der Risikobewältigung am besten geeignet sind. Im Zuge der Risikoanalyse werden weiters die Ursachen und Quellen der Risiken, ihre positiven und negativen Auswirkungen und die Wahrscheinlichkeiten ihres Eintretens behandelt. Abhängig vom betrachteten Risiko, dem Zweck der Risikoanalyse sowie der verfügbaren Daten, Informationen und Ressourcen können quali-

<sup>27</sup> LINK, D.; STEMPKOWSKI, R.: Grundlagen, praktische Anwendungen und Nutzen des Risikomanagements im Bauwesen. In: Risikomanagement in der Bauwirtschaft - Baubetriebs- und Bauwirtschaftssymposium 02. April 2004 - Tagungsband. S. 3

<sup>28</sup> Pondering (engl. Grübeleien) ist die einfachste intuitive und unstrukturierte Methode um Risiken zu identifizieren. Es werden lediglich eine Person, ein Stift, Papier und die Projektunterlagen benötigt.

<sup>29</sup> LINK, D.; STEMPKOWSKI, R.: Grundlagen, praktische Anwendungen und Nutzen des Risikomanagements im Bauwesen. In: Risikomanagement in der Bauwirtschaft - Baubetriebs- und Bauwirtschaftssymposium 02. April 2004 - Tagungsband. S. 3

tative, halb-quantitative und quantitative Methoden für unterschiedliche Betrachtungstiefen eingesetzt werden.<sup>30</sup>

Qualitativ werden Risiken mit Hilfe von Matrizen beschrieben, wenn der Kenntnisstand über Eintrittswahrscheinlichkeiten und Schadensausmaß von Risiken sehr gering ist. Die Bewertung wird dann anhand von Erfahrungen bei vergangenen Projekten oder durch Einschätzungen von Experten durchgeführt.<sup>31</sup>

In Bild 2–5 bezeichnet beispielsweise „R1“ ein unwahrscheinliches und unwesentliches, „R2“ ein wahrscheinliches aber geringfügiges, „R3“ ein zwar unwahrscheinliches aber kritisches und „R4“ ein häufiges und katastrophales Risiko.

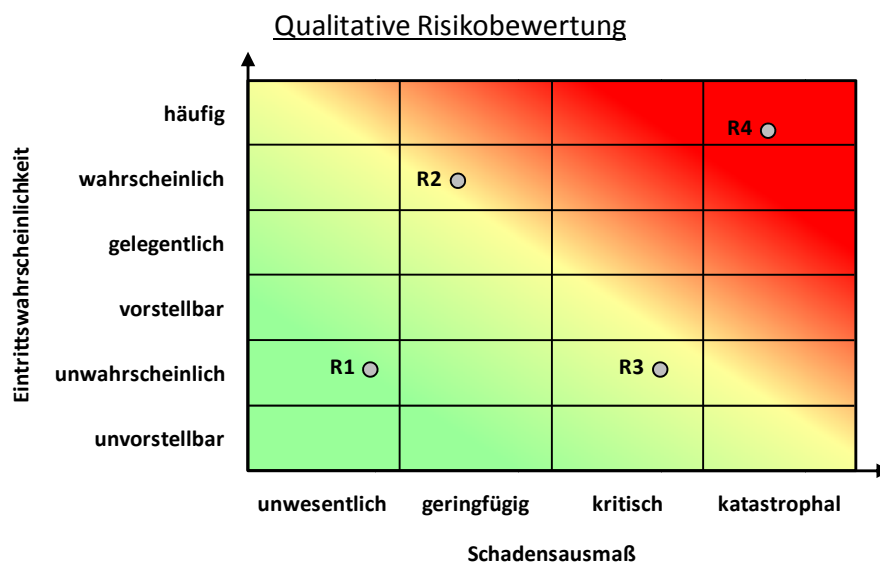


Bild 2–5 Qualitative Bewertung von Risiken [in Anlehnung an Link/Stempkowski<sup>32</sup>]

Um Risiken zu quantifizieren, können sie als Produkt des Schadensausmaßes und der jeweiligen Eintrittswahrscheinlichkeit beschrieben werden:

$$R = x \cdot p \quad (1)$$

- ♦ R Risiko
- ♦ x Schadensausmaß [Geld- und/oder Zeiteinheiten]
- ♦ p Eintrittswahrscheinlichkeit [%]

<sup>30</sup> Vgl. AUSTRIAN STANDARDS INSTITUTE: ONR 49001: Risikomanagement für Organisationen und Systeme - Risikomanagement - Umsetzung von ISO 31000 in die Praxis. S. 24

<sup>31</sup> Vgl. LINK, D.; STEMPKOWSKI, R.: Grundlagen, praktische Anwendungen und Nutzen des Risikomanagements im Bauwesen. In: Risikomanagement in der Bauwirtschaft - Baubetriebs- und Bauwirtschaftssymposium 02. April 2004 - Tagungsband. S. 4

<sup>32</sup> Vgl. LINK, D.; STEMPKOWSKI, R.: Grundlagen, praktische Anwendungen und Nutzen des Risikomanagements im Bauwesen. In: Risikomanagement in der Bauwirtschaft - Baubetriebs- und Bauwirtschaftssymposium 02. April 2004 - Tagungsband. S. 6

Durch die quantitative Betrachtung der Einzelrisiken werden die jeweiligen Auswirkungen auf Termine und Kosten ersichtlich und die Risiken auf eine einheitliche Bewertungsgröße (Geld und/oder Zeiteinheiten) gebracht.<sup>33</sup>

Die Schwierigkeit bei diesen Risikobewertungen ist es, die Risiken (die über verschiedene Methoden wie Checklisten, Brainstorming, Pondering etc. ermittelt wurden) den jeweiligen Kategorien (bei der qualitativen Beurteilung) zuzuordnen bzw. skalare Werte für Schadensausmaß und Eintrittswahrscheinlichkeit (bei der quantitativen Beurteilung) festzulegen.

### 2.3.2.3 Risikobewertung

*„Die Risikobewertung dient auf der Grundlage der Ergebnisse der Risikoanalyse zur Unterstützung der Entscheidungsfindung über die Notwendigkeit und über die Prioritäten der Risikobewältigung.“<sup>34</sup>*

Nach der quantitativen Beurteilung haben die Risiken, aufgrund der Multiplikation der Eintrittswahrscheinlichkeit mit dem Schadensausmaß (Glg. (1)), unterschiedliche Bedeutung für das Projekt. Auf Basis dieser Analyse können in einem weiteren Schritt jene Risiken, die die größte Bedeutung für das Projekt haben, im Zuge der Risikobewältigung weiter bearbeitet werden (ABC-Analyse<sup>35</sup> ähnlich wie bei einer Angebotserstellung, bei der ca. 20 % der Positionen etwa 80 % der Auftragssumme ausmachen).<sup>36</sup>

### 2.3.3 Risikobewältigung

Je nachdem wie groß ein ermitteltes Risiko ist, können unterschiedliche Methoden der Risikobewältigung durchgeführt werden:

<sup>33</sup> Vgl. LINK, D.; STEMPKOWSKI, R.: Grundlagen, praktische Anwendungen und Nutzen des Risikomanagements im Bauwesen. In: Risikomanagement in der Bauwirtschaft - Baubetriebs- und Bauwirtschaftssymposium 02. April 2004 - Tagungsband. S. 5

<sup>34</sup> AUSTRIAN STANDARDS INSTITUTE: ÖNORM ISO 31000: Risikomanagement - Grundsätze und Richtlinien. S. 24

<sup>35</sup> ABC-Analyse beruht auf dem Grundsatz des Paretoprinzips.

<sup>36</sup> Vgl. GIRMSCHIED, G.; BUSCH, T.: Konzept eines ganzheitlichen, quantitativen Risikomanagementmodells für Life-Cycle orientierte Gesamtleistungsanbieter. In: Baubetrieb und Bauwirtschaft - Festschrift Prof. Gert Stadler. S. 67

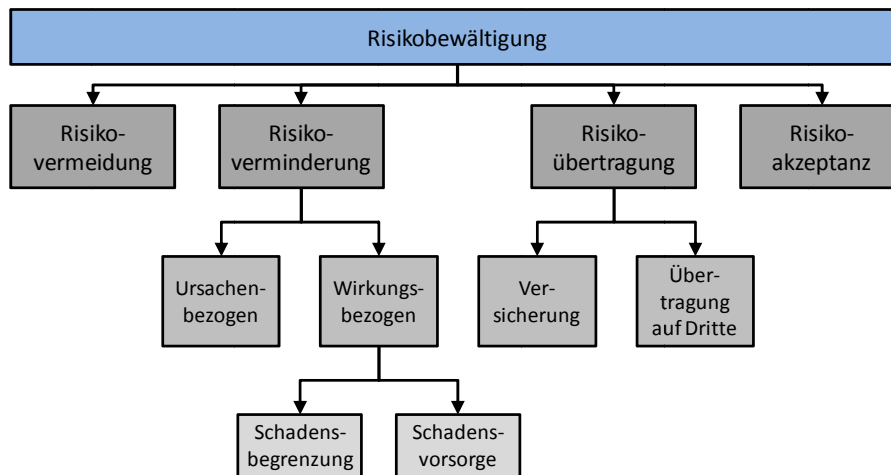


Bild 2–6 Methoden zur Risikobewältigung [in Anlehnung an *Girmscheid/Busch*<sup>37</sup>]

Bei der Risikovermeidung soll entweder das Schadensausmaß oder die Eintrittswahrscheinlichkeit auf Null gesetzt werden. Ist ein Risiko nicht zu vermeiden, so ist eine wirtschaftlich sinnvolle Risikoverminderung durchzuführen, um ein Risiko auf ein akzeptables Maß zu reduzieren. Dabei kann ursachenbezogen oder wirkungsbezogen agiert werden. Bei einer wirkungsbezogenen Risikovermeidung, kann entweder eine Schadensbegrenzung oder eine Schadensvorsorge zielführend sein.<sup>38</sup>

Risiken, die weder vermieden noch weiter vermindert werden können, müssen von einem der Projektbeteiligten getragen werden. Es kann dabei aber vertraglich eine Risikoteilung oder eine Risikoübertragung, entweder an eine Versicherung oder an Dritte (z.B. Subunternehmer) festgelegt werden. Zu beachten ist dabei, dass in beiden Fällen Kosten (entweder in Form von Versicherungsprämien oder in Form von Risikozuschlägen) anfallen.<sup>39</sup>

Eine Risikoakzeptanz kann in der Regel nur bei Risiken mit „unwesentlichem“ und „geringfügigem“ Schadensausmaß bei gleichzeitiger „unvorstellbarer“ oder „unwahrscheinlicher“ Eintrittswahrscheinlichkeit (siehe Bild 2–5) hingenommen werden.<sup>40</sup>

<sup>37</sup> Vgl. GIRMSCHIED, G.; BUSCH, T.: Risikomanagement in Bauunternehmen - Projektrisikomanagement in der Angebotsphase. In: Bauingenieur 12/2003. S. 576

<sup>38</sup> Vgl. GIRMSCHIED, G.; BUSCH, T.: Risikomanagement in Bauunternehmen - Projektrisikomanagement in der Angebotsphase. In: Bauingenieur 12/2003. S. 576

<sup>39</sup> Vgl. GIRMSCHIED, G.; BUSCH, T.: Risikomanagement in Bauunternehmen - Projektrisikomanagement in der Angebotsphase. In: Bauingenieur 12/2003. S. 576f

<sup>40</sup> Vgl. GIRMSCHIED, G.; BUSCH, T.: Risikomanagement in Bauunternehmen - Projektrisikomanagement in der Angebotsphase. In: Bauingenieur 12/2003. S. 576f

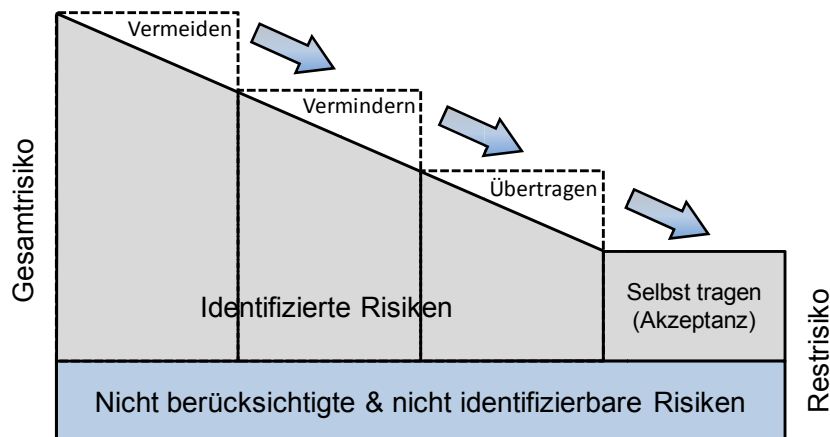


Bild 2–7 Risikobewältigung [in Anlehnung an Link/Stempkowski<sup>41</sup>]

Schließlich müssen all jene Risiken, die nicht vermieden, vermindert oder übertragen werden können, zusätzlich zu den nicht berücksichtigten bzw. nicht identifizierten Risiken, als Restrisiko selbst getragen werden (siehe Bild 2–7). Dabei kann es durchaus sein, dass auch übertragbare Risiken selbst getragen werden, da es sich dabei um die wirtschaftlichere Variante handelt (z.B. Nutzung einer Chance).<sup>42</sup>

### 2.3.4 Information und Kommunikation

Der Informationsaustausch und die Kommunikation zwischen den Beteiligten eines Projektes sollte in jeder Phase des Risikomanagementprozesses durchgeführt werden. Dazu kann ein im Vorfeld festgelegter Kommunikations- und Informationsplan verwendet werden.<sup>43</sup>

*„Eine wirkungsvolle interne und externe Kommunikation stellt sicher, dass die für die Umsetzung des Risikomanagement-Prozesses Verantwortlichen und die Stakeholder die Grundlagen, auf denen die Entscheidungen aufgebaut sind, und die Überlegungen verstehen, die spezielle Aktivitäten erforderlich machen.“<sup>44</sup>*

### 2.3.5 Risikoverfolgung – Monitoring

Das Monitoring (also die Überwachung und Überprüfung) des Risikomanagementprozesses bezieht sich auf jeden Teilbereich und umfasst regelmäßige Kontrollen. Diese können

<sup>41</sup> Vgl. LINK, D.; STEMPKOWSKI, R.: Grundlagen, praktische Anwendungen und Nutzen des Risikomanagements im Bauwesen. In: Risikomanagement in der Bauwirtschaft - Baubetriebs- und Bauwirtschaftssymposium 02. April 2004 - Tagungsband. S. 8

<sup>42</sup> Vgl. LINK, D.; STEMPKOWSKI, R.: Grundlagen, praktische Anwendungen und Nutzen des Risikomanagements im Bauwesen. In: Risikomanagement in der Bauwirtschaft - Baubetriebs- und Bauwirtschaftssymposium 02. April 2004 - Tagungsband. S. 8

<sup>43</sup> Vgl. AUSTRIAN STANDARDS INSTITUTE: ONR 49001: Risikomanagement für Organisationen und Systeme - Risikomanagement - Umsetzung von ISO 31000 in die Praxis. S. 13

<sup>44</sup> AUSTRIAN STANDARDS INSTITUTE: ONR 49001: Risikomanagement für Organisationen und Systeme - Risikomanagement - Umsetzung von ISO 31000 in die Praxis. S. 13



periodisch oder bei gegebenen Anlässen durchgeführt werden. Ziel ist es dabei, aus Ereignissen, Veränderungen, Trends, Erfolgen und Misserfolgen zu lernen, um noch im Verlauf des Projektes Steuerungsmaßnahmen ergreifen zu können. Es kann durchaus vorkommen, dass sich mit zunehmender Projektdauer die Risikokriterien bzw. die Risiken selbst (Eintrittswahrscheinlichkeit und Schadensausmaß) verändern und dadurch Änderungen in der Risikobewältigung oder in der Prioritätenreihung ergeben. Eine kontinuierliche Risikoverfolgung hilft auch neu entstehende Risiken zu erkennen bzw. weitere Informationen und Verbesserungen für die Risikobeurteilung zu gewinnen.<sup>45</sup>

Um die Ergebnisse des Monitorings bzw. der laufenden Überwachung und Überprüfung für alle Beteiligten transparent zu halten, ist auf eine angemessene Dokumentation und Kommunikation sowohl intern als auch extern zu achten.<sup>46</sup>

### 2.3.6 Risikonachbetrachtung

So wie es bei der Kalkulation üblich ist (oder zumindest sein sollte), eine Nachkalkulation durchzuführen, so sollte auch im Zuge des Risikomanagements eine Nachbetrachtung erfolgen. Durch die Anwendung eines Soll-Istvergleiches werden dabei die tatsächlich aufgetretenen mit den prognostizierten Risiken verglichen. Weiters ist es sinnvoll das gesamte Risikomanagementsystem zu analysieren, um festzustellen wie Risiken erkannt wurden und wie mit ihnen im Verlauf des Projektes umgegangen wurde.<sup>47</sup>

In weiterer Folge können aus der Risikonachbetrachtung Erkenntnisse für neue Projekte gewonnen und Verbesserungen im Risikomanagementsystem durchgeführt werden.

## 2.4 Risiken bei Stahlbetonarbeiten

Die wirtschaftliche Bedeutung der Stahlbetonarbeiten ist vor allem in der Phase des Rohbaus enorm. *Hofstadler* errechnete die Einzelkosten der Stahlbetonarbeiten für Österreich im Jahre 2006 mit rund 3,6 Mrd. € und für Deutschland im Jahre 2001 mit ca. 17,2 Mrd. €.<sup>48</sup>

Es soll daher näher auf die Risiken im Bereich der Stahlbetonarbeiten eingegangen werden.

Für die Schalungsarbeiten gibt *Hofstadler* folgende Risiken an:<sup>49</sup>

- Ästhetische Risiken
- Baubetriebliche Risiken

<sup>45</sup> Vgl. AUSTRIAN STANDARDS INSTITUTE: ONR 49001: Risikomanagement für Organisationen und Systeme - Risikomanagement - Umsetzung von ISO 31000 in die Praxis. S. 26

<sup>46</sup> Vgl. AUSTRIAN STANDARDS INSTITUTE: ONR 49001: Risikomanagement für Organisationen und Systeme - Risikomanagement - Umsetzung von ISO 31000 in die Praxis. S. 27

<sup>47</sup> Vgl. LINK, D.; STEMPKOWSKI, R.: Grundlagen, praktische Anwendungen und Nutzen des Risikomanagements im Bauwesen. In: Risikomanagement in der Bauwirtschaft - Baubetriebs- und Bauwirtschaftssymposium 02. April 2004 - Tagungsband. S. 10

<sup>48</sup> Vgl. HOFSTADLER, C.: Schararbeiten - Technologische Grundlagen, Sichtbeton, Systemauswahl, Ablaufplanung, Logistik und Kalkulation. S. 27 und 33

<sup>49</sup> Vgl. HOFSTADLER, C.: Schararbeiten - Technologische Grundlagen, Sichtbeton, Systemauswahl, Ablaufplanung, Logistik und Kalkulation. S. 354

- Bauwerksbedingte Risiken
- Bauwirtschaftliche Risiken
- Sicherheitsbezogene Risiken
- Technische Risiken
- Umwelt- und umfeldspezifische Risiken

Diese können als Risikoarten laut Bild 2–2 angesehen werden. Dementsprechend sind nachstehende Einzelrisiken je Risikoart denkbar:

Risiken bei Stahlbetonarbeiten						
Ästhetische Risiken	Baubetriebliche Risiken	Bauwirtschaftliche Risiken	Sicherheits-technische Risiken	Technische Risiken	Umweltrisiken	Umfeldrisiken
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Porigkeit</li> <li>- Arbeitsfugen</li> <li>- Ebenheit</li> <li>- Struktur</li> <li>- Kantenausbildung</li> <li>- Farbgleichheit</li> <li>- Ankerbild</li> <li>- Fugenbild</li> <li>- etc.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Termine</li> <li>- Mengen</li> <li>- Qualität</li> <li>- Tägliche Leistung</li> <li>- Aufwandswerte</li> <li>- AK-Anzahl</li> <li>- Logistik</li> <li>- etc.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Materialkosten</li> <li>- Mietsätze</li> <li>- Lohnniveau</li> <li>- Gerätekosten</li> <li>- Produktivität</li> <li>- Aufwandswerte</li> <li>- Terminverzug</li> <li>- Kranauslastung</li> <li>- etc.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Länderspezifische Anforderungen</li> <li>- Windanfälligkeit</li> <li>- Sonderteile für Sicherheitsanforderungen</li> <li>- etc.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Lastableitung</li> <li>- Frischbetondruck</li> <li>- Fugendichtheit</li> <li>- Auftrieb</li> <li>- Einbau</li> <li>- Bewehrung</li> <li>- etc.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Topografische Bedingungen</li> <li>- Geografische Bedingungen</li> <li>- Geologische Bedingungen</li> <li>- Klima</li> <li>- etc.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Behörden</li> <li>- AG</li> <li>- Subunternehmer</li> <li>- Anrainer</li> <li>- etc.</li> </ul>

Bild 2–8 Risiken bei Stahlbetonarbeiten [in Anlehnung an Hofstadler<sup>50</sup>]

<sup>50</sup> Vgl. HOFSTADLER, C.: Schalarbeiten - Technologische Grundlagen, Sichtbeton, Systemauswahl, Ablaufplanung, Logistik und Kalkulation. S. 350ff

### 3 Ermittlung von Baukosten für Stahlbetonarbeiten

In diesem Kapitel soll auf die Kostentoleranzen und Kostenermittlungsverfahren eingegangen werden. Außerdem werden die Berechnungsgleichungen, die für die Ermittlung der Baukosten für Stahlbetonarbeiten erforderlich sind, getrennt nach Grob- und Detailkalkulation vorgestellt.

#### 3.1 Allgemeines

Die Ermittlung der Bauqualität, Baukosten und Bauzeit (Qualität, Kosten und Termine) erfolgt üblicherweise in Abhängigkeit von der jeweiligen Projektphase in unterschiedlichen Detaillierungsgraden. Die ÖNORM B 1801-1:2009 gibt dafür ein Planungssystem vor:

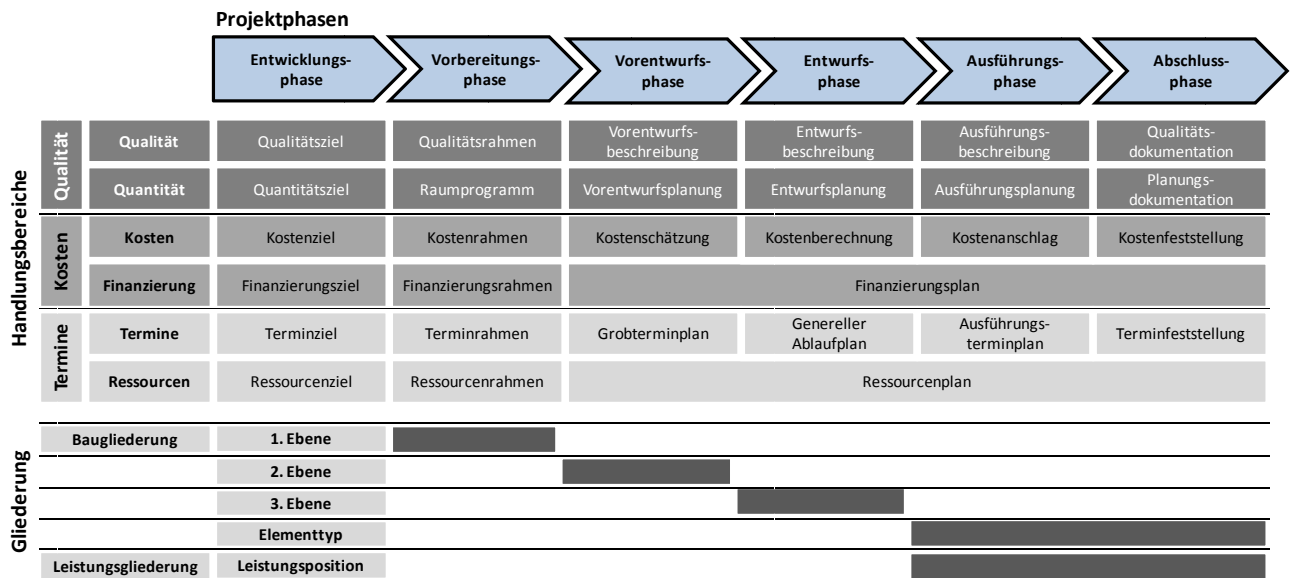


Bild 3–1 Planungssystem lt. ÖNORM B 1801-1:2009<sup>51</sup>

Es ist dabei zu erkennen, dass je nach Projektphase unterschiedliche Gliederungsebenen für die Qualitäts-, Termin- und Kostenermittlung herangezogen werden.

#### 3.2 Kostentoleranz

Die Berechnung eines einzelnen Kostenwertes im Zuge der Kostenplanung stellt die Vortäuschung einer Genauigkeit dar, die nicht erreicht werden kann. So wie eine statische Berechnung im Grunde auch nur ein theoretisch absolut ‚richtiges‘ Ergebnis liefert (Streuungen von Materialkennwerten, Belastungen und Verarbeitungsmängeln) so ist auch eine

<sup>51</sup> Vgl. AUSTRIAN STANDARDS INSTITUTE: ÖNORM B 1801-1: Bauprojekt- und Objektmanagement - Teil 1: Objekterrichtung. S. 5

Kostenberechnung von Unschärfen geprägt. In der Statik werden solche Unsicherheiten durch den Einsatz des semiprobabilistischen Sicherheitskonzepts abgedeckt. In der Kostenplanung kann ein Teil dieser Unsicherheiten durch Puffer berücksichtigt werden.<sup>52</sup>

Die Kostenberechnung kann mit einem Dartspiel verglichen werden, bei dem immer besser in die Mitte der Scheibe getroffen wird, je näher man bei ihr steht. Eine Prognose/Berechnung der endgültigen Kosten wird also immer genauer, je mehr man sich dem Projektende und somit der Kostenfeststellung nähert.

In Bild 3–2 sind die Toleranzbereiche getrennt, in eine professionelle Kostenplanung und in jene, ab denen ein Planer bei Überschreitung Haftungskonsequenzen laut deutscher Judikatur zu erwarten hat, dargestellt.

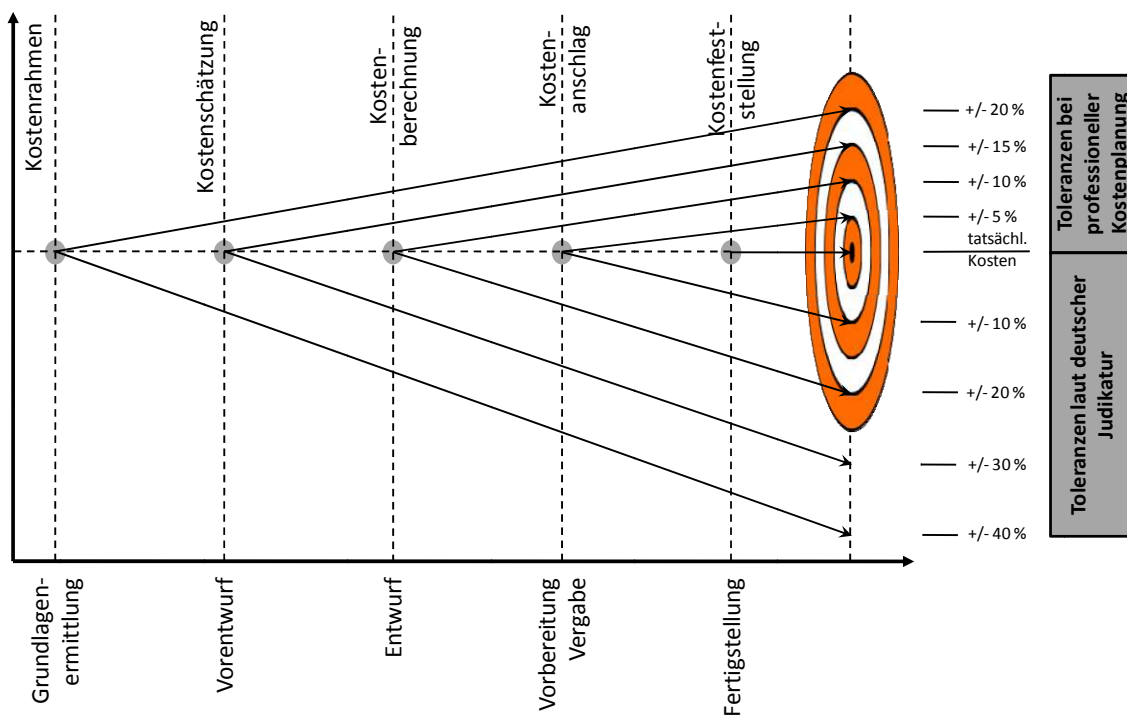


Bild 3–2 Kostentoleranzen [in Anlehnung an Lechner/Liebenau<sup>53</sup>]

Aus diesem Grund ist es sinnvoll nicht nur eine Zahl für die ermittelten Kosten anzugeben, sondern eine Aussage darüber zu treffen, mit welcher Wahrscheinlichkeit ein bestimmter Kostenwert erreicht wird. Liegen nur wenige Informationen über das Projekt vor, so sollte zumindest eine Bandbreite angegeben werden.

Raaber gibt im Zuge der Angebotsermittlung an, dass die Vorstellung einer ‚exakten‘ Baupreisermittlung falsch ist und im Grunde nur eine Abschätzung der zukünftigen Kosten an-

<sup>52</sup> Vgl. HOFSTADLER, C.: Berechnung der Bauzeit - Systematischer Umgang mit Projektunsicherheiten. In: Netzwerk Bau Fachzeitschrift für Baumanagement und Bauwirtschaft - Wissen & Visionen - Chancen zur erfolgreichen Projektentwicklung erkennen und umsetzen - Fachsymposium 10 Jahre Netzwerk Bau - Tagungsband 11/2011. S. 32f

<sup>53</sup> Vgl. LECHNER, H.; LIEBENAU, S.: PM Teil 7a - Kostenplanung. S. 17

gestellt werden kann. Als Beweis dafür werden beispielhaft die weiten Streuungen von Angebotsergebnissen genannt, wobei fast jeder Bieter im Vorhinein davon überzeugt ist den ‚richtigen‘ Preis abgegeben zu haben. Unsicherheiten treten bereits bei der Ermittlung eines Mittellohnpreises auf und erreichen bei der Festlegung von Leistungsansätzen (und somit auch bei Aufwandswerten) ihren Höhepunkt. Diese können durch die Tatsache, dass jedes Gebäude ein Unikat ist, nur innerhalb von gewissen Grenzen angegeben werden.<sup>54</sup>

### 3.3 Kostenermittlungsverfahren

Je nach Planungstiefe und Fortschritt des Projektes sind Kostenplanungen mit unterschiedlicher Detaillierung notwendig. Dafür stehen verschiedene Verfahren zur Verfügung.

#### 3.3.1 Nutzungsbezogene Verfahren

Solche Verfahren finden vor allem in frühen Projektphasen Anwendung und dienen für einen ersten kostenmäßigen Anhaltspunkt. Die Kostenermittlung orientiert sich dabei an projektspezifischen Einheiten wie €/Tiefgaragenstellplatz, €/Krankenhausbett, €/Arbeitsplatz oder allgemeiner: € je Nutzungseinheit.<sup>55</sup>

#### 3.3.2 Bauwerksbezogene Verfahren

Die bauwerksbezogenen Verfahren bedienen sich der vorliegenden Informationen aus der Objektplanung. Es werden geometrische Größen des zu errichtenden Objektes herangezogen und mit Kostenkennwerten multipliziert. Als Beispiele für solche geometrischen Größen seien hier der Brutto-Rauminhalt (BRI) und die Brutto-Grundfläche (BGF) genannt (die Ermittlung erfolgt nach ÖNORM B 1800:2010 bzw. DIN 277:2005).<sup>56</sup>

Als ‚Lieferant‘ für Kostenkennwerte kann das BKI (Baukosteninformationszentrum Deutscher Architektenkammern GmbH) genannt werden. Aus einer Datenbank können Baukosten ‚ähnlicher‘ Projekte entnommen werden und auf das zu bearbeitende Objekt umgelegt werden. Problematisch ist dabei die Vergleichbarkeit von 2 Projekten, da es sich ja bei jedem Bauwerk um ein Unikat handelt.<sup>57</sup>

<sup>54</sup> Vgl. RAABER, N.: Schriftenreihe des Instituts für Baubetrieb und Bauwirtschaft - Heft 15: Beitrag zu Ausschreibung und Vergabe von Bauleistungen. S. 163

<sup>55</sup> Vgl. LECHNER, H.; LIEBENAU, S.: PM Teil 7a - Kostenplanung. S. 23

<sup>56</sup> Vgl. BLECKEN, U. et al.: Kosten im Hochbau - Praxis-Handbuch und Kommentar zur DIN 276 - Baukostenplanung, Projektentwicklung, Nutzungskosten, Recht. S. 106f

<sup>57</sup> Vgl. LECHNER, H.; LIEBENAU, S.: PM Teil 7a - Kostenplanung. S. 23

### 3.3.3 Ausführungsorientierte Verfahren

Bei den ausführungsorientierten Verfahren wird das Bauwerk z.B. in Leistungsgruppen (LG) oder gar in Unterleistungsgruppen (ULG) eingeteilt. Die Kostenermittlung folgt somit getrennt für z.B. Beton- und Stahlbetonarbeiten, Mauerarbeiten, Natursteinarbeiten usw.<sup>58</sup>

### 3.3.4 Bauelementeverfahren

Ziel der Bauelementeverfahren ist die Aufgliederung des Objektes in Grobelemente (z.B. Innenwände) und in einer weiteren Ebene in Bauelemente (z.B. tragende Innenwände, nichttragende Innenwände, Innenstützen etc.).<sup>59</sup>

### 3.3.5 Mischverfahren

Weitere Methoden mit unterschiedlichsten Gliederungs- und Detaillierungsgraden sind in der Praxis je nach Fachgebiet (z.B. Tunnelbau, Infrastrukturwesen etc.) verbreitet.

### 3.3.6 Analyse der Kostenermittlungsverfahren

Als kritisch bei den dargestellten Kostenermittlungsverfahren ist die teilweise unterschiedliche Gliederung eines Bauobjektes anzusehen (Positionen, Bauelemente etc.). Somit sind im Laufe des Projektfortschritts eine oder mehrere Umgliederungen notwendig, was den Arbeitsaufwand deutlich erhöht. Weiters ist die differenzierte Baugliederung der ÖNORM B 1801-1:2009 und der DIN 276:2008 anzumerken (siehe Bild 3–3).<sup>60</sup>

Die gegenständliche Arbeit beschäftigt sich ausschließlich mit der Ermittlung von Kosten, Bauzeit und Anzahl an Transporten für Stahlbetonarbeiten. Die Baugliederung erfolgt in diesem Zusammenhang zum einen ausführungsorientiert, getrennt nach Schalung, Bewehrung und Beton, und zum anderen gegliedert nach Bauteilgruppen wie beispielsweise Wände, Decken, Stützen etc.

<sup>58</sup> Vgl. LECHNER, H.; LIEBENAU, S.: PM Teil 7a - Kostenplanung, S. 24

<sup>59</sup> Vgl. BLECKEN, U. et al.: Kosten im Hochbau - Praxis-Handbuch und Kommentar zur DIN 276 - Baukostenplanung, Projektentwicklung, Nutzungskosten, Rech. S. 75 und 108f

<sup>60</sup> Vgl. LECHNER, H.; LIEBENAU, S.: PM Teil 7a - Kostenplanung, S. 25 und 66

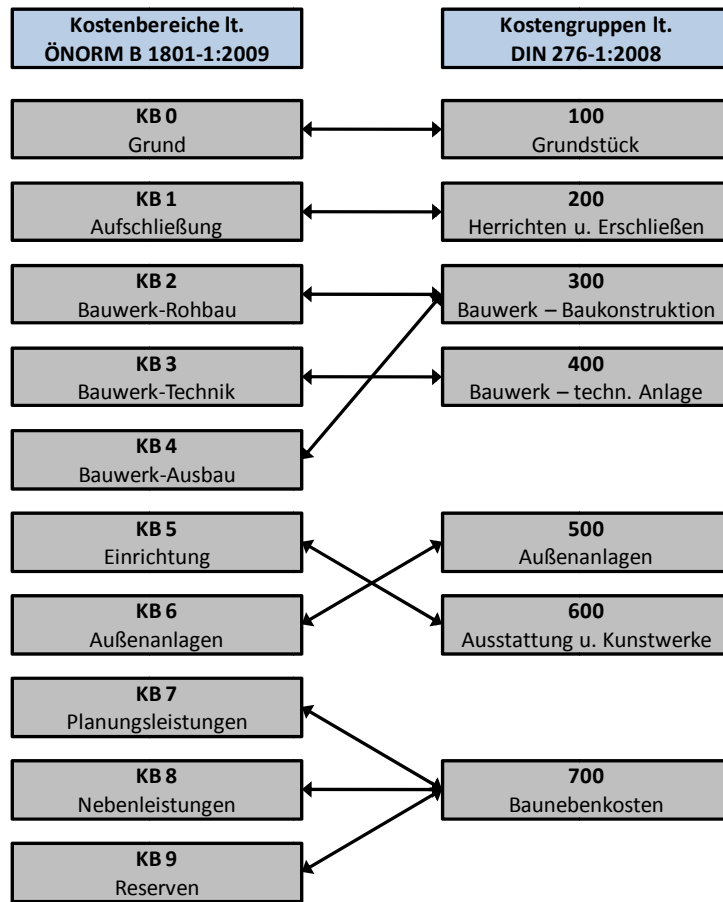


Bild 3–3 Vergleich der Kostengliederungsebenen der ÖNORM B 1801-1:2009 und der DIN 276-1:2008 [in Anlehnung an Lechner/Liebenau<sup>61</sup>]

### 3.4 Grobkalkulation

Bei der Ermittlung der Baukosten ist grundsätzlich zwischen einer Grob- und Detailkalkulation zu unterscheiden. Bei den Stahlbetonarbeiten wird so beispielsweise für die Grobkalkulation das gesamte Bauwerk, bei der Detailkalkulation die einzelnen Bauteilgruppen getrennt betrachtet.

Die Abkürzungen der verwendeten Gleichungsvariablen sind den Arbeiten von Hofstadler<sup>62</sup> nachempfunden.

Um die Einzelkosten der Stahlbetonarbeiten des gesamten Bauwerkes zu berechnen, wird folgende Gleichung herangezogen:

<sup>61</sup> Vgl. LECHNER, H.; LIEBENAU, S.: PM Teil 7a - Kostenplanung. S. 66

<sup>62</sup> Vgl. HOFSTADLER, C.: Schalarbeiten - Technologische Grundlagen, Sichtbeton, Systemauswahl, Ablaufplanung, Logistik und Kalkulation. S. 302ff, und HOFSTADLER, C.: Bauablaufplanung und Logistik im Baubetrieb. S. 109ff und HOFSTADLER, C.; FRANZL, G.: Bewehrungsarbeiten im Baubetrieb. S. 208ff

$$K_{STB,EK} = BT_{M,bwk} \cdot (AW_{STB,MW} \cdot ML_{STB,MW} + k_{STB,MW}) \quad (2)$$

Es müssen dafür die Mittelwerte für den Aufwandswert der Stahlbetonarbeiten  $AW_{STB,MW}$  [Std/m<sup>3</sup>], den Mittellohn  $ML_{STB,MW}$  [€/Std] und für die Geräte- und Materialkosten  $k_{STB,MW}$  [€/m<sup>3</sup>] (Schalung, Bewehrung und Beton) angenommen oder errechnet werden sowie die Betonmenge  $BT_{M,bwk}$  [m<sup>3</sup>] bekannt sein.

Die Geräte- und Materialkosten werden aus den Kosten für Schalung, Bewehrung und Beton nach Glg. (3) ermittelt.

$$k_{STB,MW} = k_{S,MW} \cdot s_{g,bwk} + k_{BW,MW} \cdot bw_{g,bwk} + k_{BT,MW} \quad (3)$$

Im ersten Term werden die mittleren Schalungskosten  $k_{S,MW}$  [€/m<sup>2</sup>] mit dem Schalungsgrad des Bauwerkes  $s_{g,bwk}$  [m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>] multipliziert. Im zweiten Term werden die mittleren Bewehrungskosten  $k_{BW,MW}$  [€/t] mit dem Bewehrungsgrad des Bauwerkes  $bw_{g,bwk}$  [t/m<sup>3</sup>] multipliziert. Im letzten Term werden die mittleren Geräte- und Materialkosten für den Beton  $k_{BT,MW}$  [€/m<sup>3</sup>] eingesetzt.

Unter Geräten für die Stahlbetonherstellung versteht man beispielsweise die Schalung, als Material jene Teile und Stoffe, die nur einmal eingesetzt oder im Zuge der Herstellung verbraucht bzw. Bestandteil des Bauwerks werden (z.B. Trennmittel, Hüllrohre, Beton etc.).

Die Herstellkosten für die Stahlbetonarbeiten  $K_{STB,HK}$  [€] können durch einen Zuschlag für die Baustellengemeinkosten  $ZU_{BGK}$  [%] nach Glg. (4) berechnet werden.

$$K_{STB,HK} = K_{STB,EK} \cdot \left( 1 + \frac{ZU_{BGK}}{100} \right) \quad (4)$$

Dieser Zuschlag beträgt bei strikter Trennung zwischen Einzel- und Gemeinkosten etwa 15 bis 30 %.<sup>63</sup>

Zusätzlich sollte ein Puffer für Unvorhergesehenes, Fehler, Ungenauigkeiten etc. eingerechnet werden.

*„Die Höhe des Puffers  $PU_{STB,K}$  [%] hängt unter anderem vom Projektstadium, der Bauzeit und der Komplexität des Bauwerks ab. Erfahrungsgemäß sollte der Puffer zwischen 5 und 15 % liegen.“<sup>64</sup>*

Die Herstellkosten inklusive Puffer  $K_{STB,HK,PF}$  [€] ergeben sich aus nachfolgender Gleichung:

$$K_{STB,HK,PF} = K_{STB,HK} \cdot \left( 1 + \frac{PU_{STB,K}}{100} \right) \quad (5)$$

<sup>63</sup> Vgl. HOFSTADLER, C.: Bauzeit und Baukosten für Stahlbetonarbeiten - Berechnungsmethoden und Anwendung. In: Beton- und Stahlbeton 104 (2009), Heft 5 05/2009, S. 272

<sup>64</sup> HOFSTADLER, C.: Bauzeit und Baukosten für Stahlbetonarbeiten - Berechnungsmethoden und Anwendung. In: Beton- und Stahlbeton 104 (2009), Heft 5 05/2009, S. 272



### 3.5 Detailkalkulation

In der Detailkalkulation wird das gesamte Bauwerk in seine Bauelemente bzw. Bauteilgruppen zerlegt. Ausgangspunkt für die Detailkalkulation ist wiederum die Glg. (2), jeder Eingangswert wird hier allerdings gesondert berechnet.

#### 3.5.1 Schalungsfläche $S_{F,bwk}$

Die Gesamt-Schalungsfläche  $S_{F,bwk}$  [m<sup>2</sup>] wird durch die Addition der Einzelschalflächen der unterschiedlichen Bauteile berechnet.

$$S_{F,bwk} = \sum S_{F,FU,i} + \sum S_{F,ST,i} + \sum S_{F,WD,i} + \sum S_{F,D,i} + \sum S_{F,SO,i} \quad (6)$$

In Glg. (6) werden die Summen aus den Schalungsflächen der Fundamente  $S_{F,FU,i}$  [m<sup>2</sup>], Stützen  $S_{F,ST,i}$  [m<sup>2</sup>], Wände  $S_{F,WD,i}$  [m<sup>2</sup>], Decken  $S_{F,D,i}$  [m<sup>2</sup>] und der sonstigen Bauteile  $S_{F,SO,i}$  [m<sup>2</sup>] aufaddiert.

#### 3.5.2 Bewehrungsmenge $BW_{M,bwk}$

Die Bewehrungsmenge des gesamten Bauwerks  $BW_{M,bwk}$  [t] setzt sich aus den Einzelbewehrungsmengen der Bauteile zusammen:

$$BW_{M,bwk} = \sum BW_{M,FU,i} + \sum BW_{M,ST,i} + \sum BW_{M,WD,i} + \sum BW_{M,D,i} + \sum BW_{M,SO,i} \quad (7)$$

Glg. (7) zeigt die Vorgehensweise für die Berechnung der Gesamt-Bewehrungsmenge auf Basis der Einzelbewehrungsmengen der Fundamente  $BW_{M,FU,i}$  [t], Stützen  $BW_{M,ST,i}$  [t], Wände  $BW_{M,WD,i}$  [t], Decken  $BW_{M,D,i}$  [t] und der sonstigen Bauteile  $BW_{M,SO,i}$  [t].

#### 3.5.3 Betonmenge $BT_{M,bwk}$

Die Betonmenge  $BT_{M,bwk}$  [m<sup>3</sup>] wird anhand der Einzelmengen der verschiedenen Bauteile ermittelt.

$$BT_{M,bwk} = \sum BT_{M,FU,i} + \sum BT_{M,ST,i} + \sum BT_{M,WD,i} + \sum BT_{M,D,i} + \sum BT_{M,SO,i} \quad (8)$$

In Glg. (8) werden die Betonmengen der Fundamente  $BT_{M,FU,i}$  [m<sup>3</sup>], Stützen  $BT_{M,ST,i}$  [m<sup>3</sup>], Wände  $BT_{M,WD,i}$  [m<sup>3</sup>], Decken  $BT_{M,D,i}$  [m<sup>3</sup>] und der sonstigen Bauteile  $BT_{M,SO,i}$  [m<sup>3</sup>] aufaddiert.

#### 3.5.4 Schalungsgrad $s_{g,bwk}$

Durch die Mengenberechnungen (siehe Glg. (6), (7) und (8)) kann in einem weiteren Schritt der Schalungsgrad des Gebäudes  $s_{g,bwk}$  [m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>] mit folgender Gleichung berechnet werden:

$$S_{g,bwk} = \frac{S_{F,bwk}}{BT_{M,bwk}} \tag{9}$$

### 3.5.5 Bewehrungsgrad $bw_{g,bwk}$

Auch der Bewehrungsgrad für das Bauwerk  $bw_{g,bwk}$  [t/m<sup>3</sup>] kann anhand der Mengenermittlungen errechnet werden:

$$bw_{g,bwk} = \frac{BW_{M,bwk}}{BT_{M,bwk}} \tag{10}$$

### 3.5.6 Gesamt-Aufwandswert $AW_{STB}$

Aufwandswerte sind eine der bestimmenden Größen für arbeitsintensive Tätigkeiten und werden als Lohnstundenaufwand je Einheit [Std/EH] beschrieben. Sie werden von zahlreichen Einflussfaktoren bestimmt und immer genauer, je größer die Betrachtungstiefe ist. Beispielhaft wird in Bild 3–4 ein Überblick über die bestimmenden Faktoren für die Aufwandswerte von Schalarbeiten gezeigt.

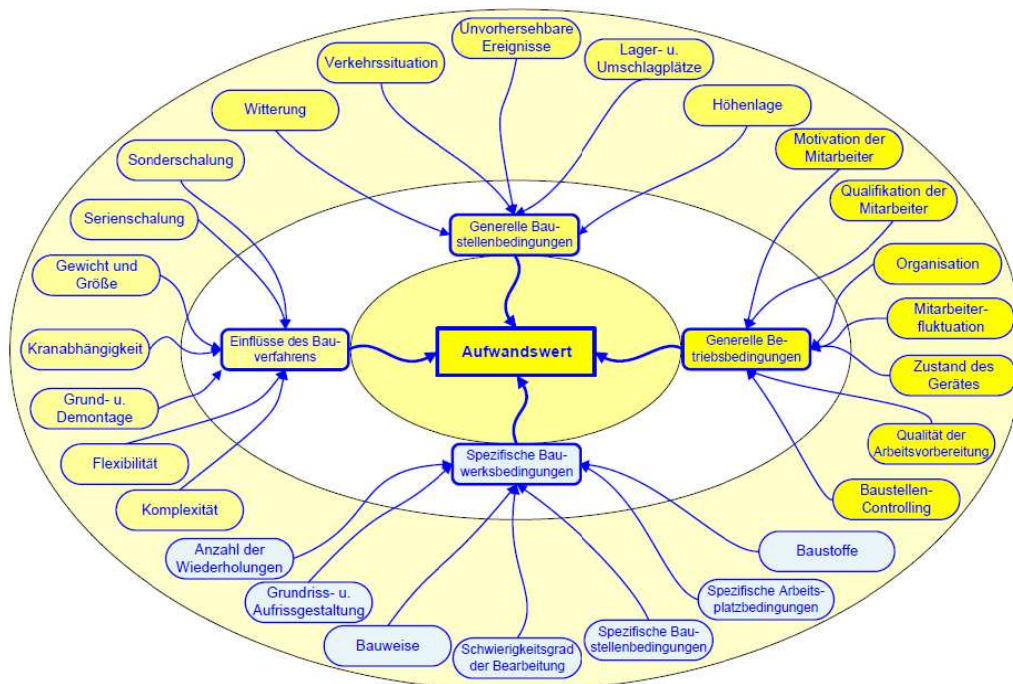


Bild 3–4 Einflüsse auf Aufwandswerte – Beispiel: Schalarbeiten [Hofstadler<sup>65</sup>]

<sup>65</sup> HOFSTADLER, C.: Bauablaufplanung und Logistik im Baubetrieb. S. 20

Aufandswerte dienen weiters nicht nur der Kostenberechnung für den Anteil Lohn, sondern sind ebenso eine wichtige Eingangsgröße für die Berechnung der Bauzeit und haben indirekt auch auf logistische Überlegungen Einfluss. Je nach Betrachtungstiefe erfolgen die Berechnungen mit Gesamt-Aufandswerten oder Detailaufandswerten (siehe Bild 3–5).

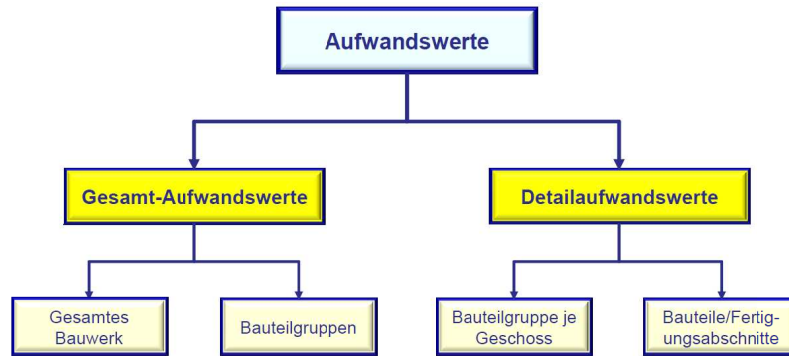


Bild 3–5 Differenzierung von Aufandswerten [Hofstadler<sup>66</sup>]

Der Gesamt-Aufandswert für Stahlbetonarbeiten  $AW_{STB}$  setzt sich aus den mittleren Aufandswerten für das Schalen  $AW_{S,MW}$  [Std/m<sup>2</sup>], Bewehren  $AW_{BW,MW}$  [Std/t] und Betonieren  $AW_{BT,MW}$  [Std/m<sup>3</sup>] zusammen. Die Umrechnung auf die Einheit [Std/m<sup>3</sup>] erfolgt durch die Einbeziehung des Schalungs-  $s_{g,bwk}$  [m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>] und Bewehrungsgrades  $bw_{g,bwk}$  [t/m<sup>3</sup>] (siehe Glg. (11))

$$AW_{STB} = AW_{S,MW} \cdot s_{g,bwk} + AW_{BW,MW} \cdot bw_{g,bwk} + AW_{BT,MW} \quad (11)$$

### 3.5.7 Aufandswert für Schalarbeiten $AW_{S,MW}$

Der mittlere Aufandswert für die Schalarbeiten  $AW_{S,MW}$  [Std/m<sup>2</sup>] errechnet sich durch die Aufandswerte für Fundamente  $AW_{S,FU,i}$  [Std/m<sup>2</sup>], Stützen  $AW_{S,ST,i}$  [Std/m<sup>2</sup>], Wände  $AW_{S,WD,i}$  [Std/m<sup>2</sup>], Decken  $AW_{S,D,i}$  [Std/m<sup>2</sup>] und sonstige Bauteile  $AW_{S,SO,i}$  [Std/m<sup>2</sup>], gewichtet nach den jeweiligen Schalungsflächen laut Glg. (12).

$$AW_{S,MW} = \frac{\sum (S_{F,FU,i} \cdot AW_{S,FU,i}) + \sum (S_{F,ST,i} \cdot AW_{S,ST,i}) + \sum (S_{F,WD,i} \cdot AW_{S,WD,i})}{S_{F,bwk}} + \frac{\sum (S_{F,D,i} \cdot AW_{S,D,i}) + \sum (S_{F,SO,i} \cdot AW_{S,SO,i})}{S_{F,bwk}} \quad (12)$$

<sup>66</sup> HOFSTADLER, C.: Schalarbeiten - Technologische Grundlagen, Sichtbeton, Systemauswahl, Ablaufplanung, Logistik und Kalkulation. S. 301

### 3.5.8 Aufwandswert für Bewehrungsarbeiten $AW_{BW,MW}$

Der mittlere Aufwandswert für die Bewehrungsarbeiten  $AW_{BW,MW}$  [Std/t] errechnet sich durch die Aufwandswerte für Fundamente  $AW_{BW,FU,i}$  [Std/t], Stützen  $AW_{BW,ST,i}$  [Std/t], Wände  $AW_{BW,WD,i}$  [Std/t], Decken  $AW_{BW,D,i}$  [Std/t] und sonstige Bauteile  $AW_{BW,SO,i}$  [Std/t] gewichtet nach den jeweiligen Bewehrungsmengen laut Glg. (13).

$$AW_{BW,MW} = \frac{\sum (BW_{M,FU,i} \cdot AW_{BW,FU,i}) + \sum (BW_{M,ST,i} \cdot AW_{BW,ST,i}) + \sum (BW_{M,WD,i} \cdot AW_{BW,WD,i})}{BW_{M,bwk}} + \frac{\sum (BW_{M,D,i} \cdot AW_{BW,D,i}) + \sum (BW_{M,SO,i} \cdot AW_{BW,SO,i})}{BW_{M,bwk}} \quad (13)$$

### 3.5.9 Aufwandswert für Betonarbeiten $AW_{BT,MW}$

Der mittlere Aufwandswert für die Betonarbeiten  $AW_{BT,MW}$  [Std/m<sup>3</sup>] errechnet sich durch die Aufwandswerte für Fundamente  $AW_{BT,FU,i}$  [Std/m<sup>3</sup>], Stützen  $AW_{BT,ST,i}$  [Std/m<sup>3</sup>], Wände  $AW_{BT,WD,i}$  [Std/m<sup>3</sup>], Decken  $AW_{BT,D,i}$  [Std/m<sup>3</sup>] und sonstige Bauteile  $AW_{BT,SO,i}$  [Std/m<sup>3</sup>] gewichtet nach den jeweiligen Betonmengen laut Glg. (14).

$$AW_{BT,MW} = \frac{\sum (BT_{M,FU,i} \cdot AW_{BT,FU,i}) + \sum (BT_{M,ST,i} \cdot AW_{BT,ST,i}) + \sum (BT_{M,WD,i} \cdot AW_{BT,WD,i})}{BT_{M,bwk}} + \frac{\sum (BT_{M,D,i} \cdot AW_{BT,D,i}) + \sum (BT_{M,SO,i} \cdot AW_{BT,SO,i})}{BT_{M,bwk}} \quad (14)$$

### 3.5.10 Mittellohnkosten $ML_{STB,MW}$

Die Mittellohnkosten für die Stahlbetonarbeiten  $ML_{STB,MW}$  [€/Std] können ebenfalls aus den Mittellohnkosten für das Schalen  $ML_S$  [€/Std], Bewehren  $ML_{BW}$  [€/Std] und Betonieren  $ML_{BT}$  [€/Std], bezogen auf die jeweiligen Lohnstunden, nach Glg. (15) errechnet werden. Dies ist dann notwendig, wenn unterschiedliche Arbeitspartien oder Firmen die Stahlbetonarbeiten durchführen.

$$ML_{STB,MW} = \frac{ML_S \cdot LS_S + ML_{BW} \cdot LS_{BW} + ML_{BT} \cdot LS_{BT}}{LS_S + LS_{BW} + LS_{BT}} \quad (15)$$

Dabei gilt:

$$LS_S = AW_{S,MW} \cdot S_{F,bwk} \quad (16)$$

$$LS_{BW} = AW_{BW,MW} \cdot BW_{M,bwk} \quad (17)$$

$$LS_{BT} = AW_{BT,MW} \cdot BT_{M,bwk} \quad (18)$$

Weiters können die Mittellohncosten mit Hilfe des Formblattes K3 lt. ÖNORM B 2061:1999 im Detail ermittelt werden.

### 3.5.11 Geräte- und Materialkosten $k_{STB,MW}$

Die Geräte- und Materialkosten für Stahlbetonarbeiten, welche sich wiederum aus den Geräte- und Materialkosten für Schalung, Bewehrung und Beton zusammensetzen (siehe Glg. (3)) können ebenfalls in einem vertiefenden Schritt ermittelt werden.

Eine Möglichkeit die Gerätekosten zu berechnen, basiert auf bereits ausgeführten Projekten bzw. Erfahrungswerten durch den Einsatz einer Kostenmatrix. Dabei wird je Bauteilgruppe eine Bandbreite für die Gerätekosten angegeben und entsprechend den Mengenanteilen je Bauteilgruppe, gewichtet aufaddiert. Beispielhaft sei hier im Bild 3–6 eine Kostenmatrix für die Gerätekosten der Schararbeiten im Hochbau dargestellt.

Bauteil	Menge	Anteil der Menge	Gerätekosten - Schararbeiten													Gerätekosten - Minimum			Gerätekosten - Maximum								
			4													5	6	7	8	9	10						
			[€/m <sup>2</sup> ]													[€/m <sup>2</sup> ]	[€/m <sup>2</sup> ]	[%]	[€/m <sup>2</sup> ]	[€/m <sup>2</sup> ]	[%]						
1	2	3	4													5	6	7	8	9	10						
	[m <sup>2</sup> ]	[%]	[€/m <sup>2</sup> ]													[€/m <sup>2</sup> ]	[€/m <sup>2</sup> ]	[%]	[€/m <sup>2</sup> ]	[€/m <sup>2</sup> ]	[%]						
			<	2,00	2,25	2,50	2,75	3,00	3,25	3,50	3,75	4,00	4,25	4,50	4,75	5,00	5,25	>									
Einzelfundamente, Streifenfundamente	50	0,55				2,75													2,75	0,015	0,52	3,00	0,016	0,53			
Fundamentplatten	650	7,11			2,50														2,50	0,178	6,20	2,75	0,196	6,27			
Stützen	160	1,75					3,00												3,00	0,053	1,83	3,25	0,057	1,82			
Wände	5.550	60,72						3,00											3,00	1,822	63,55	3,25	1,973	63,30			
Decken	2.400	26,26			2,50														2,50	0,656	22,90	2,75	0,722	23,18			
Unterzüge, Überzüge	0	0,00																	0,00	0,000	0,00	0,00	0,000	0,00			
Träger, Binder	250	2,74								3,75									3,75	0,103	3,58	4,00	0,109	3,51			
Treppen, Podeste	40	0,44																	5,25	0,023	0,80	5,75	0,025	0,81			
Sonstige Bauteile	40	0,44									4,00								4,00	0,018	0,61	4,25	0,019	0,60			
Sonstige Bauteile	0	0,00																	0,00	0,000	0,00	0,00	0,000	0,00			
Summe	9.140	100,00	Mittlere Gerätekosten													2,87		100			3,12	100					
Mittlerer Schalungsgrad: 3,39 [m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup> ]			Ansatz für die mittleren Gerätekosten:													3,05 €/m <sup>2</sup>											

Bild 3–6 Gerätekostenmatrix – Schararbeiten [Hofstadler<sup>67</sup>]

Detaillierter können die Gerätekosten durch Anwendung von K6-Formblättern lt. ÖNORM B 2061:1999 ermittelt werden.

Die Materialkosten können ebenso aus Daten vergangener Projekte abgeschätzt werden (Achtung: oft erhebliche Preisschwankungen, siehe z.B. Stahlpreisentwicklung) oder durch Anfragen bei Lieferanten genau erhoben werden.

<sup>67</sup> HOFSTADLER, C.: Schararbeiten - Technologische Grundlagen, Sichtbeton, Systemauswahl, Ablaufplanung, Logistik und Kalkulation. S. 314

## 4 Ermittlung der Bauzeit für Stahlbetonarbeiten

Bei der Ermittlung der Bauzeit ist grundsätzlich zwischen einer Grob- und Detailbetrachtung zu unterscheiden. Bei den Stahlbetonarbeiten wird so beispielsweise für die Grobbetrachtung das gesamte Bauwerk, bei der Detailbetrachtung hingegen die einzelnen Bauteilgruppen getrennt analysiert.

Die Abkürzungen der verwendeten Gleichungsvariablen sind den Arbeiten von *Hofstadler*<sup>68</sup> nachempfunden.

### 4.1 Grobbetrachtung

Die Dauer für die Stahlbetonarbeiten  $D_{STB}$  [d] berechnet sich aus der zu errichtenden Betonmenge  $BT_{M,bwk}$  [m<sup>3</sup>] und der Leistung  $L_{STB}$  [m<sup>3</sup>/d] nach Glg. (19).

$$D_{STB} = \frac{BT_{M,bwk}}{L_{STB}} \quad (19)$$

Bei der Bauzeitermittlung sollte zusätzlich ein Puffer  $PU_{STB,Z}$  [%] zur Abfederung von Störungen eingerechnet werden.<sup>69</sup>

Die Bauzeit für die Stahlbetonarbeiten inklusive Puffer  $D_{STB,PF}$  [d] ergibt sich aus Glg. (20).

$$D_{STB,PF} = D_{STB} \cdot \left( 1 + \frac{PU_{STB,Z}}{100} \right) \quad (20)$$

#### 4.1.1 Leistung der Stahlbetonarbeiten $L_{STB}$

Die Leistung  $L_{STB}$  [m<sup>3</sup>/d] kann auf Basis von vorherigen Projekten abgeschätzt oder aus der mittleren Anzahl an Arbeitskräften  $AK_{STB,MW}$  [Std/h], der täglichen Arbeitszeit  $AZ_{STB}$  [h/d] und dem Gesamt-Aufwandswert  $AW_{STB}$  [Std/m<sup>3</sup>] wie folgt errechnet werden:

$$L_{STB} = \frac{AK_{STB,MW} \cdot AZ_{STB}}{AW_{STB}} \quad (21)$$

Die tägliche Leistung hängt ebenso wie der Aufwandswert von zahlreichen Einflussfaktoren ab. Somit wird deutlich, je detaillierter die Eingangswerte ermittelt werden, desto genauer und aussagekräftiger wird auch die Bauzeitberechnung sein. In Bild 4–1 werden einige dieser Einflüsse dargestellt.

<sup>68</sup> Vgl. HOFSTADLER, C.: Bauablaufplanung und Logistik im Baubetrieb. S. 60ff. HOFSTADLER, C.: Bauzeit und Baukosten für Stahlbetonarbeiten - Berechnungsmethoden und Anwendung. In: Beton- und Stahlbeton 104 (2009), Heft 5 05/2009. S. 269ff und HOFSTADLER, C.: Schararbeiten - Technologische Grundlagen, Sichtbeton, Systemauswahl, Ablaufplanung, Logistik und Kalkulation. S. 447ff

<sup>69</sup> Vgl. HOFSTADLER, C.: Bauablaufplanung und Logistik im Baubetrieb. S. 344



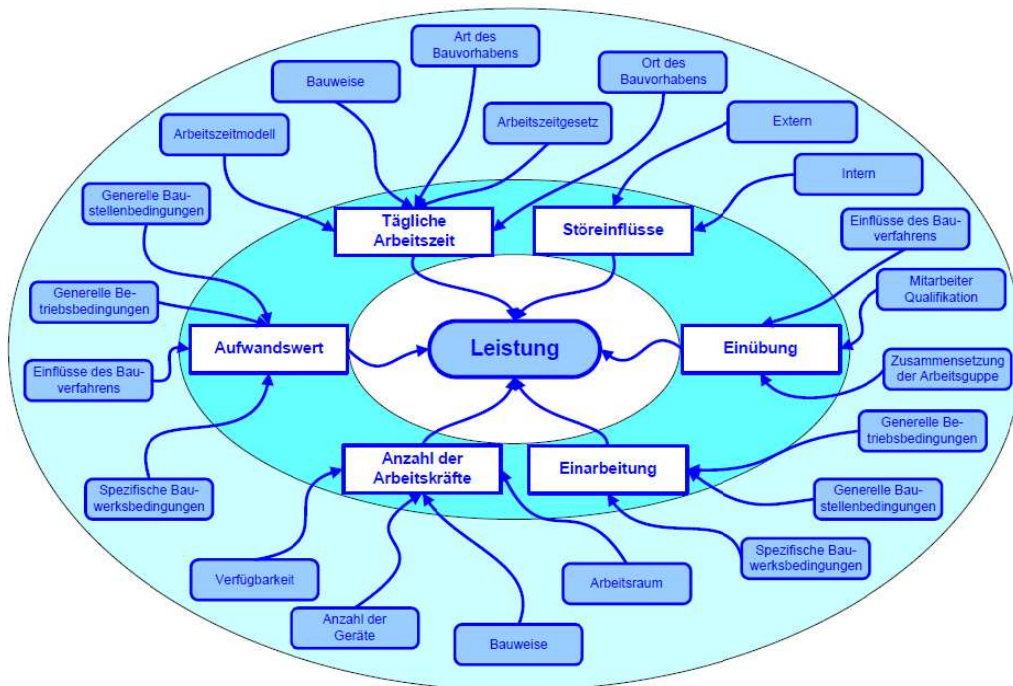


Bild 4–1 Einflüsse auf Leistungswerte [Hofstadler<sup>70</sup>]

#### 4.1.2 Anzahl der Arbeitskräfte $AK_{STB}$

Um die Anzahl der benötigten Arbeitskräfte zu berechnen, sind verschiedene Methoden denkbar. So ist die maximale Anzahl an Arbeitskräften beispielsweise durch den maximal zur Verfügung stehenden Arbeitsraum begrenzt. Natürlich können darüber hinaus noch mehr Arbeitskräfte eingesetzt werden, dies hat aber zur Folge, dass sich die Arbeitskräfte durch den verringerten Arbeitsraum gegenseitig behindern und so mit Produktivitätsverlusten zu rechnen ist. Die Berechnung erfolgt über die bearbeitbare Arbeitsfläche  $AF_{\text{bearbeitbar}}$  [m<sup>2</sup>] und die Mindestarbeitsfläche je Arbeitskraft  $AF_{\text{MIN}}$  [m<sup>2</sup>/AK] nach Glg. (22).<sup>71</sup>

$$AK_{STB,\max} = \frac{AF_{\text{bearbeitbar}}}{AF_{\text{MIN}}} \quad (22)$$

Wobei die bearbeitbare Arbeitsfläche  $AF_{\text{bearbeitbar}}$  [m<sup>2</sup>] einen Prozentsatz  $f_{AF,\text{bearbeitbar}}$  [%] der Gesamtarbeitsfläche  $AF_{\text{ges}}$  [m<sup>2</sup>] darstellt.

<sup>70</sup> HOFSTADLER, C.: Bauablaufplanung und Logistik im Baubetrieb. S. 18

<sup>71</sup> Vgl. HOFSTADLER, C.: Nachweis von Produktivitätsverlusten am Beispiel der Stahlbetonarbeiten - Literaturansätze im Vergleich zu aktuellen Untersuchungsergebnissen. Tagungsband - 9. Grazer Baubetriebs- und Bauwirtschaftssymposium - Bauablaufstörungen-Baubetriebliche, bauwirtschaftliche und rechtliche Aspekte. S. 55ff

$$AF_{\text{bearbeitbar}} = AF_{\text{ges}} \cdot \left( \frac{f_{AF,\text{bearbeitbar}}}{100} \right) \quad (23)$$

Die Mindestarbeitsfläche wurde im Zuge einer Expertenbefragung von *Hofstadler* für Schalarbeiten bei Flachdecken mit ca. 29 m<sup>2</sup>/AK und für Bewehrungsarbeiten bei Flachdecken mit ca. 40 m<sup>2</sup>/AK ermittelt.<sup>72</sup>

Eine weitere Möglichkeit die maximale Arbeitskräfteanzahl zu bestimmen ist die Berechnung auf Basis der Krananzahl. Dabei wird die Anzahl der Krane ANZ<sub>K,AK</sub> [Kran] mit einem Proportionalitätsfaktor PF<sub>K,AK</sub> [AK/Kran] multipliziert.

$$AK_{STB,\text{max}} = ANZ_{K,AK} \cdot PF_{K,AK} \quad (24)$$

Für Proportionalitätsfaktoren können laut *Schach/Otto* folgende Bandbreiten angegeben werden:

**Tabelle 4.1 Richtwerte für Proportionalitätsfaktoren bei Betonarbeiten [in Anlehnung an *Schach/Otto*<sup>73</sup>]**

	Mischbauweise	Stahlbetonbauweise
<b>AK/Kran, Betoneinbau mit Kran</b>	≤ 15	≤ 13
<b>AK/Kran, Betoneinbau mit Pumpe</b>	≤ 25	≤ 25
<b>AK/Kran, Fertigteilmontage</b>	3 bis 5	

Im Verlauf eines Projektes kann allerdings nicht von einer konstanten Anzahl der auf der Baustelle beschäftigten Arbeitskräfte ausgegangen werden. Im Zuge der Ausführung kommt es zu produktionsbedingten Schwankungen. Somit kann nicht mit der Maximalanzahl über die gesamte Bauzeit D<sub>STB</sub> [d] gerechnet werden. Es wird idealisiert von einer Trapezverteilung der Anzahl an Arbeitskräften ausgegangen, wobei die Gesamtbauphase D<sub>STB</sub> [d] in eine Anlaufphase D<sub>AN</sub> [d], eine Hauptbauphase D<sub>HP</sub> [d] und eine Auslaufphase D<sub>AUS</sub> [d] unterteilt wird (siehe Bild 4–2).

<sup>72</sup> Vgl. HOFSTADLER, C.: Nachweis von Produktivitätsverlusten am Beispiel der Stahlbetonarbeiten - Literaturansätze im Vergleich zu aktuellen Untersuchungsergebnissen. Tagungsband - 9. Grazer Baubetriebs- und Bauwirtschaftssymposium - Bauablaufstörungen-Baubetriebliche, bauwirtschaftliche und rechtliche Aspekte. S. 57 u. 61

<sup>73</sup> Vgl. SCHACH, R.; OTTO, J.: Baustelleneinrichtung - Grundlagen - Planung - Praxishinweise - Vorschriften und Regeln. S. 18



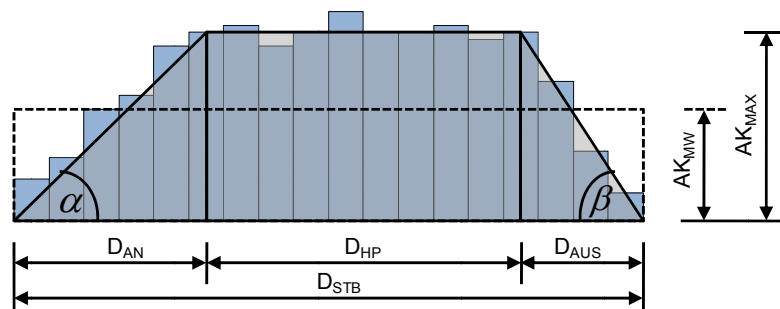


Bild 4–2 Trapezverteilung der Arbeitskräfteanzahl über die Bauzeit [in Anlehnung an Hofstadler<sup>74</sup>]

Um den Mittelwert der Arbeitskräfteanzahl zu erhalten muss zunächst ein Faktor für das Arbeitskräfteverhältnis  $f_{AK}$  [-] angenommen werden. Dieser liegt bei einer Rechteckverteilung bei 1, bei trapezförmigen Verteilungen wie in Bild 4–2 zwischen 0,75 und 0,90.<sup>75</sup> Damit errechnet sich die mittlere Arbeitskräfteanzahl  $AK_{STB,MW}$  [Std/h] wie folgt:

$$AK_{STB,MW} = AK_{STB,max} \cdot f_{AK} \quad (25)$$

#### 4.1.3 Dauer der Hauptbauphase $D_{HP}$

Nach der Berechnung der Gesamtdauer für die Stahlbetonarbeiten kann in einem weiteren Schritt die Dauer der Hauptbauphase  $D_{HP}$  [d] errechnet werden:

$$D_{HP} = \frac{2 \cdot D_{STB} \cdot AK_{STB,MW}}{AK_{STB,max}} - D_{STB} \quad (26)$$

#### 4.1.4 Dauer der Anlauf- $D_{AN}$ und Auslaufphase $D_{AUS}$

Der grundlegende Zusammenhang der Dauern nach Bild 4–2 ist in der nachstehenden Glg. (27) ersichtlich:

$$D_{AN} + D_{AUS} = D_{STB} - D_{HP} \quad (27)$$

Es kann für eine erste Näherung (nach Auswertung des Bauablaufs einiger Rohbauten) angenommen werden, dass die Auslaufphase ca. 1/3 der Anlaufphase beträgt.<sup>76</sup>

$$D_{AUS} = \frac{1}{3} \cdot D_{AN} \quad (28)$$

<sup>74</sup> Vgl. HOFSTADLER, C.: Bauablaufplanung und Logistik im Baubetrieb. S. 59

<sup>75</sup> Vgl. HOFSTADLER, C.: Calculation of Construction Time for Building Projects – Application of the Monte Carlo Method to Determine the Period Required for Shell Construction Works. Konferenzbeitrag - CIB 2010 World Congress. S. 219

<sup>76</sup> Vgl. HOFSTADLER, C.: Bauablaufplanung und Logistik im Baubetrieb. S. 62

Die Dauer der Anlaufphase ergibt sich durch Einsetzen der Glg. (28) in die Glg. (27) wie folgt:

$$D_{AN} = \frac{3}{4} \cdot (D_{STB} - D_{HP}) \quad (29)$$

## 4.2 Detailbetrachtung

In der Detailbetrachtung für die Dauer der Stahlbetonarbeiten werden die einzelnen Vorgänge (Schalen, Bewehren und Betonieren), getrennt nach Bauteilen, ermittelt. Mit diesen Angaben kann dann ein Detailterminplan, wie er in Bild 4–3 für die Fließfertigung von Decken dargestellt ist, angefertigt werden.

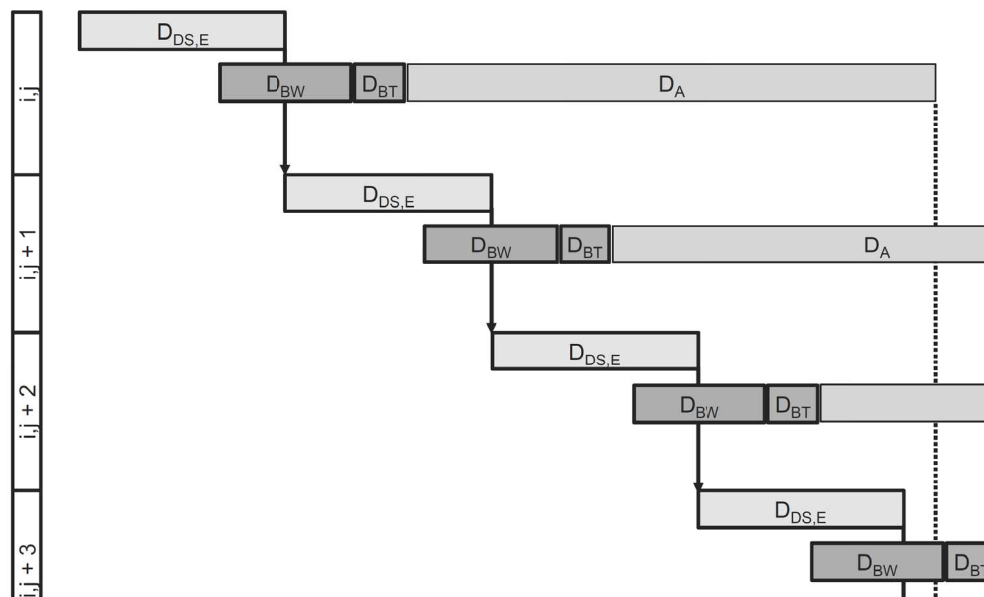


Bild 4–3 Detailbetrachtung der Stahlbetonarbeiten für die Fließfertigung bei Decken – Ausschnitt aus dem Ablaufplan [Hofstadler<sup>77</sup>]

Die Bezeichnung „i“ bezieht sich dabei auf das jeweilige Geschöß und „j“ auf den Fertigungsabschnitt. Die Dauer für das Einschalen wird mit  $D_{DS,E}$  [d], jene für das Bewehren mit  $D_{BW}$  [d] und jene für das Betonieren mit  $D_{BT}$  [d] bezeichnet. Für die Ausschalffrist  $D_A$  [d] wird ein eigener Balken vorgesehen, der an das Ende der Betonierarbeiten anschließt. Die Dauer für das Ausschalen ist in dieser Darstellung nicht ersichtlich.

Eine solch detaillierte Betrachtung und Berechnung mit der Monte-Carlo Methode würde einen sehr hohen Rechenaufwand bedeuten und ist auch nicht Ziel dieser Arbeit, weshalb hier nicht näher darauf eingegangen wird.

<sup>77</sup> HOFSTADLER, C.: Bauablaufplanung und Logistik im Baubetrieb. S. 89

## 5 Ermittlung der Anzahl an Transporten für Stahlbetonarbeiten

Die Anzahl der Transporte zu kennen, ist für die Planung der Baustellenlogistik unumgänglich. Beispielsweise ist es notwendig eine Baustelle während der Betonierarbeiten ununterbrochen mit Beton zu versorgen. Bei innerstädtischen Baustellen kann dies aber aufgrund verkehrstechnischer Überlastungen zu Stoßzeiten („Rushhour“) zu einem nicht zu unterschätzenden Problem werden. Ist schon im Vorfeld die tägliche Anzahl an Transporten bekannt, können mit diesen Daten die Auswirkungen auf das Verkehrsnetz besser untersucht werden.

Die Baustellenlogistik gliedert sich in drei Teilgebiete<sup>78</sup>:

- Beschaffungslogistik (Antransport von Materialien und Geräten auf die Baustelle)
- Produktionslogistik (Transport von Materialien und Geräten auf der Baustelle z.B. vom Lagerplatz zur Einbaustelle – horizontal und vertikal)
- Entsorgungslogistik (Wegschaffen von Abfällen, Aushubmaterial etc. von der Baustelle)

Für die weitere Betrachtung sollen nur die Materialtransporte für Beton und Bewehrung sowie die Gerätetransporte für die Schalung im Bereich der Beschaffungslogistik näher beschrieben werden.

Die Abkürzungen der verwendeten Gleichungsvariablen sind den Arbeiten von *Hofstadler*<sup>79</sup> nachempfunden.

### 5.1 Grobplanung

Für die Grobplanung wird die Anzahl der erforderlichen Transporte für die Stahlbetonarbeiten  $ANZ_{TR,STB}$  [TR] anhand der gesamten Betonmenge  $BT_{M,bwk}$  [m<sup>3</sup>] und einem Transportgrad für Stahlbetonarbeiten  $tp_{g,STB}$  [1/m<sup>3</sup>] errechnet.<sup>80</sup>

$$ANZ_{TR,STB} = BT_{M,bwk} \cdot tp_{g,STB} \quad (30)$$

*„Bezogen auf die Betonmenge sind für Hochbauten aus vorwiegend Ortbeton für die Stahlbetonarbeiten ca. 0,15 bis 0,25 Transporte je m<sup>3</sup> erforderlich. Der größte Anteil mit ca. 90 % resultiert aus den Betontransporten, gefolgt von den Bewehrungstransporten sowie Schalungstransporten.“<sup>81</sup>*

<sup>78</sup> Vgl. HOFSTADLER, C.: Bauablaufplanung und Logistik im Baubetrieb. S. 42

<sup>79</sup> Vgl. HOFSTADLER, C.: Beschaffungslogistik für die Phase Bauwerk-Rohbau - Berechnung der Anzahl der Transporte für Stahlbetonarbeiten unter Anwendung der Monte-Carlo-Simulation. In: Festschrift anlässlich des 30-jährigen Bestehens des Instituts für Baubetrieb der Technischen Universität Darmstadt - Baubetriebliche Aufgaben 2009. S. 149ff, HOFSTADLER, C.: Bauablaufplanung und Logistik im Baubetrieb. S. 355ff und HOFSTADLER, C.: Schararbeiten - Technologische Grundlagen, Sichtbeton, Systemauswahl, Ablaufplanung, Logistik und Kalkulation. S. 464ff

<sup>80</sup> Vgl. HOFSTADLER, C.: Beschaffungslogistik für die Phase Bauwerk-Rohbau - Berechnung der Anzahl der Transporte für Stahlbetonarbeiten unter Anwendung der Monte-Carlo-Simulation. In: Festschrift anlässlich des 30-jährigen Bestehens des Instituts für Baubetrieb der Technischen Universität Darmstadt - Baubetriebliche Aufgaben 2009. S. 149

<sup>81</sup> HOFSTADLER, C.: Schararbeiten - Technologische Grundlagen, Sichtbeton, Systemauswahl, Ablaufplanung, Logistik und Kalkulation. S. 465

Der Transportgrad für Stahlbetonarbeiten kann wiederum aus den Anteilen für Schalung  $tp_{g,S}$  [1/m<sup>2</sup>], Bewehrung  $tp_{g,BW}$  [1/t] und Beton  $tp_{g,BT}$  [1/m<sup>3</sup>] durch die Einbeziehung des Schalungs-  $s_{g,bwk}$  [m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>] und Bewehrungsgrades  $bw_{g,bwk}$  [t/m<sup>3</sup>] berechnet werden.<sup>82</sup>

$$tp_{g,STB} = tp_{g,S} \cdot s_{g,bwk} + tp_{g,BW} \cdot bw_{g,bwk} + tp_{g,BT} \quad (31)$$

Darüber hinaus ist die Berücksichtigung eines Zuschlages  $ZU_{TR}$  [%] möglich, der für die Schaffung von Reserven herangezogen wird und so die Gesamtanzahl an Transporten um einen Prozentsatz erhöht.<sup>83</sup>

$$ANZ_{TR,STB,ZU} = ANZ_{TR,STB} \cdot \left( 1 + \frac{ZU_{TR}}{100} \right) \quad (32)$$

## 5.2 Feinplanung

In der Feinplanung können die Transportgrade für Schalung, Bewehrung und Beton gesondert bestimmt werden.

### 5.2.1 Transportgrad der Schalung $tp_{g,S}$

Der Transportgrad für die Schalung  $tp_{g,S}$  [1/m<sup>2</sup>] errechnet sich aus der Vorhaltemenge  $V_S$  [m<sup>2</sup>], der gesamten Schalfläche des Bauwerkes  $S_{F,bwk}$  [m<sup>2</sup>] und der durchschnittlichen Schalungsfläche, die pro Transport auf die Baustelle angeliefert wird  $S_{F,TR}$  [m<sup>2</sup>].<sup>84</sup>

$$tp_{g,S} = \frac{V_S}{S_{F,bwk} \cdot S_{F,TR}} \quad (33)$$

Wesentlichen Einfluss auf den Transportgrad übt die Art der Schalung aus. Vorgefertigte Schalungen verbrauchen in der Regel mehr Platz auf einem Transporter als zerlegte Schalungen in Form von Gebinden oder Paletten. *Hofstadler* gibt den Transportgrad für die Schalarbeiten mit 0,00083 bis 0,00125 [1/m<sup>2</sup>] an, verweist aber darauf, dass dieser Wert für kleinere Bauvorhaben, wie z.B. Einfamilienhäuser, niedriger sein wird.<sup>85</sup>

<sup>82</sup> Vgl. HOFSTADLER, C.: Beschaffungslogistik für die Phase Bauwerk-Rohbau - Berechnung der Anzahl der Transporte für Stahlbetonarbeiten unter Anwendung der Monte-Carlo-Simulation. In: Festschrift anlässlich des 30-jährigen Bestehens des Instituts für Baubetrieb der Technischen Universität Darmstadt - Baubetriebliche Aufgaben 2009. S. 149

<sup>83</sup> Vgl. HOFSTADLER, C.: Beschaffungslogistik für die Phase Bauwerk-Rohbau - Berechnung der Anzahl der Transporte für Stahlbetonarbeiten unter Anwendung der Monte-Carlo-Simulation. In: Festschrift anlässlich des 30-jährigen Bestehens des Instituts für Baubetrieb der Technischen Universität Darmstadt - Baubetriebliche Aufgaben 2009. S. 150

<sup>84</sup> Vgl. HOFSTADLER, C.: Beschaffungslogistik für die Phase Bauwerk-Rohbau - Berechnung der Anzahl der Transporte für Stahlbetonarbeiten unter Anwendung der Monte-Carlo-Simulation. In: Festschrift anlässlich des 30-jährigen Bestehens des Instituts für Baubetrieb der Technischen Universität Darmstadt - Baubetriebliche Aufgaben 2009. S. 150

<sup>85</sup> Vgl. HOFSTADLER, C.: Schararbeiten - Technologische Grundlagen, Sichtbeton, Systemauswahl, Ablaufplanung, Logistik und Kalkulation. S. 464

Für eine weitere Detaillierung ist es möglich den Transportgrad nach Bauteilen bzw. nach Bauteilgruppen getrennt zu ermitteln.<sup>86</sup>

$$tp_{g,S,i} = \frac{V_{S,i}}{S_{F,i} \cdot S_{F,TR,i}} \quad (34)$$

Der Transportgrad der Schalung für das gesamte Bauwerk errechnet sich in weiterer Folge nach Glg. (35).<sup>87</sup>

$$tp_{g,S} = \frac{\sum_i^n \frac{V_{S,i}}{S_{F,TR,i}}}{S_{F,bwk}} \quad (35)$$

### 5.2.2 Transportgrad der Bewehrung $tp_{g,BW}$

Der Transportgrad der Bewehrung  $tp_{g,BW}$  [1/t] wird durch die Menge an Bewehrung, die je Transport angeliefert wird  $BW_{M,TR}$  [t], berechnet.

$$tp_{g,BW} = \frac{1}{BW_{M,TR}} \quad (36)$$

Können also beispielsweise 20 t je Transport geliefert werden, beträgt der Transportgrad der Bewehrung 0,05 [1/t]. Bei lediglich 10 t je Lieferung folgt der Transportgrad zu 0,10 [1/t]. Die Höhe des Transportgrades der Bewehrung wird hauptsächlich von äußeren Umständen beeinflusst. Diese können etwa Gewichtsbeschränkungen bei Brücken auf dem Weg zur Baustelle sein oder, dass bei beengten Platzverhältnissen die Zufahrt für Sattel-schlepper nicht möglich ist.<sup>88</sup>

### 5.2.3 Transportgrad des Betons $tp_{g,BT}$

Der Transportgrad des Betons  $tp_{g,BT}$  [1/m<sup>3</sup>] wird durch die Menge an Beton (Festbetonmenge), der je Transport angeliefert wird,  $BT_{M,TR}$  [m<sup>3</sup>] berechnet.

$$tp_{g,BT} = \frac{1}{BT_{M,TR}} \quad (37)$$

<sup>86</sup> Vgl. HOFSTADLER, C.: Beschaffungslogistik für die Phase Bauwerk-Rohbau - Berechnung der Anzahl der Transporte für Stahlbetonarbeiten unter Anwendung der Monte-Carlo-Simulation. In: Festschrift anlässlich des 30-jährigen Bestehens des Instituts für Baubetrieb der Technischen Universität Darmstadt - Baubetriebliche Aufgaben 2009. S. 151

<sup>87</sup> Vgl. HOFSTADLER, C.: Beschaffungslogistik für die Phase Bauwerk-Rohbau - Berechnung der Anzahl der Transporte für Stahlbetonarbeiten unter Anwendung der Monte-Carlo-Simulation. In: Festschrift anlässlich des 30-jährigen Bestehens des Instituts für Baubetrieb der Technischen Universität Darmstadt - Baubetriebliche Aufgaben 2009. S. 151

<sup>88</sup> Vgl. HOFSTADLER, C.: Beschaffungslogistik für die Phase Bauwerk-Rohbau - Berechnung der Anzahl der Transporte für Stahlbetonarbeiten unter Anwendung der Monte-Carlo-Simulation. In: Festschrift anlässlich des 30-jährigen Bestehens des Instituts für Baubetrieb der Technischen Universität Darmstadt - Baubetriebliche Aufgaben 2009. S. 151

Können also beispielsweise 12 m<sup>3</sup> je Transport geliefert werden beträgt der Transportgrad des Betons 0,08 [1/m<sup>3</sup>]. Bei lediglich 7 m<sup>3</sup> je Lieferung folgt der Transportgrad zu 0,14 [1/m<sup>3</sup>]. Die Höhe des Transportgrades des Betons wird hauptsächlich von äußeren Umständen beeinflusst (Gewichtsbeschränkungen, Beschaffenheit der Zufahrtswege etc.).<sup>89</sup>

---

<sup>89</sup> Vgl. HOFSTADLER, C.: Beschaffungslogistik für die Phase Bauwerk-Rohbau - Berechnung der Anzahl der Transporte für Stahlbetonarbeiten unter Anwendung der Monte-Carlo-Simulation. In: Festschrift anlässlich des 30-jährigen Bestehens des Instituts für Baubetrieb der Technischen Universität Darmstadt - Baubetriebliche Aufgaben 2009. S. 151

## 6 Monte-Carlo Methode

In diesem Kapitel werden die Definition, Geschichte, Generierung von Zufallszahlen, Funktionsweise und Anwendung der Monte-Carlo Methode behandelt. Weiters werden wichtige Begriffe der Stochastik erklärt sowie besonders auf die Wahl von Verteilungsfunktionen und den Einsatz von Korrelationen eingegangen. Eine Situationsanalyse am Ende dieses Kapitels gibt einen Überblick über den derzeitigen Stand der Forschung im Bereich der Monte-Carlo Simulation im Bauwesen.

### 6.1 Definition der Monte-Carlo Methode

Frühwirth und Regler definieren die Monte-Carlo Methoden wie folgt:

*„Als Monte Carlo-Methoden werden Methoden bezeichnet, die Probleme deterministischer oder stochastischer Natur mit Hilfe von Zufallszahlen lösen.“<sup>90</sup>*

Ermakow definiert die Monte-Carlo Methode

*„[...] als Methode zur Modellierung von Zufallsgrößen mit dem Ziel, spezielle Eigenschaften ihrer Verteilungen zu berechnen.“<sup>91</sup>*

Sobol beschreibt die Monte-Carlo Methode wie folgt:

*„Die Monte-Carlo-Methode ist eine numerische Methode zur Lösung mathematischer Probleme mit Hilfe der Modellierung von Zufallsgrößen.“<sup>92</sup>*

Es handelt sich also um eine mathematische Methode, mit der, durch die Modellierung von Zufallszahlen, sowohl naturwissenschaftliche als auch mathematische Probleme, deterministischer und stochastischer Natur gelöst werden können.

Ein kurzer Überblick über Methoden zur Generierung von Zufallsgrößen wird in Kapitel 6.3 gezeigt.

### 6.2 Geschichte der Monte-Carlo Methode

Zufällige Erscheinungen für die Lösung numerischer Probleme zu verwenden wurde bereits im 18. Jahrhundert angewandt. Durch das Werfen einer Nadel auf parallel liniertes Papier wurde die Zahl  $\pi$  ermittelt.

Diese empirische Bestimmung von  $\pi$  ist allgemein als das ‚Nadelproblem von Buffon‘ bekannt.

Bild 6–1 zeigt schematisch die Versuchsanordnung des Nadelproblems.

<sup>90</sup> FRÜHWIRTH, R.; REGLER, M.: Monte-Carlo-Methoden - Eine Einführung. S. 91

<sup>91</sup> ERMAKOW, S. M.: Die Monte-Carlo-Methode und verwandte Fragen. S. 15

<sup>92</sup> SOBOL, I. M.: Die Monte-Carlo-Methode. S. 7

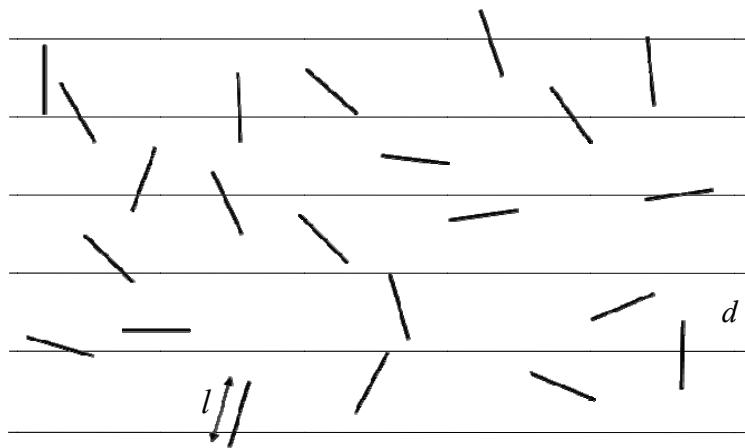


Bild 6–1 Nadelproblem von Buffon<sup>93</sup>

Ausgangspunkt für diesen Versuch ist die Frage, wie groß die Wahrscheinlichkeit ist, dass eine auf ein liniertes Blatt fallende Nadel eine der Linien kreuzt.

Die Wahrscheinlichkeit<sup>94</sup> errechnet sich durch folgende Gleichung:

$$p = \frac{2 \cdot l}{\pi \cdot d} \quad (38)$$

Wobei  $l$  die Länge der Nadel,  $d$  der parallele Abstand der Linien zueinander ist und die Bedingung  $l \leq d$  gelten muss. Somit ergibt sich bei  $N$  Versuchen und einer Anzahl  $P$  von Schnittpunkten,  $\pi$  wie folgt:

$$\pi = \frac{2 \cdot l \cdot N}{d \cdot P} \quad (39)$$

Dieser und eine Reihe weiterer Versuche zeigen, wie man auf relativ einfache Weise mit zufällig generierten Zahlen und unter Anwendung der Wahrscheinlichkeitstheorie eine Annäherung von Ergebnissen erzielen kann. Natürlich werden sich die Ergebnisse der Berechnungen immer näher an die tatsächliche Lösung annähern, je mehr Versuche in einem Experiment bzw. in einer Berechnung durchgeführt werden.

So konnte diese Methode erst mit der Entwicklung der EDV an Bedeutung gewinnen, da man davor die Berechnungen von Hand durchführen musste.

Während des zweiten Weltkrieges wurde bereits im Zusammenhang mit Arbeiten bei der Herstellung der Atombombe („Manhattan Project“), Forschung auf dem Gebiet der Monte-Carlo Methode betrieben. Als Begründer der Methode gelten *Neumann* und *Ulam*. Der Name der Methode geht auf das bekannte Casino in Monte-Carlo zurück, in dem die Ergebnisse der Roulettespiele regelmäßig ausgehängt wurden. Das Roulette ist nämlich

<sup>93</sup> Eigene Abbildung in Anlehnung an das Nadelproblem von Buffon

<sup>94</sup> Es handelt sich dabei um eine sogenannte geometrische Wahrscheinlichkeit.



eines der einfachsten mechanischen Geräte zur Realisierung von Zufallsgrößen. Die erste Arbeit zu dem Thema stammt von *Metropolis* und *Ulam* mit dem Titel „The Monte Carlo method“ und wurde im Jahre 1949 veröffentlicht. Dies wird auch als das Geburtsjahr der Methode angesehen.<sup>95</sup>

### 6.3 Generierung von Zufallszahlen

Da für die Berechnungen der Monte-Carlo Methode Zufallszahlen benötigt werden, soll hier ein kurzer Überblick über die Generierung solcher Zahlen gegeben werden.

Der einzige Weg ‚echte Zufallszahlen‘ zu generieren, ist ein Zufallsexperiment, wie es etwa durch den Münzwurf, einen Würfel oder durch das Roulette realisiert werden kann. Zufallszahlen dieser Art liegen in Tabellenform vor (z.B.: Rand Corporation: A million random digits with 100,000 normal deviates; Glencoe, Illinois. Free Press, 1955), sind aber für komplexe Probleme, bei denen oft viele Millionen Zufallsvariablen benötigt werden, nicht zielführend.<sup>96</sup>

Eine weitere Möglichkeit Zufallszahlen zu generieren, ist die Kombination eines physikalischen Zufallsgenerators und eines Computers. Bei jedem Rechengang wird so eine neue Zahl erstellt. Dadurch kann die Rechnung aber nicht mit denselben Zufallszahlen wiederholt werden und es besteht die Möglichkeit einer Störung im Zufallsgenerator. Es können dafür mechanische Geräte verwendet werden, die aber in jedem Fall langsamer als die Rechenleistung eines Computers sind oder es werden andere physikalische Effekte wie radioaktive Zerfallsprozesse oder verschiedenste Rauschvorgänge<sup>97</sup> benutzt.<sup>98</sup>

Es ist daher meist zielführender den Computer seine Zufallszahlen selbst ermitteln zu lassen. Dies geschieht über einen Algorithmus, der Zahlen berechnet, die ein ähnliches statistisches Verhalten wie ‚echte Zufallszahlen‘ zeigen. Solche Zahlen werden als ‚Pseudozufallszahlen‘ bezeichnet und sind prinzipiell vorherseh- und dadurch reproduzierbar.<sup>99</sup>

Man kann beispielsweise in einem Softwareprogramm festlegen, welche Zahl als Ausgangswert für die Berechnung der restlichen Zufallszahlen dienen soll.

Einer der ersten Algorithmen zur Ermittlung von Pseudozufallszahlen wurde 1946 von *Neumann* vorgestellt und wird als ‚Methode der mittleren Ziffern von Quadraten‘ (bzw. ‚Mittquadratmethode‘ oder ‚Mid-Square-Methode‘) bezeichnet.<sup>100</sup>

Bei dieser Methode ist beispielsweise eine vierstellige Zahl gegeben (diese Zahl kann z.B. aus der aktuellen Uhrzeit, der Zeit, die seit dem Start des Computers vergangen ist oder ähnlichen Daten entnommen werden). Diese wird in einem ersten Schritt quadriert. Aus der

<sup>95</sup> Vgl. HENGARTNER, W.; THEODORESCU, R.: Einführung in die Monte-Carlo-Methode. S. 17 und SOBOL, I. M.: Die Monte-Carlo-Methode. S. 7

<sup>96</sup> Vgl. FRÜHWITH, R.; REGLER, M.: Monte-Carlo-Methoden - Eine Einführung. S. 91

<sup>97</sup> Beispielsweise das Rauschen einer Diode oder eines elektrischen Widerstandes.

<sup>98</sup> Vgl. FRÜHWITH, R.; REGLER, M.: Monte-Carlo-Methoden - Eine Einführung. S. 91 u. 92 und HENGARTNER, W.; THEODORESCU, R.: Einführung in die Monte-Carlo-Methode. S. 26

<sup>99</sup> Vgl. FRÜHWITH, R.; REGLER, M.: Monte-Carlo-Methoden - Eine Einführung. S. 92

<sup>100</sup> Vgl. SOBOL, I. M.: Die Monte-Carlo-Methode. S. 28

nun erhaltenen (im Allgemeinen) achtstelligen Zahl werden die mittleren vier wiederum quadriert usw. Die so erhaltenen vierstelligen Zahlen bilden die gewünschten Zufallszahlen. Tabelle 6.1 zeigt ein Beispiel dieser Methode.<sup>101</sup>

**Tabelle 6.1 Beispiel für die Mid-Square-Methode nach Neumann<sup>102</sup>**

i	Zufallszahlen $n_i$	Quadrat $n_i^2$	i	Zufallszahlen $n_i$	Quadrat $n_i^2$
1	1922	03694084	8	0876	00767376
2	6940	48163600	9	7673	58874929
3	1636	02676496	10	8749	76545001
4	6764	45751696	11	5450	29702500
5	7516	56490256	12	7025	49350625
6	4902	24029604	13	3506	12292036
7	0296	00087616	14	2920	usw.

**6.4 Anwendung der Monte-Carlo Methode**

Das Anwendungsspektrum der Monte-Carlo Methode ist sehr weit gestreut. Es können damit sowohl deterministische als auch stochastische Probleme gelöst werden. Beispiele für solche Problemstellungen sind nachstehender Tabelle zu entnehmen:

**Tabelle 6.2 Beispiele für die Anwendung der Monte-Carlo Methode<sup>103</sup>**

Probleme deterministischer Natur	Probleme stochastischer Natur
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Berechnung von bestimmten Integralen und von Summen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bestimmung der Qualität und der Zuverlässigkeit von Erzeugnissen</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Lösung linearer Gleichungssysteme</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Untersuchung des Neutronen-durchgangs durch eine Platte</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Lösung von Randwertproblemen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Warteschlangenprobleme</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Extremalprobleme</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Risikoanalysen</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Simulationen in der Teilchenphysik (Kernspaltungsprozesse sind stochastischer Natur)</li> </ul>

Um die Funktionsweise der Monte-Carlo Simulation zu verdeutlichen soll hier ein Beispiel für die Bestimmung der Qualität eines Erzeugnisses behandelt werden.

<sup>101</sup> Vgl. SOBOL, I. M.: Die Monte-Carlo-Methode. S. 28

<sup>102</sup> Eigenes Beispiel, basierende auf der Mid-Square-Methode nach Neumann.

<sup>103</sup> Vgl. HENGARTNER, W.; THEODORESCU, R.: Einführung in die Monte-Carlo-Methode. S. 53ff und SOBOL, I. M.: Die Monte-Carlo-Methode. S. 39ff

#### 6.4.1 Beispiel für die Anwendung der Monte-Carlo Methode auf ein stochastisches Problem

Die nachstehenden Erläuterungen sind einem Beispiel von *Sobol*<sup>104</sup> nachempfunden und sollen die grundsätzliche Vorgangsweise bei der Anwendung der Monte-Carlo Methode verdeutlichen. Es wird bewusst auf eine genaue mathematische Berechnung verzichtet.

Es soll in diesem Beispiel die Qualität eines Erzeugnisses mit Hilfe der Monte-Carlo Methode bestimmt werden. Dabei handelt es sich um ein elektrisches Gerät, das aus einer bestimmten Anzahl an Bauelementen (Widerstände, Kondensatoren, Transistoren etc.) besteht.

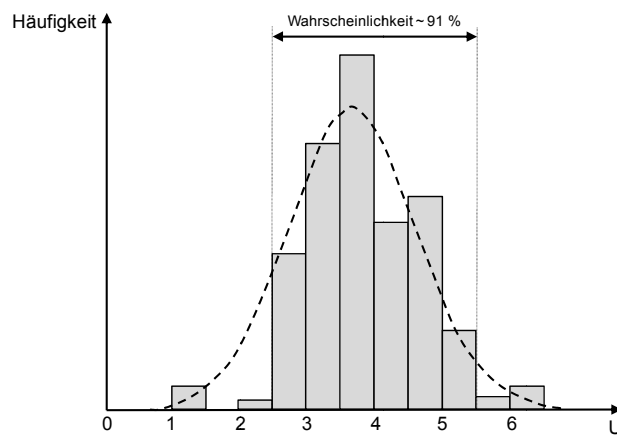
Dabei wird angenommen, dass sich die Güte  $U$  des Erzeugnisses durch die Einzelparameter der Bauelemente bestimmen lässt. Nun ist es aber in der Praxis so, dass die Bauelemente nicht genau die Eigenschaften besitzen, die allgemein für sie angegeben werden. Ein Widerstand beispielsweise, der mit 510 Ohm gekennzeichnet ist, kann etwa eine Schwankung von  $\pm 5\%$  aufweisen. Somit sind Werte für diesen Widerstand zwischen 484,5 und 535,5 Ohm möglich.

Sind die Parameterwerte und Schwankungsbereiche aller Bauelemente bekannt, lassen sich ein pessimistischer und ein optimistischer Wert für  $U$  errechnen, indem man jeweils mit den größten bzw. niedrigsten Parameterwerten rechnet. Allerdings ist es bei einer großen Anzahl an Bauelementen sehr unwahrscheinlich, dass alle Parameter gleichzeitig den Minimal- oder Maximalwert aufweisen. Weiters kann anhand der vereinfachten Berechnung keine Aussage darüber gemacht werden, mit welcher Wahrscheinlichkeit ein bestimmter Wert für  $U$  eintritt.

Hier kommt die Monte-Carlo Simulation zur Anwendung, da man die Verteilungsfunktion des Wertes  $U$  analytisch nicht (oder nur mit sehr großem Aufwand) bestimmen kann und eine experimentelle Ermittlung nicht möglich ist (weil sich das Produkt noch in der Projektierung befindet oder weil Experimente aufgrund von finanziellen oder terminlichen Gründen nicht durchführbar sind). Für jeden Eingangsparameter wird eine Verteilungsfunktion, die entweder aus Herstellerangaben, aus Beobachtungen oder (wenn sonst keine oder nur eine geringe Anzahl an Daten vorhanden ist) aus Expertenbefragungen stammt, angesetzt.

Im Zuge der Simulation wird das gleiche Berechnungsmodell, wie bei der Ermittlung des pessimistischen/optimistischen Wertes für  $U$ , herangezogen. Dabei werden aber nun für jeden Eingangswert Zufallszahlen innerhalb der gewählten Verteilungsfunktionen gewählt. Dieser Vorgang wird  $N$ -mal wiederholt und es werden dadurch  $N$  Werte für  $U$  errechnet. Diese zufällig ermittelten Werte für  $U$  lassen sich in Form eines Histogramms auftragen, welches durch eine Verteilungsdichtefunktion angenähert werden kann (siehe Bild 6–2).

<sup>104</sup> Vgl. SOBOL, I. M.: Die Monte-Carlo-Methode. S. 45ff



**Bild 6–2** Beispielhafte Darstellung des Histogramms für den Wert U inkl. der angenäherten Verteilungsdichtefunktion [in Anlehnung an Sobol'<sup>105</sup>]

#### 6.4.2 Erkenntnisse aus diesem Beispiel

Für dieses Beispiel kann, nach der Analyse der in Bild 6–2 dargestellten Wahrscheinlichkeitsverteilung, angegeben werden, dass die Werte für U mit einer Wahrscheinlichkeit von etwa 91 % zwischen 2,5 und 5,5 liegen.

Das angeführte Beispiel zeigt, dass die theoretischen Hintergründe der Monte-Carlo Methode relativ leicht verständlich sind. Als problematisch sind allerdings die Herkunft und die Richtigkeit der Eingangsparameter<sup>106</sup> zu erachten, da die Ergebnisse der Simulation wesentlich von den Grenzwerten und den Verteilungsfunktionen dieser abhängen.

*„Die Qualität der Prognose ist nur so gut wie die Qualität der Eingabedaten!“<sup>107</sup>*

### 6.5 Begriffsdefinitionen

Es sollen in diesem Kapitel die wichtigsten verwendeten mathematischen Größen und Begriffe für ein besseres Verständnis angeführt werden.

#### 6.5.1 Stochastik

Der Begriff der ‚Stochastik‘ ist ein Sammelbegriff für die Gebiete der Wahrscheinlichkeitstheorie und der Statistik und kann als ‚Mathematik des Zufalls‘ beschrieben werden.<sup>108</sup>

<sup>105</sup> Vgl. SOBOL, I. M.: Die Monte-Carlo-Methode. S. 50

<sup>106</sup> Eingangsparameter sind die jeweiligen Bandbreiten und die dazugehörigen Verteilungsfunktionen.

<sup>107</sup> TAUTSCHNIG, A.; FÖRCH, G.; SANDER, P.: Erfahrungen mit probabilistischen Kostenermittlungen im Hochbau. In: bauaktuell 09/2010. S. 216

<sup>108</sup> Vgl. HENZE, N.: Stochastik für Einsteiger - Eine Einführung in die faszinierende Welt des Zufalls. S. 1

### 6.5.2 Determinismus

*„Determinismus der, Philosophie: die Lehre von der eindeutigen Bestimmtheit allen Geschehens durch Ursachen, aller späteren Ereignisse durch frühere [...].“<sup>109</sup>*

Bei einer deterministischen Berechnung wird davon ausgegangen, dass Ereignisse in der Zukunft eindeutig bestimmt werden können, da sie durch Bedingungen in der Gegenwart klar definiert sind. Unsicherheiten werden bei dieser Berechnungsmethode nicht berücksichtigt. Bei einem sicheren deterministischen System tritt ein Ereignis mit 100%iger Wahrscheinlichkeit ein.

### 6.5.3 Probabilismus

*„[...] Erkenntnis- und Wissenschaftstheorie: die Auffassung, dass es keine absolut wahren, sondern nur wahrscheinliche Sätze gibt. – In quantenphysikal. Theorien drückt der P. aus, dass gewisse Ereignisse nur mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit vorhersagbar sind.“<sup>110</sup>*

Bei probabilistischen Systemen ist es grundsätzlich nicht möglich ein bestimmtes zukünftiges Ereignis eindeutig vorherzusagen. Es kann nur angegeben werden, mit welcher Wahrscheinlichkeit ein Ereignis (z.B. ein bestimmter Kostenwert für Stahlbetonarbeiten) eintreten wird. Für die Berechnung solcher Systeme ist eine Simulation, welche auf der Anwendung von Zufallszahlen basiert, erforderlich.

### 6.5.4 Schiefe

Die Schiefe einer Funktion oder Verteilung ist ein Maß für die Symmetrie. Jede Abweichung von der Symmetrie wird als Schiefe oder Steilheit bezeichnet. Weist die Verteilung nach rechts einen flacheren Verlauf auf, so spricht man von einer positiven Schiefe (oder einer linkssteilen Verteilung), umgekehrt liegt eine negative Schiefe (oder rechtssteile Verteilung) vor.<sup>111</sup>

In Bild 6–3 sind eine linksschiefe (negative Schiefe) und eine rechtsschiefe (positive Schiefe) Verteilung dargestellt.

<sup>109</sup> F.A. BROCKHAUS GMBH: Brockhaus in fünfzehn Bänden. S. 195 – Band 3

<sup>110</sup> F.A. BROCKHAUS GMBH: Brockhaus in fünfzehn Bänden. S. 196 – Band 11

<sup>111</sup> Vgl. EICHLER, A.; VOGEL, M.: Leitfaden Stochastik - Für Studierende und Ausübende des Lehramts. S. 34f

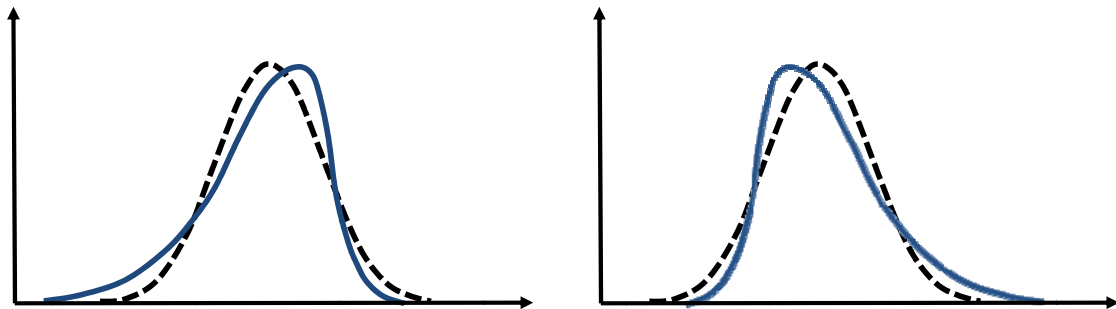


Bild 6–3 Linksschiefe Verteilung (links) – rechtsschiefe Verteilung (rechts)<sup>112</sup>

### 6.5.5 Median

Der Median (oder auch Zentralwert) beschreibt jenen Wert einer Verteilung, bei dem genau 50 % der Werte kleiner und 50 % der Werte größer sind als der Median. Somit teilt der Median eine Verteilungsfunktion in zwei gleich große Flächen. Bei symmetrischen Verteilungen entspricht der Median dem arithmetischen Mittel. Sind in einer Verteilung stark abweichende Werte („Ausreißer“) enthalten, so ist der Median dem arithmetischen Mittelwert vorzuziehen, da Ausreißer den Median nicht beeinflussen.<sup>113</sup>

### 6.5.6 Modus

Der Modus (oder Modalwert) beschreibt bei einer Häufigkeitsverteilung jenen Wert, der am häufigsten auftritt und bildet somit ein Zentrum einer Verteilungsfunktion. Bei einem Histogramm (bzw. bei einem Säulendiagramm) beschreibt der Modalwert jene Säule mit der größten Häufigkeit.<sup>114</sup>

### 6.5.7 Mittelwert

Der Mittelwert (oder kurz: Mittel) ist ein sogenannter Lageparameter und kann je nach Aufgabenstellung auf unterschiedliche Arten berechnet werden. Einige Beispiele für Mittelwerte sind:

- ◆ Arithmetisches Mittel
- ◆ Geometrisches Mittel
- ◆ Harmonisches Mittel
- ◆ Quadratisches Mittel

<sup>112</sup> Vgl. [http://de.wikipedia.org/wiki/Schiefe\\_%28Statistik%29](http://de.wikipedia.org/wiki/Schiefe_%28Statistik%29). Datum des Zugriffs: 06.10.2011

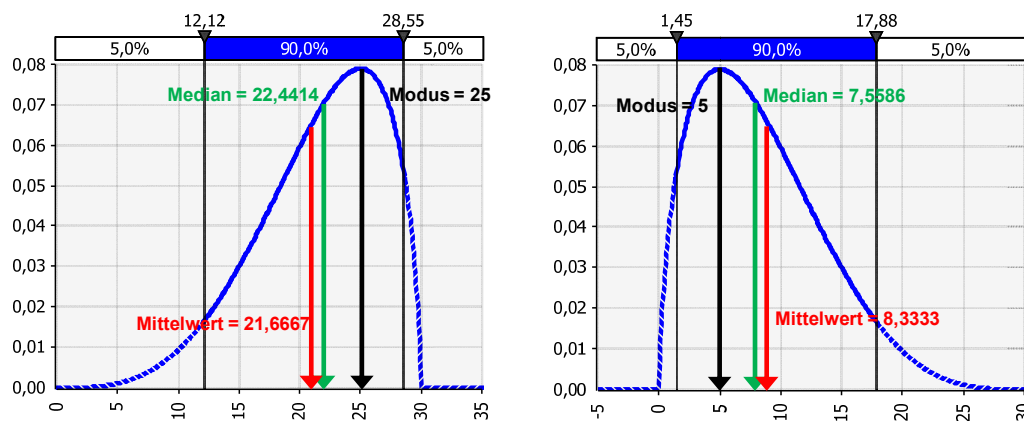
<sup>113</sup> Vgl. BARTSCH, H.: Taschenbuch Mathematischer Formeln - 20. Auflage. S. 677

<sup>114</sup> Vgl. EICHLER, A.; VOGEL, M.: Leitfaden Stochastik - Für Studierende und Ausübende des Lehramts. S. 25

Wobei das arithmetische Mittel vorrangig in der Statistik und das geometrische Mittel in der Wirtschaftsstatistik angewandt wird. In Glg. (40) ist die Berechnung des arithmetischen Mittels dargestellt, wobei  $x_i$  die Einzelwerte und  $n$  die Anzahl der Einzelwerte sind.<sup>115</sup>

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \tag{40}$$

In Bild 6–4 wird der Unterschied zwischen Median, Modus und Mittelwert am Beispiel von PERT-Verteilungen mit unterschiedlicher Schiefe (siehe Kap. 6.5.4) grafisch dargestellt.



**Bild 6–4 Unterschied Median, Modus und Mittelwert am Beispiel von PERT-Verteilungen**<sup>116</sup>

Bei linksschiefen Verteilungen befinden sich der Median und der Mittelwert jeweils links vom Modalwert (oder Modus). Bei rechtsschiefen Verteilungen ist dieser Umstand entsprechend umgekehrt.

### 6.5.8 Erwartungswert

Der Erwartungswert  $E(X)$  (oder auch  $\mu$ ) stellt einen erwarteten Mittelwert einer Zufallsvariablen dar. Er wird durch Aufsummieren aller Produkte aus Zufallszahlen  $x_i$  und der jeweiligen Einzelwahrscheinlichkeiten  $p_i$  gebildet<sup>117</sup>.

$$E(X) = \mu = \sum_{i=1}^{\infty} x_i \cdot p_i \tag{41}$$

Der Erwartungswert stellt eine Größe dar, mit der bei einer großen Anzahl an Versuchen zu rechnen ist. Es kann sich dabei aber durchaus um einen Wert handeln, den eine Zufallsvariable nie annehmen kann.

<sup>115</sup> Vgl. BARTSCH, H.: Taschenbuch Mathematischer Formeln - 20. Auflage. S. 673ff

<sup>116</sup> Die Verteilungsfunktionen wurden mit dem Programm @Risk der Palisade Corporation erstellt.

<sup>117</sup> Gilt für eine diskrete (endliche, abzählbare) Verteilungsfunktion.

Als Beispiel wird hier der Erwartungswert der Augenzahl bei einem Würfelversuch mit einem idealen Würfel dargestellt.

Die Wahrscheinlichkeit  $p_i$  für jede Augenzahl beträgt  $1/6$ . Die Zufallszahlen  $x_i$  sind in diesem Fall 1, 2, 3, 4, 5, und 6. So kann der Erwartungswert nach Glg. (41) berechnet werden.

$$E(X) = \mu = \frac{1}{6} + \frac{2}{6} + \frac{3}{6} + \frac{4}{6} + \frac{5}{6} + \frac{6}{6} = \frac{21}{6} = 3,5$$

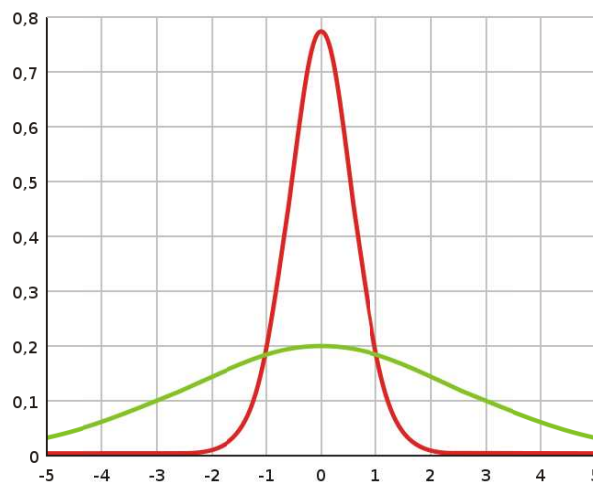
Der Erwartungswert für die Augenzahl eines Würfelversuchs beträgt demnach 3,5. Dieser Wert kann allerdings bei einem Wurf niemals erzielt werden.<sup>118</sup>

### 6.5.9 Varianz

Die Varianz ist ein Maß für die Streuung, also die Abweichung, einer Zufallsvariablen um ihren Erwartungswert. Für diskrete Verteilungen wird sie folgendermaßen berechnet:<sup>119</sup>

$$Var(X) = \sum_{i=1}^{\infty} (x_i - \mu)^2 \cdot p_i \quad (42)$$

Ein Beispiel für zwei Verteilungen mit gleichem Erwartungswert ( $\mu = 0$ ) aber unterschiedlichen Varianzen sind in Bild 6–5 dargestellt.<sup>120</sup>



**Bild 6–5** Verteilungskurve mit geringer (rot) und großer Varianz (grün)<sup>121</sup>

<sup>118</sup> Vgl. <http://www.gefilde.de/ashome/vorlesungen/anwendungen/modellbildung/v07/Erwartungswert.pdf>. Datum des Zugriffs: 05.10.2011 und BARTSCH, H.: Taschenbuch Mathematischer Formeln - 20. Auflage. S. 702f

<sup>119</sup> Vgl. EICHLER, A.; VOGEL, M.: Leitfaden Stochastik - Für Studierende und Ausübende des Lehramts. S. 156

<sup>120</sup> Vgl. [http://de.wikipedia.org/wiki/Varianz\\_%28Stochastik%29](http://de.wikipedia.org/wiki/Varianz_%28Stochastik%29). Datum des Zugriffs: 05.10.2011

<sup>121</sup> [http://de.wikipedia.org/wiki/Varianz\\_%28Stochastik%29](http://de.wikipedia.org/wiki/Varianz_%28Stochastik%29). Datum des Zugriffs: 05.10.2011



### 6.5.10 Standardabweichung

Die Standardabweichung ist ein Maß für die Streuung der Werte einer Zufallsvariablen um ihren Mittelwert. Und errechnet sich aus der Varianz wie folgt:<sup>122</sup>

$$\sigma = \sqrt{\text{Var}(X)} \quad (43)$$

Die Standardabweichung  $s$  kann aber auch über das arithmetische Mittel mit nachstehender Gleichung errechnet werden:<sup>123</sup>

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (44)$$

### 6.5.11 Quantil, Quartil, Quintil, Dezil

Ein Quantilwert  $Q_p$  beschreibt einen Punkt einer Verteilungsfunktion unter dem sich ein gewisser Prozentsatz  $p$  der Werte befindet.

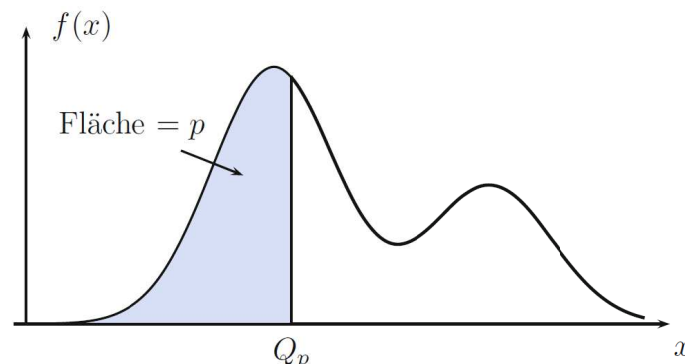


Bild 6–6 Quantilwert einer Verteilungsfunktion [Henze<sup>124</sup>]

Ein Quartil (Viertelwert) ist ein spezieller Quantilwert, bei dem die Verteilungsfunktion in 4 Teile gleicher Fläche (in 25 % Schritten) unterteilt wird. Unter dem ersten Quartil befinden sich 25 % der Werte, unter dem zweiten Quartil befinden sich 50 % der Werte usw.<sup>125</sup>

Ein Quintil (Fünftelwert) ist ebenfalls ein spezieller Quantilwert, bei dem die Verteilungsfunktion in 5 Teile gleicher Fläche (in 20 % Schritten) unterteilt wird. Ein Dezil ist ähnlich einem Quartil oder Quintil nur wird dabei die Verteilung in 10 Teile gleicher Fläche (in 10 % Schritten) zerlegt.<sup>126</sup>

<sup>122</sup> Vgl. EICHLER, A.; VOGEL, M.: Leitfaden Stochastik - Für Studierende und Ausübende des Lehramts. S. 156

<sup>123</sup> Vgl. EICHLER, A.; VOGEL, M.: Leitfaden Stochastik - Für Studierende und Ausübende des Lehramts. S. 33

<sup>124</sup> HENZE, N.: Stochastik für Einsteiger - Eine Einführung in die faszinierende Welt des Zufalls. S. 304

<sup>125</sup> Vgl. EICHLER, A.; VOGEL, M.: Leitfaden Stochastik - Für Studierende und Ausübende des Lehramts. S. 26ff

<sup>126</sup> Vgl. HENZE, N.: Stochastik für Einsteiger - Eine Einführung in die faszinierende Welt des Zufalls. S. 304

### 6.5.12 Iteration

Als Iteration wird im Zuge der Monte-Carlo Methode ein Berechnungsdurchgang bezeichnet, bei dem jeweils eine Zufallszahl aus den Verteilungsfunktionen der Eingangsparameter generiert wird, um ein Einzelergebnis eines möglichen Szenarios zu berechnen. Die Anzahl der Iterationen kann für eine Simulation beliebig gewählt werden. Je größer aber die Anzahl ist, desto stabiler werden die Ausgabewerte (Mittelwert, Varianz etc.). Die Einzelwertergebnisse jeder Iteration werden dann in Ausgabeverteilungen (Histogrammen) zusammengefasst.<sup>127</sup>

## 6.6 Wahl der Verteilungsfunktionen

Den Eingangsgrößen für Simulationen nach der Monte-Carlo Methode muss jeweils eine Verteilungsfunktion zugewiesen werden. Diese Funktionen können beliebige Formen annehmen. Einige der vom Programm @Risk standardmäßig wählbaren Funktionen sind in Bild 6–7 ersichtlich. Weitere Verteilungsfunktionen können ausgewählt oder selbst definiert werden. Darüber hinaus können aber auch historische Daten, z.B. aus bereits abgeschlossenen Projekten in eine Verteilungsfunktion umgewandelt und so der Berechnung zugrunde gelegt werden.

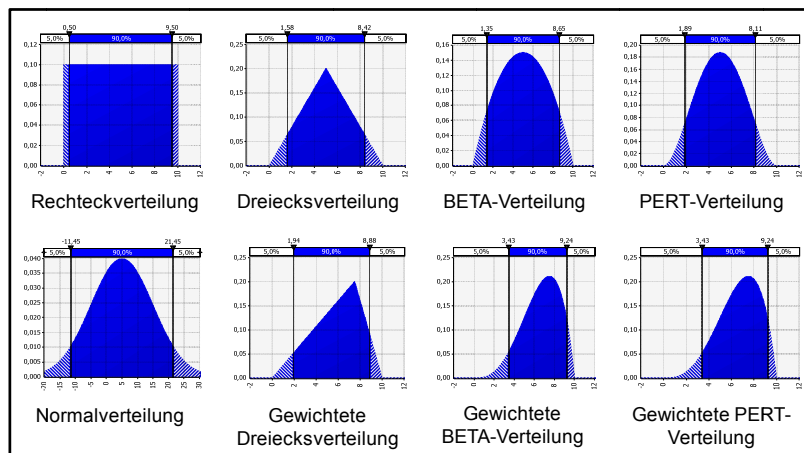


Bild 6–7 Mögliche Verteilungsfunktionen<sup>128</sup>

Es stellt sich aber die Frage, welche Verteilung dem jeweiligen Eingangswert am ehesten entspricht. Kann man Daten aus vergangenen, nicht zu lange zurückliegenden Projekten verwenden, so ist dies bestimmt die beste Möglichkeit um eine Voraussage zu treffen. Allerdings ist dabei zu beachten, dass jedes Bauprojekt ein Unikat und somit immer andere Baustellen-, Bauwerks-, Umfeld-, Umweltfaktoren etc. zu berücksichtigen sind. Es ist zu empfehlen nur Daten ähnlicher Projekte zu einer Verteilungsfunktion zusammenzufassen.

<sup>127</sup> Vgl. PALISADE CORPORATION: Benutzerhandbuch für @Risk - Risikoanalyse- und Simulations Add-In für Microsoft Excel. S. 36

<sup>128</sup> Die Verteilungsfunktionen wurden mit dem Programm @Risk der Palisade Corporation erstellt.

Liegen keine oder nur wenige Daten aus alten Projekten vor, so muss eine Verteilungsfunktion gewählt werden. Es sind dabei asymmetrische Verteilungen zu empfehlen, da man so Expertenwissen in die Berechnungen einfließen lassen kann.

In vielen Forschungsarbeiten werden oft asymmetrische Dreiecksfunktionen für die Eingangswerte herangezogen. Der Vorteil dieser Verteilung ist einerseits die leichte Definition ihrer Form über lediglich 3 Werte (Minimum, erwarteter Wert<sup>129</sup> und Maximum) und andererseits die einfache Handhabbarkeit und Verständlichkeit. Weiters können die drei geforderten Werte (Minimum, erwarteter Wert und Maximum) von Experten relativ einfach, aufgrund von Erfahrungen, abgeschätzt werden. Genau hier liegt aber auch das Problem dieser Verteilung.<sup>130</sup>

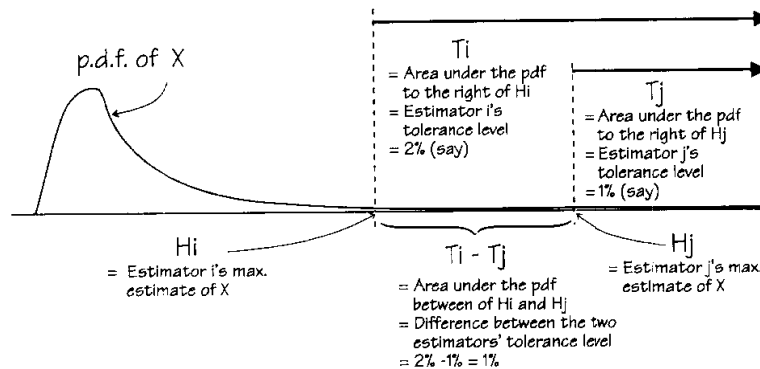
*Chau* untersuchte die Gültigkeit der Dreiecksverteilungen bei der Berechnung von Baukosten mit Hilfe der Monte-Carlo Methode. Es wurden dabei 10 Kostenkomponenten für Elektroinstallationen von sieben erfahrenen Experten geschätzt. Die Experten sollten für jede der untersuchten Kostenpositionen einen minimalen, einen erwarteten und einen maximalen Wert angeben. Dies geschah in mehreren Phasen nach dem Prinzip der ‚Delphi-Methode‘<sup>131</sup> bis die Experten mit ihrer Wahl zufrieden waren. Auffällig bei dieser Untersuchung war, dass sich der erwartete Wert in den meisten Fällen näher am Minimum als am Maximum befand. Dies wird dadurch erklärt, dass es eine theoretische untere Grenze der Baukosten gibt, die durch den minimalsten Einsatz an Ressourcen bestimmt ist, aber eine obere Grenze nicht existiert. Somit hat jeder Experte aufgrund seiner persönlichen Erfahrungen eine andere Sichtweise darauf, wie hoch die maximalen Kosten werden können. In einer zweiten Bewertungsrunde sollten die Experten angeben, mit welcher Wahrscheinlichkeit ihr erwarteter Wert jeweils überschritten würde. Diese Einschätzungen wurden mit der errechneten Überschreitungs-Wahrscheinlichkeit für die erwarteten Werte auf Basis von Dreiecksverteilungen verglichen. In den meisten Fällen lag die errechnete Wahrscheinlichkeit weit über der subjektiv angegebenen der Experten. Dies legt die Vermutung nahe, dass die Dreiecksverteilung der Eingangswerte eine zu große Verzerrung hin zu den Maximalwerten bewirkt. *Chau* gibt für die Form der Verteilungsfunktion eine rechtsschiefe Verteilung (auch Verteilung mit positiver Schiefe genannt), wie sie schematisch in Bild 6–8 dargestellt ist, an.<sup>132</sup>

<sup>129</sup> Wird je nach Literatur auch als ‚wahrscheinlichster‘, ‚höchstwahrscheinlicher‘ oder ‚häufigster‘ Wert bezeichnet.

<sup>130</sup> Vgl. CHAU, K. W.: The validity of the triangular distribution assumption in Monte Carlo simulation of construction costs: empirical evidence from Hong Kong. In: Construction Management and Economics 01/1995. S. 16

<sup>131</sup> Die Delphi-Methode ist ein mehrstufiges, schriftliches Befragungsverfahren, um Ereignisse, die in der Zukunft liegen, bestmöglich einschätzen zu können. Namensgeber dieser Methode ist das antike Orakel von Delphi.

<sup>132</sup> Vgl. CHAU, K. W.: The validity of the triangular distribution assumption in Monte Carlo simulation of construction costs: empirical evidence from Hong Kong. In: Construction Management and Economics 01/1995. S. 15ff



The thinner the right tail, the larger difference between  $H_i$  and  $H_j$  for the same value of  $(T_i - T_j)$  and therefore the larger the coefficient of variation for the maximum estimate.

**Bild 6–8 Rechtsschiefe Verteilungsfunktion für Baukosten (schematische Darstellung) [Chau<sup>133</sup>]**

Diese Form könnte zwar durch eine Log-Normalverteilung sehr gut angenähert werden, allerdings sind die Eingabewerte (Mittelwert und Standardabweichung) schwer wahrzunehmen und von Experten auch nicht leicht abzuschätzen. Außerdem weist diese Verteilung keine obere Grenze auf.<sup>134</sup>

Eine weitere Annäherung kann durch die BETA-General-Verteilung geschaffen werden. Diese Funktion ist allerdings durch 4 Parameter (Minimum, Maximum und 2 Formparameter) gekennzeichnet und somit auch nicht mit den bisher üblich erfassten Daten (Minimum, erwarteter Wert und Maximum) zu beschreiben.<sup>135</sup>

Die PERT-Verteilung<sup>136</sup> stellt eine Zwischenstufe, zwischen einer Dreiecksverteilung und einer BETA-General-Verteilung dar. Einerseits wird sie, wie die Dreiecksverteilung, von nur 3 Parametern (Minimum, erwarteter Wert und Maximum) beschrieben. Andererseits ist die PERT-Verteilung ein spezieller Fall einer BETA-General-Verteilung, da die beiden fehlenden Formparameter aus den drei angegebenen Werten errechnet werden. Es kann aber für schiefe Verteilungen generell festgehalten werden, dass die PERT-Verteilung besser geeignet ist als eine Dreiecksverteilung, da weniger Gewicht in die Richtung der Schiefe gelegt wird. Somit kommt es zu keiner systematischen Verzerrung der Ergebnisse in eine Richtung.<sup>137</sup>

Schach verwendet für eine Machbarkeitsstudie im Bereich des Verkehrswegebbaus zur Ermittlung von Kosten Dreiecks-, BETA- und PERT-Verteilungen, da diese schief sein können und daher typische Kostenverteilungen besonders gut repräsentieren. Auch er stellt fest, dass häufig von rechtsschiefen Verteilungen ausgegangen werden müsse, da Mini-

<sup>133</sup> CHAU, K. W.: The validity of the triangular distribution assumption in Monte Carlo simulation of construction costs: empirical evidence from Hong Kong. In: Construction Management and Economics 01/1995. S. 19

<sup>134</sup> Vgl. CHAU, K. W.: The validity of the triangular distribution assumption in Monte Carlo simulation of construction costs: empirical evidence from Hong Kong. In: Construction Management and Economics 01/1995. S. 19

<sup>135</sup> Vgl. CHAU, K. W.: The validity of the triangular distribution assumption in Monte Carlo simulation of construction costs: empirical evidence from Hong Kong. In: Construction Management and Economics 01/1995. S. 19

<sup>136</sup> PERT steht für Program Evaluation and Review Task

<sup>137</sup> Vgl. PALISADE CORPORATION: Benutzerhandbuch für @Risk - Risikoanalyse- und Simulations Add-In für Microsoft Excel. S. 607

malkosten in einer relativen Nähe zum Erwartungswert liegen, maximale Kosten jedoch vom Erwartungswert weit entfernt sein können.<sup>138</sup>

Derzeit werden auch von *Hofstadler* an der TU Graz Untersuchungen für Verteilungsfunktionen von Aufwandswerten für Deckenschalungsarbeiten durchgeführt. Auch hier konnte mit Hilfe von 19 Expertenbefragungen und durchgeführten Fittings, ähnlich wie bei *Chau*, festgestellt werden, dass eine LogLogistic Verteilung die Expertenangaben bestmöglich widerspiegelt.<sup>139</sup>

Es wird daher empfohlen, sowohl für Kostenkomponenten aber auch für Aufwandswerte und Leistungswerte in den Berechnungen möglichst Log-Normal- oder LogLogistic-Verteilungen den üblichen Dreiecksverteilungen vorzuziehen. Ist dies nicht möglich, so sind diese Verteilungen durch BETA- oder PERT-Verteilungen anzunähern. Für die anderen Eingangsparameter wie Mengen, Zuschläge etc. können durchaus asymmetrische Dreiecksverteilungen herangezogen werden.

## 6.7 Korrelationen

Wird eine Simulation beispielsweise der Baukosten nach dem bisher beschriebenen Muster der Monte-Carlo Methode durchgeführt, erhält man ein Ergebnis, bei dem alle Eingangswerte unabhängig voneinander sind. Dies ist in Wirklichkeit aber nicht der Fall, da gewisse Abhängigkeiten zwischen den Eingangsparametern herrschen. Wenn z.B. der Bewehrungsgrad sehr hoch ist, so wird auch der Aufwandswert für die Bewehrungsarbeiten höher sein. Umgekehrt wird der Aufwandswert für Schalungsarbeiten sinken, wenn auch der Schalungsgrad niedrig ist. Die Verknüpfung solcher Abhängigkeiten erfolgt mit Hilfe von Korrelationen.

Auch *Chapman/Ward* geben an, dass eine unbegründete Unabhängigkeit zwischen Parametern gefährlich ist und zu Fehleinschätzungen führen kann.<sup>140</sup>

Zwei Parameter können mit einem Korrelationskoeffizient zwischen -1 und +1 miteinander gekoppelt werden. Dabei bedeutet eine Korrelation von -1, dass eine negativ lineare Korrelation zwischen den beiden Werten besteht. Bei einer Korrelation von 0 sind die beiden Parameter unabhängig voneinander. Positive lineare Abhängigkeit wird durch einen Korrelationskoeffizienten von +1 ausgedrückt. Es sind aber auch beliebige Korrelationen zwischen -1 und 0 sowie zwischen 0 und +1 möglich. Eine grafische Darstellung der wählbaren Korrelationen „r“ zwischen zwei Parametern A und B sind in Bild 6–9 ersichtlich.

<sup>138</sup> Vgl. SCHACH, R.: Stochastische Investitionskostenberechnung für Verkehrsinfrastrukturprojekte. Fachvortrag auf der 5. Dresdner Fachtagung Transrapid am 29. September 2005. S. 114

<sup>139</sup> Vgl. HOFSTADLER, C.: Verteilungsfunktion für Aufwandswerte bei Schalarbeiten - Herleitung der Verteilungsfunktion aus den Ergebnissen einer Expertenbefragung. Unveröffentlichtes Arbeitspapier. S. 7ff

<sup>140</sup> Vgl. CHAPMAN, C.; WARD, S.: Project Risk Management - Processes, Techniques and Insights. S. 209

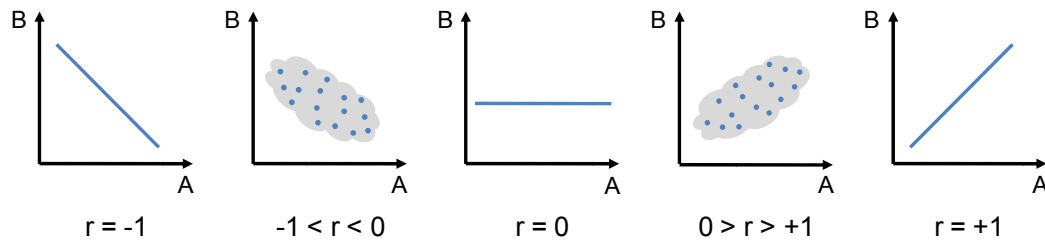


Bild 6–9 Korrelationen zwischen zwei Parametern A und B<sup>141</sup>

Der Zusammenhang von zwei oder mehreren Werten kann auch mit Hilfe von Vektoren dargestellt werden. Weisen zwei Vektoren in die gleiche Richtung und überlagern sich, so liegt eine positive lineare Korrelation vor. Stehen die beiden Vektoren in einem 90° Winkel aufeinander, so sind sie unabhängig voneinander. Eine negative lineare Korrelation besteht dann, wenn die Vektoren genau in die entgegengesetzte Richtung zeigen. Die Umrechnung von einem Korrelationskoeffizienten  $r$  auf einen Winkel  $\alpha$  erfolgt laut nachstehender Gleichung.<sup>142</sup>

$$\cos \alpha = r \tag{45}$$

In Bild 6–10 sind mögliche Korrelationen wiederum für zwei Parameter A und B in Form von Vektoren aufgetragen.

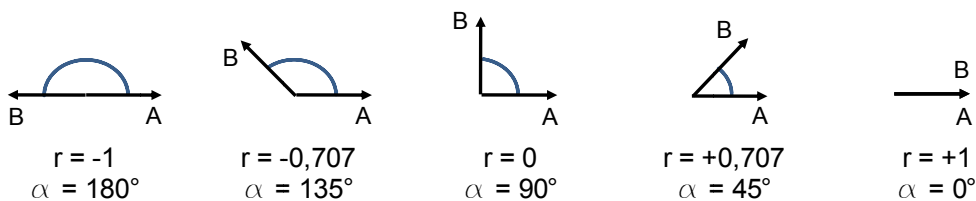


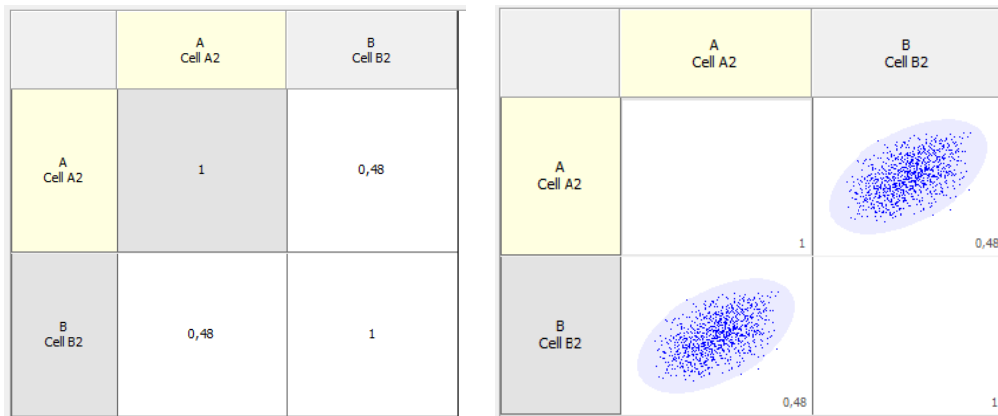
Bild 6–10 Korrelationen zwischen zwei Parametern A und B in Vektorform<sup>143</sup>

Für die Anwendung der Monte-Carlo Methode in einer Simulation mit einem Softwareprogramm erfolgt die Eingabe von Korrelationen anhand von Matrizen. In diesen Matrizen werden die Korrelationskoeffizienten direkt eingegeben oder aber grafisch durch die Anpassung von Punktwolken festgelegt. Bild 6–11 zeigt solche Matrizen für zwei Eingangsparameter A und B.

<sup>141</sup> Vgl. <http://www.faes.de/Basis/Basis-Lexikon/Basis-Lexikon-Multivariate/Basis-Lexikon-Faktorenanalyse/basis-lexikon-faktorenanalyse.html>. Datum des Zugriffs: 10.12.2011

<sup>142</sup> Vgl. <http://www.faes.de/Basis/Basis-Lexikon/Basis-Lexikon-Multivariate/Basis-Lexikon-Faktorenanalyse/basis-lexikon-faktorenanalyse.html>. Datum des Zugriffs: 10.12.2011

<sup>143</sup> Vgl. <http://www.faes.de/Basis/Basis-Lexikon/Basis-Lexikon-Multivariate/Basis-Lexikon-Faktorenanalyse/basis-lexikon-faktorenanalyse.html>. Datum des Zugriffs: 10.12.2011



**Bild 6–11 Korrelationsmatrizen in @Risk (links: Darstellung mit Zahlenwerten; rechts: Darstellung mit Punktwolken)<sup>144</sup>**

Bei einer Korrelationsmatrix handelt es sich immer um eine symmetrische Matrix, bei der die Determinante positiv sein muss<sup>145</sup>. Das Programm @Risk überprüft automatisch eine eingegebene Korrelationsmatrix auf diese Bedingung hin und schlägt bestmögliche Änderungen vor, sollte die Determinante negativ sein.

Dabei handelt es sich allerdings nur um einen minimalen Test, der nicht garantiert, dass die Korrelationskoeffizienten „richtig“ sind.<sup>146</sup>

Um die Auswirkungen von Korrelationen auf ein Berechnungsergebnis ersichtlich zu machen, wurden sehr einfache Berechnungen (Anwendung der vier Grundrechenarten) mit Hilfe der Monte-Carlo Methode und dem Softwareprogramm @Risk durchgeführt. Die Ergebnisse dieser sind in den folgenden Kapiteln dargestellt.

**6.8 Einfluss von Korrelationen auf die Berechnung**

Für die folgenden Beispiele werden 2 Eingangsparameter A und B gewählt, die beide der Einfachheit halber durch Dreiecksverteilungen definiert werden. Diese Verteilungen sind in Bild 6–12 dargestellt.

<sup>144</sup> Screenshots aus dem Programm @Risk der Palisade Corporation.

<sup>145</sup> Vgl. HULETT, D. T.: Project Cost Risk Analysis. [http://www.projectrisk.com/White\\_Papers/Project\\_Cost\\_Risk\\_Analysis.pdf](http://www.projectrisk.com/White_Papers/Project_Cost_Risk_Analysis.pdf). Datum des Zugriffs: 14.09.2011

<sup>146</sup> Vgl. HULETT, D. T.: Project Cost Risk Analysis. [http://www.projectrisk.com/White\\_Papers/Project\\_Cost\\_Risk\\_Analysis.pdf](http://www.projectrisk.com/White_Papers/Project_Cost_Risk_Analysis.pdf). Datum des Zugriffs: 14.09.2011

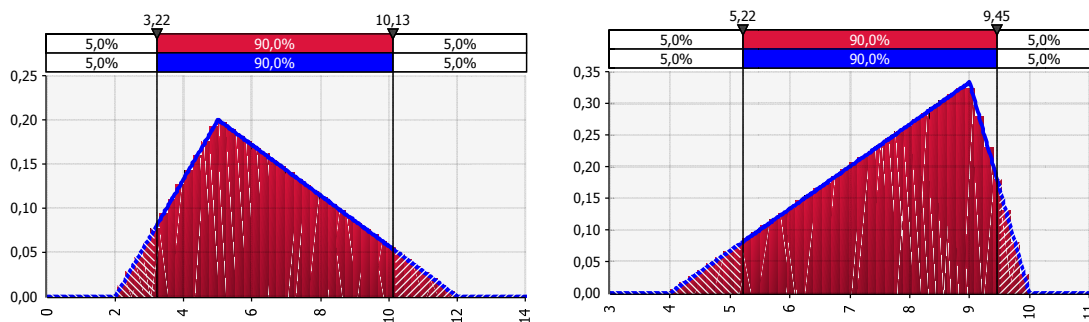


Bild 6–12 Verteilungsfunktionen der Eingangsparameter A (links) und B (rechts)<sup>147</sup>

In weiterer Folge werden mit diesen Werten die Summe, die Differenz, das Produkt und der Quotient mit jeweils unterschiedlichen Korrelationen der beiden Eingangsgrößen errechnet und die Ergebnisse in Form von Verteilungsfunktionen dargestellt.

Folgende Korrelationskoeffizienten werden für die Berechnungen berücksichtigt:

Tabelle 6.3 Korrelationskoeffizienten

positive Korrelationen		negative Korrelationen	
Bezeichnung	Koeffizient	Koeffizient	Bezeichnung
Unabhängig	0	0	Unabhängig
Leicht positiv	0,5	-0,5	Leicht negativ
Positiv	0,7	-0,7	Negativ
Linear positiv	1	-1	Linear negativ

Dabei ist anzumerken, dass je zwei Berechnungen für eine unabhängige Beziehung zwischen den Werten A und B durchgeführt werden, um zu verdeutlichen, dass jede Berechnung zu einem leicht abweichenden Ergebnis führt. Dies ist dadurch zu begründen, dass immer andere Zufallszahlen den Berechnungen zugrunde gelegt werden (siehe dazu Kap. 6.3).

### 6.8.1 Addition

Die beiden Parameter A und B werden addiert, die Summe wird für jede Variation der Korrelationen (siehe Tabelle 6.3) in Form von Verteilungsfunktionen aufgetragen. Das Ergebnis wird in Bild 6–13 dargestellt. Es wurden jeweils 50.000 Iterationen durchgeführt.

Auf der Abszisse sind die errechneten Werte und auf der Ordinate die entsprechenden Häufigkeiten aufgetragen. Die Fläche, unterhalb jeder Funktion, weist in Summe eine Größe von 1 auf. Die beiden Marker bei den Werten 10,08 und 18,26 beschreiben das 5 % bzw. 95 % Quantil der roten Verteilungsfunktion („PLUS-Unabhängig“). Die Prozentangaben auf der Oberseite des Diagramms geben für jede Verteilungsfunktion an, wie viel Prozent der Werte jeweils innerhalb der Marker bzw. darüber und darunter liegen.

<sup>147</sup> Die Verteilungsfunktionen wurden mit dem Programm @Risk der Palisade Corporation erstellt.



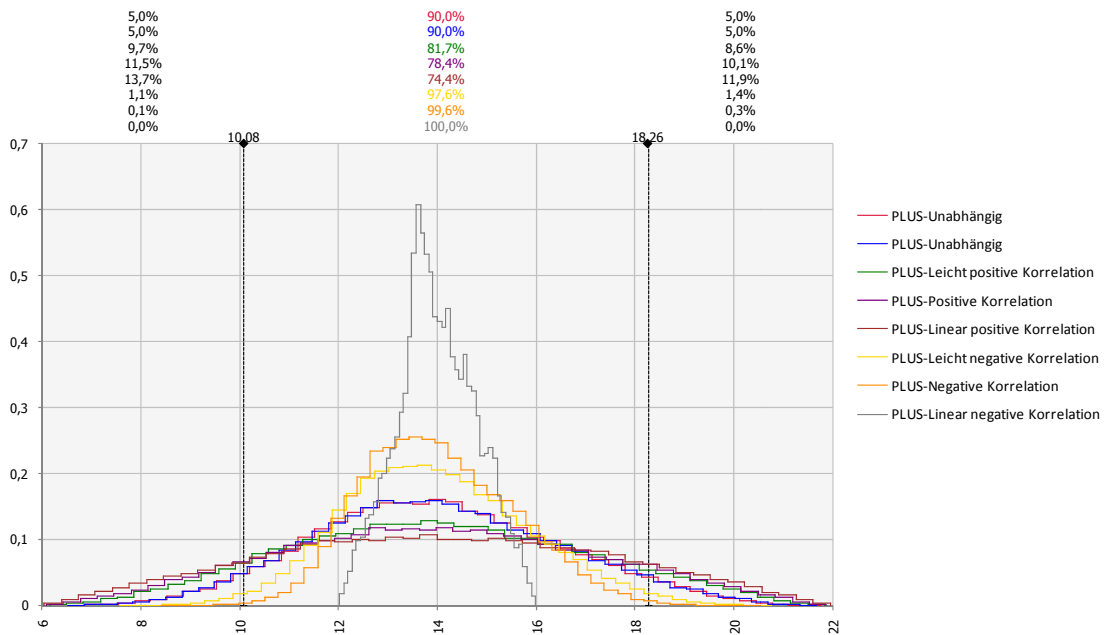


Bild 6–13 Verteilungsfunktionen – Addition von A und B<sup>148</sup>

Es fällt auf, dass die beiden Kurven mit unabhängigen Eingangswerten (Korrelationskoeffizient = 0) sehr ähnlich, aber nicht deckungsgleich sind. Der Grund dafür liegt in der Methodik der Monte-Carlo Simulation, bei der für jede Berechnung Zufallszahlen generiert werden. Weiters ist zu erkennen, dass sich die Streuung der Verteilungskurven erhöht, je höher der Korrelationskoeffizient wird (Maximum bei +1). Im Gegenzug wird die Varianz immer kleiner je niedriger der Korrelationskoeffizient wird (Minimum bei -1).

Außerdem ist zu beachten, dass alle Kurven annähernd den gleichen Mittelwert (~ 14,0) aufweisen, sich die Standardabweichung jedoch mit jeder Änderung der Korrelationen erheblich ändert. Die Übereinstimmung der Mittelwerte ist aber keineswegs eine Gesetzmäßigkeit, sondern stellt sich nur bei einer ausreichend großen Anzahl an Iterationen als ein relativ stabiler Wert ein. Somit haben die Korrelationen sowohl einen Einfluss auf den Mittelwert, als auch auf die Streuung der Ergebnisse.

### 6.8.2 Subtraktion

Hierbei wird für jede Iteration eine Subtraktion (= B – A) durchgeführt und für alle aufgelisteten Korrelationskoeffizienten die Ergebnisse in Form von Verteilungsfunktionen dargestellt (siehe Bild 6–14). Auch für die Subtraktionen wurden jeweils 50.000 Iterationen durchgeführt.

Auf der Abszisse sind die errechneten Werte und auf der Ordinate die entsprechenden Häufigkeiten aufgetragen. Die Fläche, unterhalb jeder Funktion, weist in Summe eine Grö-

<sup>148</sup> Die Verteilungsfunktionen wurden mit dem Programm @Risk der Palisade Corporation erstellt.

ße von 1 auf. Die beiden Marker bei den Werten -2,97 und 5,08 beschreiben das 5 % bzw. 95 % Quantil der roten Verteilungsfunktion („MINUS-Unabhängig“). Die Prozentangaben auf der Oberseite des Diagramms geben für jede Verteilungsfunktion an, wie viel Prozent der Werte jeweils innerhalb der Marker bzw. darüber und darunter liegen.

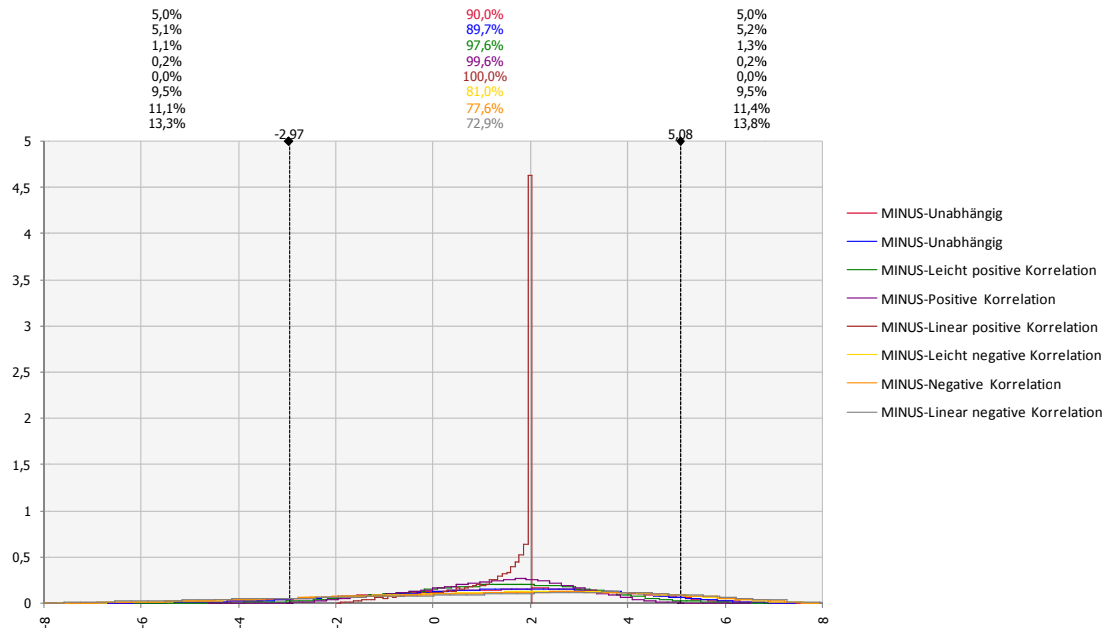


Bild 6–14 Verteilungsfunktion – Subtraktion von A und B<sup>149</sup>

Auffällig bei diesen Verteilungen ist die sehr hohe Wahrscheinlichkeit, dass ein Wert um +2, bei einer linear positiven Korrelation ausgegeben wird. Um eine bessere Vergleichbarkeit der anderen Kurven zu erhalten wird in Bild 6–15 die Ergebniskurve der linear positiven Korrelation ausgeblendet.

Nun erkennt man wie schon bei der Addition, dass sich die beiden Kurven mit unabhängigen Eingangswerten ähneln, aber nicht deckungsgleich sind. Weiters ist zu erkennen, dass sich die Varianz verringert, je höher die positive Korrelation wird. Umgekehrt wird die Streuung größer, je negativer die Korrelation zwischen den beiden Eingangsparametern wird. Bei einem Korrelationskoeffizienten von -1 ist für dieses Beispiel außerdem eine ausgeprägte Linksschiefe zu erkennen, deren Grund in der Wahl der Eingangswerte zu suchen ist (siehe linksschiefe Verteilung des Wertes B in Bild 6–12).

Außerdem ist zu beachten, dass alle Kurven annähernd den gleichen Mittelwert (~ 1,33) aufweisen, sich die Standardabweichung jedoch mit jeder Änderung der Korrelationen erheblich ändert. Die Übereinstimmung der Mittelwerte ist aber keineswegs eine Gesetzmäßigkeit, sondern stellt sich nur bei einer ausreichend großen Anzahl an Iterationen als ein relativ stabiler Wert ein. Somit haben die Korrelationen sowohl einen Einfluss auf den Mittelwert, als auch auf die Streuung der Ergebnisse.

<sup>149</sup> Die Verteilungsfunktionen wurden mit dem Programm @Risk der Palisade Corporation erstellt.

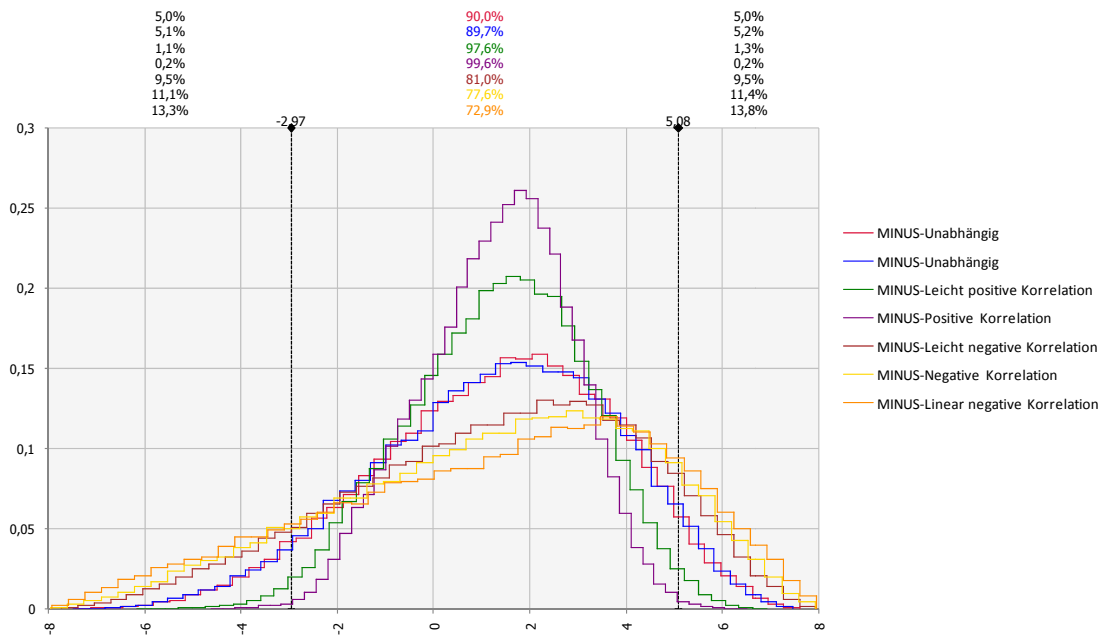


Bild 6–15 Verteilungsfunktion – Subtraktion von A und B (ohne linear positive Korrelation)<sup>150</sup>

### 6.8.3 Multiplikation

Für einen weiteren Vergleich werden die beiden bekannten Eingangsparameter A und B miteinander multipliziert und die Ergebnisse in Form von Verteilungsfunktionen dargestellt (siehe Bild 6–16). Bei den Berechnungen werden jeweils die Korrelationskoeffizienten variiert. Die Anzahl der Iterationen wurde auch für die Multiplikationen mit 50.000 gewählt.

Auf der Abszisse sind die errechneten Werte und auf der Ordinate die entsprechenden Häufigkeiten aufgetragen. Die Fläche, unterhalb jeder Funktion, weist in Summe eine Größe von 1 auf. Die beiden Marker bei den Werten 22,8 und 82,5 beschreiben das 5 % bzw. 95 % Quantil der roten Verteilungsfunktion („MAL-Unabhängig“). Die Prozentangaben auf der Oberseite des Diagramms geben für jede Verteilungsfunktion an, wie viel Prozent der Werte jeweils innerhalb der Marker bzw. darüber und darunter liegen.

<sup>150</sup> Die Verteilungsfunktionen wurden mit dem Programm @Risk der Palisade Corporation erstellt.

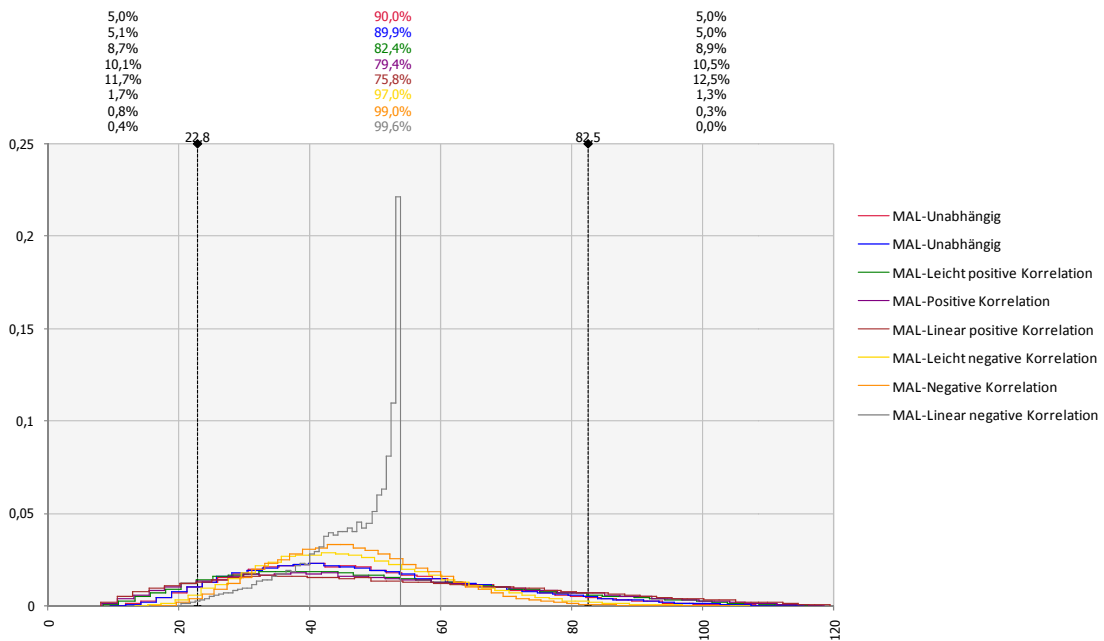


Bild 6–16 Verteilungsfunktion – Multiplikation von A und B<sup>151</sup>

Auffällig bei diesen Verteilungen ist, dass bei einer linear negativen Korrelation (-1) mit einer sehr hohen Wahrscheinlichkeit ein Wert von ca. +55 ausgegeben wird. Um eine bessere Vergleichbarkeit der anderen Kurven zu erhalten wird in Bild 6–17 die Ergebniskurve der negativ linearen Korrelation ausgeblendet.

Auch bei der Multiplikation ähneln sich die beiden Kurven mit unabhängigen Eingangswerten, sind jedoch aufgrund unterschiedlich generierter Zufallszahlen nicht deckungsgleich. Alle Kurven weisen abweichende Mittelwerte auf. Die Standardabweichung differiert ebenfalls mit jeder Änderung der Korrelationen. Somit haben die Korrelationen sowohl einen Einfluss auf den Mittelwert, als auch auf die Streuung der Ergebnisse. Bei negativen Korrelationen wird die Streuung der Ergebnisse immer geringer, bei positiven Korrelationen stellt sich eine immer größere Streuung ein. Außerdem wird für dieses Beispiel eine immer deutlichere rechtsschiefe der Ergebnisse mit steigender positiver Korrelation sichtbar.

<sup>151</sup> Die Verteilungsfunktionen wurden mit dem Programm @Risk der Palisade Corporation erstellt.

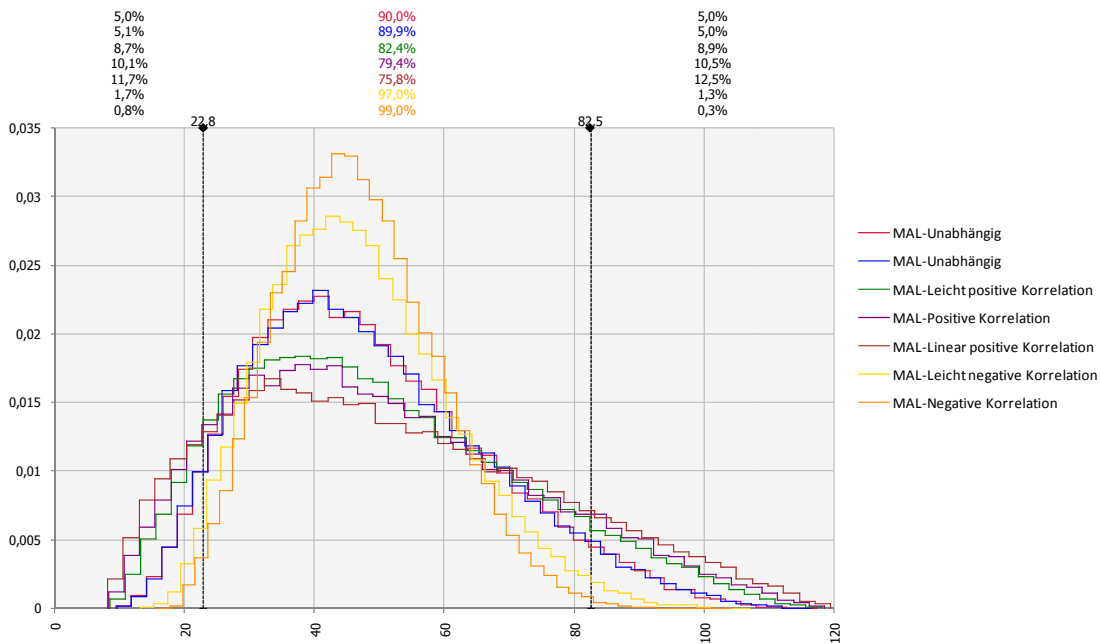


Bild 6–17 Verteilungsfunktion – Multiplikation von A und B (ohne negativ lineare Korrelation)<sup>152</sup>

### 6.8.4 Division

Auch für die Division wurden Vergleichsberechnungen mit unterschiedlichen Korrelationskoeffizienten durchgeführt. Dabei wurde der Wert B jeweils durch den Wert A dividiert. Die Ergebnisse werden in Form von Verteilungsfunktionen dargestellt (siehe Bild 6–18). Für die Divisionen wurden jeweils 50.000 Iterationen durchgeführt.

Auf der Abszisse sind die errechneten Werte und auf der Ordinate die entsprechenden Häufigkeiten aufgetragen. Die Fläche, unterhalb jeder Funktion, weist in Summe eine Größe von 1 auf. Die beiden Marker bei den Werten 0,679 und 2,449 beschreiben das 5 % bzw. 95 % Quantil der roten Verteilungsfunktion („DIVIDIERT-Unabhängig“). Die Prozentangaben auf der Oberseite des Diagramms geben für jede Verteilungsfunktion an, wie viel Prozent der Werte jeweils innerhalb der Marker bzw. darüber und darunter liegen.

Die beiden Ergebniskurven mit unabhängigen Eingangsparametern weisen, wie schon erwartet einen ähnlichen Verlauf auf. Bei variierenden Mittelwerten ändert sich die Standardabweichung der Verteilungskurven ebenfalls je nach Art und Größe der Korrelationen. Wobei sich die Streuung der Ergebnisse verringert, je höher die positiven Korrelationen werden. Bei größeren negativen Korrelationen erhöht sich die Streuung und für dieses Beispiel stellt sich eine rechtsschiefe Verteilung ein.

<sup>152</sup> Die Verteilungsfunktionen wurden mit dem Programm @Risk der Palisade Corporation erstellt.

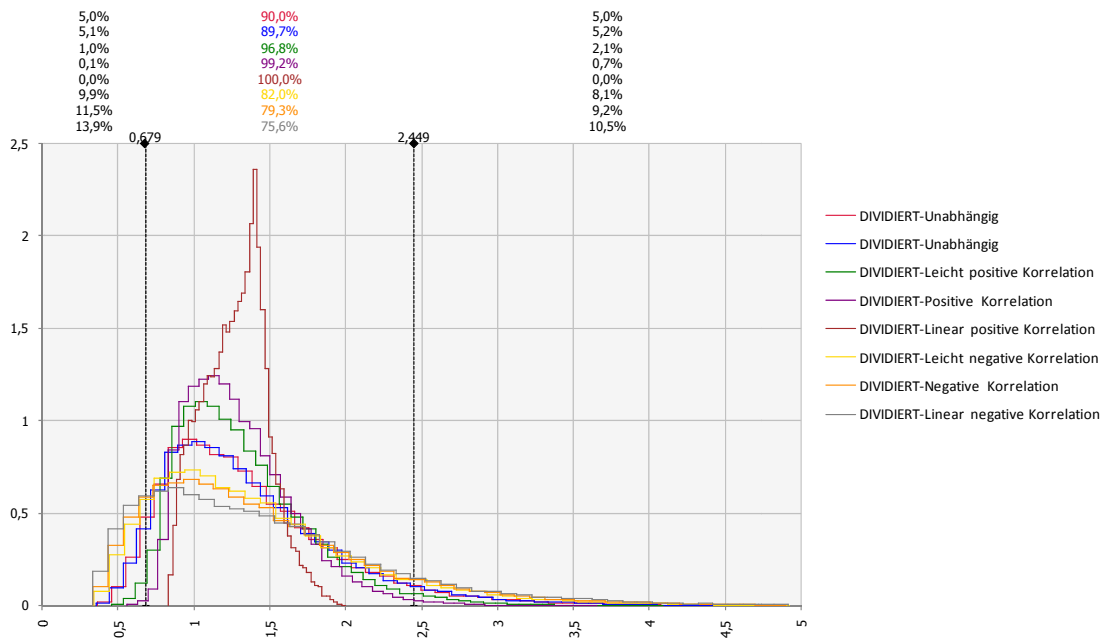


Bild 6–18 Verteilungsfunktion – Division von A und B<sup>153</sup>

### 6.8.5 Gegenüberstellung

Es konnte anhand der oben errechneten Ergebnisse festgestellt werden, dass der Mittelwert der einzelnen Kurven bei Addition und Subtraktion geringer variiert als bei Multiplikation und Division (in Abhängigkeit der unterschiedlichen Korrelationen). Die Art (positiv oder negativ) und Größe ( $-1 \leq r \leq +1$ ) der Korrelationen hat bei allen Rechenarten wesentlichen Einfluss auf die Standardabweichungen und damit auf die Streuungen der Ergebnisse. In Tabelle 6.4 sind diese Einflüsse der Korrelationen auf die Streuung noch einmal zusammengefasst aufgelistet.

Tabelle 6.4 Einfluss von Korrelationen auf die Streuung der Ergebnisse getrennt nach Rechenoperationen

Rechenoperation		Addition		Subtraktion		Multiplikation		Division	
Korrelationen		positiv	negativ	positiv	negativ	positiv	negativ	positiv	negativ
Die Streuung der Ergebnisse wird	größer	X			X	X			X
	kleiner		X	X			X	X	

<sup>153</sup> Die Verteilungsfunktionen wurden mit dem Programm @Risk der Palisade Corporation erstellt.

### 6.8.6 Einfluss von Korrelationen auf die Berechnung

Anhand der Berechnung des Gesamt-Aufwandwertes für Stahlbetonarbeiten soll gezeigt werden, welchen Einfluss die Korrelationen auf eine Simulation mit der Monte-Carlo Methode haben.

Die Berechnung erfolgt nach Glg. (11), für jeden Parameter wird als Verteilungsfunktion ein asymmetrisches Dreieck angenommen. Die minimalen, erwarteten und maximalen Werte jedes Parameters sind in nachstehender Tabelle aufgelistet.

Tabelle 6.5 Übersicht der Eingabewerte zur Berechnung des Gesamt-Aufwandwertes

		MIN		ERW		MAX	
<b>Aufwandwert Schalen</b>	<b>AW<sub>S,MW</sub></b>	0,50	Std/m <sup>2</sup>	0,60	Std/m <sup>2</sup>	0,90	Std/m <sup>2</sup>
<b>Schalungsgrad</b>	<b>s<sub>g,bwk</sub></b>	4,00	m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup>	5,00	m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup>	6,00	m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup>
<b>Aufwandwert Bewehren</b>	<b>AW<sub>BW,MW</sub></b>	8,00	Std/t	8,50	Std/t	10,00	Std/t
<b>Bewehrungsgrad</b>	<b>bw<sub>g,bwk</sub></b>	110,00	kg/m <sup>3</sup>	120,00	kg/m <sup>3</sup>	140,00	kg/m <sup>3</sup>
<b>Aufwandwert Betonieren</b>	<b>AW<sub>BT,MW</sub></b>	0,50	Std/m <sup>3</sup>	0,60	Std/m <sup>3</sup>	0,95	Std/m <sup>3</sup>

Es werden insgesamt 3 Simulationen durchgeführt, wobei die Korrelationen zwischen den Parametern variiert werden. In Simulation 1 sind alle Eingangsgrößen unabhängig voneinander, Simulation 2 beschreibt positive Korrelationen zwischen den angeführten Werten und Simulation 3 verwendet negative Korrelationen (siehe Bild 6–19).

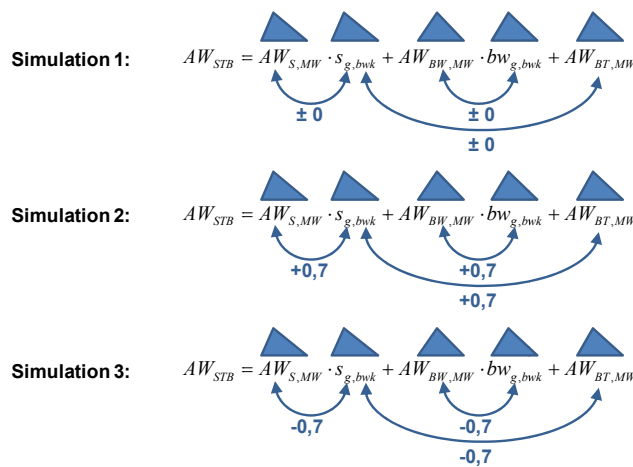


Bild 6–19 Simulationen für den Gesamt-Aufwandwert mit unterschiedlichen Korrelationen [in Anlehnung an Hofstadler<sup>154</sup>]

Aufgrund der Erkenntnisse aus Kap. 6.8.5 müsste bei Simulation 2 die Streuung der Ergebnisse größer und bei Simulation 3 geringer als bei Simulation 1 sein, da nur Additionen und Multiplikationen in den Berechnungen vorkommen.

<sup>154</sup> Vgl. HOFSTADLER, C.: Monte-Carlo Simulation in der Arbeits-/Projektvorbereitung – Anwendung bei der Berechnung der Bauzeit. Präsentation im Zuge des 8. Grazer Baubetriebs- und Bauwirtschaftssymposiums – Arbeitsvorbereitung für Bauprojekte – Nutzen der Arbeitsvorbereitung für den Projekterfolg 26. März 2010. Folie 164

In Bild 6–20 ist eine Übersicht der Ergebnisse, der 3 Simulationen dargestellt (Simulation 1 – Rot; Simulation 2 – Blau und Simulation 3 – Grün). Es zeigt sich, dass die Streuungen der Ergebnisse den Erwartungen entsprechen. Für jede der Simulationen wurden 10.000 Iterationen durchgeführt.

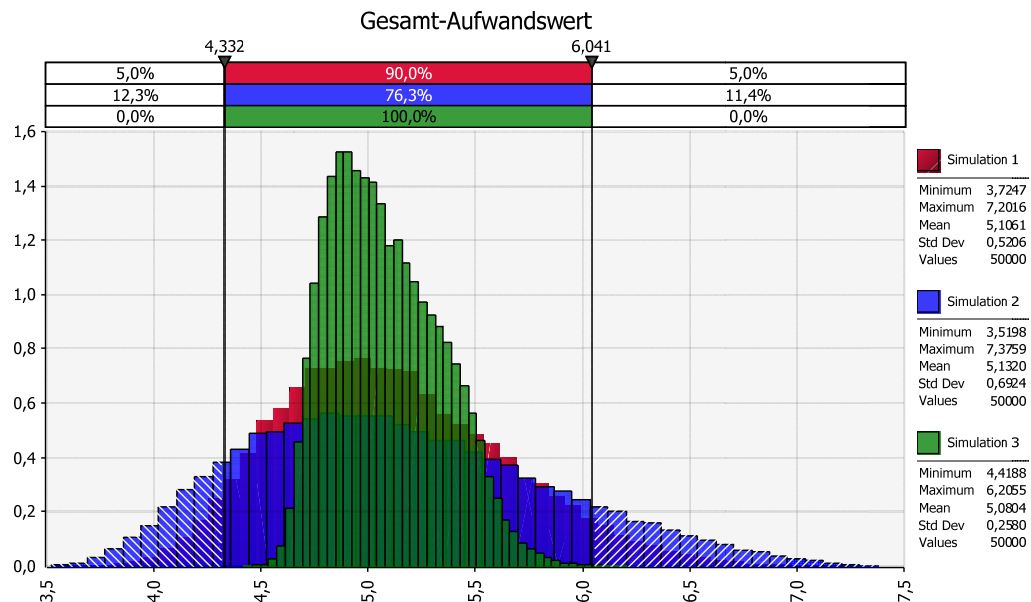


Bild 6–20 Ergebnisse der 3 Simulationen zur Ermittlung des Gesamt-Aufwandswertes<sup>155</sup>

## 6.9 Korrelationen bei Stahlbetonarbeiten

Es konnte bis jetzt gezeigt werden, dass sowohl die Mittelwerte als auch die Varianzen erheblich von der Berücksichtigung der Beziehungen (Korrelationen) zwischen den Eingangsparametern abhängig sind.

Bei der Modellbildung stellt sich aber die Frage, welche Werte überhaupt voneinander abhängig sind. Der Betonpreis je Kubikmeter und der Stahlpreis je Tonne sind beispielsweise Werte, die in keinem Zusammenhang stehen und somit unabhängig voneinander sind (Korrelationskoeffizient = 0). Als technologisch falsch wäre allerdings ein Szenario, bei dem der Bewehrungsgrad ansteigt und gleichzeitig der Aufwandswert für die Bewehrungsarbeiten sinkt. Diese beiden Mengenansätze sind also mit einer positiven Korrelation zu koppeln um so keine unrealistischen Berechnungen in der Simulation zu erzeugen.

Für die Stahlbetonarbeiten sind in der nachstehenden Tabelle mögliche Abhängigkeiten zwischen verschiedenen Eingangsparametern demonstrativ aufgelistet.

<sup>155</sup> Die Verteilungsfunktionen wurden mit dem Programm @Risk der Palisade Corporation erstellt.



**Tabelle 6.6** Mögliche Abhängigkeiten bei Stahlbetonarbeiten (demonstrativ)

Abhängigkeiten						
Erhöhung von	hat Einfluss auf	Auswirkung		mögliche Korrelation		Anmerkungen
		Erhöhung	Verringerung	von	bis	
Betonmenge	Bewehrungsmenge	X	X	-1	1	Abhängig vom statischen Konzept
	Schalungsfläche	X	X	-1	1	Abhängig von der Feingliedrigkeit des Bauwerks
Schalungsgrad	Aufandswert Schalen	X		0	1	Feingliedrigeres Bauwerk (mehr Passflächen)
	Aufandswert Bewehren	X		0	1	Feingliedrigeres Bauwerk (engere Bewehrung)
	Aufandswert Betonieren	X		0	1	Feingliedrigeres Bauwerk
	Gerätekosten Schalung	X		0	1	Höhere Kranbelegung
Bewehrungsgrad	Materialkosten Schalung	X		0	1	Feingliedrigeres Bauwerk - Verschnitt
	Aufandswert Bewehren	X		0	1	Größerer Aufwand um Bewehrung einzufädeln
	Gerätekosten Bewehrung	X		0	1	Höhere Kranbelegung
tägl. Arbeitszeit	Materialkosten Bewehrung	X		0	1	Mehr Abstandhalter
	Aufandswert STB	X		0	1	Ermüdung

Chau gibt an, dass ein Auftreten von Abhängigkeiten wahrscheinlicher ist, je detaillierter die Betrachtung des gesamten Systems (Bauwerks) ist.<sup>156</sup>


Wie groß die Korrelationen zwischen verschiedenen Parametern tatsächlich sind, kann anhand von alten Projekten rekonstruiert werden (siehe *Touran/Wiser*<sup>157</sup> sowie *Chau*<sup>158</sup>). *Chau* ermittelte die Rangkorrelationen für die Elementarkosten von acht Bürogebäuden in Sydney und für Elektroinstallationen von sieben Gebäuden in Hong Kong. Dabei konnte er den Einfluss von Korrelationen auf die Standardabweichung und die Schiefe der Ergebnisse feststellen.<sup>159</sup>

Daten abgeschlossener Projekte liegen aber nicht immer vor oder können nur mit erhöhtem Aufwand und der Durchführung einer strengen Datenanalyse erhalten werden. Für diesen Fall ist es zweckmäßig Korrelationen nach logischen Hierarchien zu kategorisieren.<sup>160</sup>

*Chau* schlägt Kategorien vor, denen verschiedene Korrelationstypen und die dazugehörigen Koeffizienten zugewiesen werden.

**Tabelle 6.7** Kategorien der Korrelationskoeffizienten nach *Chau*<sup>161</sup>

Koeffizient	Kategorie	Koeffizient - Mittelwert
-1,0 bis -0,7	stark negativ	-0,85
-0,7 bis -0,4	mittel negativ	-0,55
-0,4 bis -0,1	schwach negativ	-0,25
-0,1 bis +0,1	unabhängig	0
+0,1 bis +0,4	schwach positiv	+0,25
+0,4 bis +0,7	mittel positiv	+0,55
+0,7 bis +1,0	stark positiv	+0,85



<sup>156</sup> Vgl. CHAU, K. W.: Monte Carlo simulation of construction costs using subjective data. In: Construction Management and Economics 09/1995. S. 370

<sup>157</sup> Vgl. TOURAN, A.; WISER, E. P.: Monte Carlo Technique with Correlated Random Variables. In: Journal of Construction Engineering and Management 05-06/1992. S. 258ff

<sup>158</sup> Vgl. CHAU, K. W.: Monte Carlo simulation of construction costs using subjective data. In: Construction Management and Economics 09/1995. S. 369ff

<sup>159</sup> Vgl. CHAU, K. W.: Monte Carlo simulation of construction costs using subjective data. In: Construction Management and Economics 09/1995. S. 369ff

<sup>160</sup> Vgl. TOURAN, A.; WISER, E. P.: Monte Carlo Technique with Correlated Random Variables. In: Journal of Construction Engineering and Management 05-06/1992. S. 269f

<sup>161</sup> Vgl. CHAU, K. W.: Monte Carlo simulation of construction costs using subjective data. In: Construction Management and Economics 09/1995. S. 381

Laut *Chau* liefert die Verwendung solcher Kategorien ähnliche Ergebnisse wie die Berechnung mit ‚exakteren‘ Korrelationen aus bereits ausgeführten Projekten, wenn die Einschätzungen der bearbeitenden Experten nicht zu weit von der Realität entfernt sind.<sup>162</sup>

*Chapman/Ward* schlagen für Kostenkomponenten eine Korrelation von 0,8 und für die Berechnung von Dauern eine Korrelation von 0,5 vor.<sup>163</sup>

### 6.9.1 Zusammenhang zwischen Schalungsfläche und Betonmenge – Beispiel

Ein Beispiel soll die Zusammenhänge zwischen der Schalungsfläche und der Betonmenge einer Stütze miteinander in Beziehung bringen:

Es seien für ein Projekt quadratische Stützen geplant, die eine Höhe von 3,00 m haben sollen. Die Seitenlängen der Stützen sind aber noch nicht festgelegt, da die Stützenlasten noch nicht definiert sind. Es wird aber davon ausgegangen, dass die minimalste Seitenlänge 20 cm und die maximalste 30 cm aufweisen wird. Erwartet wird eine Seitenlänge von 25 cm.

Für die beschriebenen Stützen kann nun sehr leicht die Betonmenge und die Schalfläche berechnet werden. Die Ergebnisse sind in Bild 6–21 dargestellt.

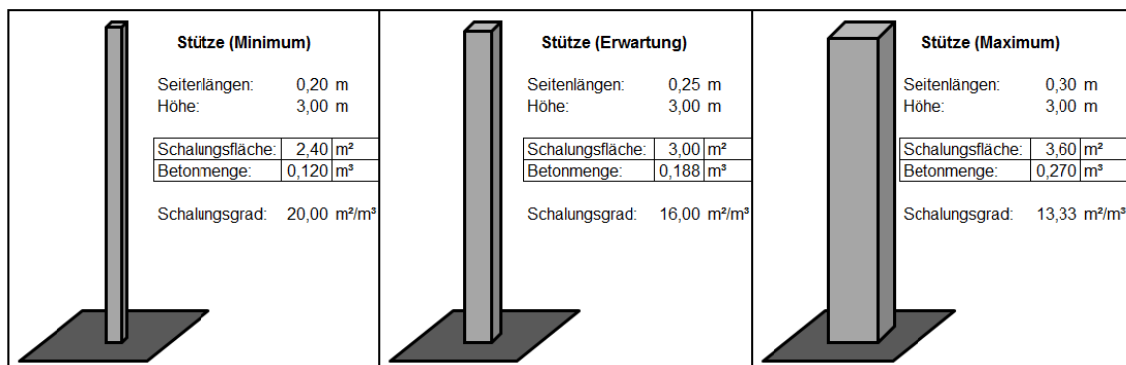


Bild 6–21 Minimale, erwartete und maximale Stützenabmessungen

Wird die Seitenlänge der Stützen als Dreiecksverteilung (0,20; 0,25; 0,30) angenommen, so können daraus die Verteilungsfunktionen für die Schalfläche und Betonmenge mit Hilfe der Monte-Carlo Simulation errechnet werden. Die Ergebnisse dieser Berechnungen sind in nachstehender Abbildung, in Form von interpolierten Verteilungen, dargestellt.

<sup>162</sup> Vgl. CHAU, K. W.: Monte Carlo simulation of construction costs using subjective data. In: Construction Management and Economics 09/1995. S. 381

<sup>163</sup> Vgl. CHAPMAN, C.; WARD, S.: Project Risk Management - Processes, Techniques and Insights. S. 211

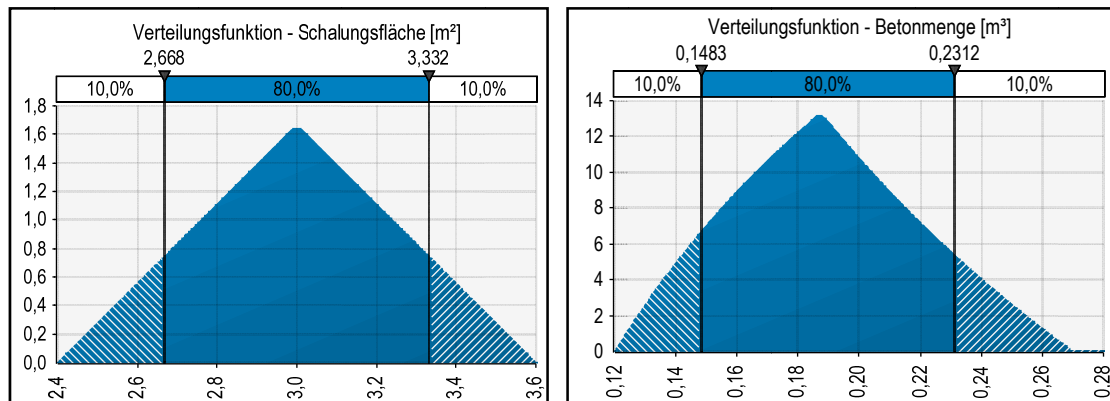


Bild 6–22 Verteilungsfunktionen für Schalungsfläche und Betonmenge – gerechnet<sup>164</sup>

Für die Schalungsfläche kann demnach von einer Dreiecksverteilung mit einem Minimum von 2,4 m<sup>2</sup> einem erwarteten Wert von 3,0 m<sup>2</sup> und einem Maximum von 3,6 m<sup>2</sup> ausgegangen werden. Bei der Betonmenge ergibt sich zwar auch annähernd eine Dreiecksverteilung, die beiden Schenkel des Dreiecks sind allerdings gekrümmt. Dies begründet sich aus der Berechnungsformel für die Betonmenge, in der die Seitenlänge quadriert und dann mit der Höhe multipliziert wird.

Die Korrelation für diese beiden Verteilungen wäre +1 da ein direkter Zusammenhang zwischen den beiden Werten besteht. Dies gilt für geometrische Zusammenhänge allgemein. Wird bei der Schalungsfläche beispielsweise ein Wert von 2,668 m<sup>2</sup> generiert, der eine 10%ige Unterschreitungswahrscheinlichkeit besitzt, so wird bei einer Korrelation von +1 auch bei der Betonkubatur ein Wert mit 10%iger Unterschreitungswahrscheinlichkeit (= 0,1483 m<sup>3</sup>) errechnet.

Doch wie kann die Korrelation angegeben werden, wenn die Schalungsfläche beispielsweise ausgerechnet, die Betonmenge aber als ideale Dreiecksverteilung (gerade Schenkel) mit veränderten Bandbreiten lediglich geschätzt wurde? Solche Verteilungsfunktionen sind in Bild 6–23 dargestellt.

In einem solchen Fall kann nicht mehr von einem direkten linearen Zusammenhang gesprochen werden. Die Korrelation wird somit zwar schon einen positiven Wert annehmen, wo genau dieser aber zwischen 0 und +1 liegen wird ist weitgehend unbekannt.

<sup>164</sup> Die Verteilungsfunktionen wurden mit dem Programm @Risk der Palisade Corporation erstellt.

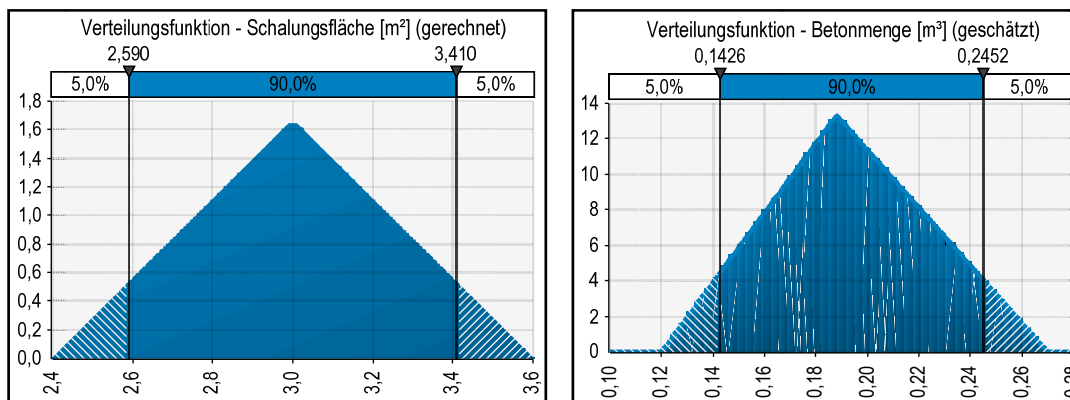


Bild 6–23 Verteilungsfunktionen für Schalungsfläche (gerechnet) und Betonmenge (geschätzt)<sup>165</sup>

### 6.9.2 Erkenntnisse aus dem Beispiel

In dem gezeigten Beispiel werden zwei geometrisch zusammenhängende Größen miteinander verglichen. Werden die Verläufe der Verteilungsfunktionen jeweils berechnet, so ist immer von einer linearen positiven Korrelation auszugehen. Doch werden die Werte nur abgeschätzt, hängt der zugehörige Korrelationskoeffizient erheblich davon ab, mit welcher Genauigkeit die Schätzungen im Vergleich zu den rechnerischen Werten durchgeführt wurden. Noch schwieriger wird die Festlegung von Korrelationen bei Eingangsparametern, die in keinem geometrischen, sondern in einem technologischen bzw. baubetrieblichen Zusammenhang zueinander stehen. Als Beispiel hierfür sei der Zusammenhang zwischen dem Bewehrungsgrad mit dem mittleren Aufwandswert für das Bewehren genannt.

Aus diesem Beispiel ist ersichtlich, dass keine allgemein gültigen Korrelationskoeffizienten festgelegt werden können, da diese immer von der angegebenen Bandbreite der Eingangsparameter abhängig sind. Daher ist es sinnvoll Kategorien, wie sie *Chau* vorschlägt (siehe Tabelle 6.7), zu definieren, die dann bei der Eingabe vom jeweiligen Bearbeiter subjektiv, in Bezug zu seinen festgelegten Bandbreiten, ausgewählt werden können.

## 6.10 Situationsanalyse – Literaturrecherche

Eine Situationsanalyse soll einen Einblick in den derzeitigen Stand der Forschung im Bereich der Monte-Carlo Simulation im Bauwesens geben. Es werden einige Autoren mit ihren Forschungsarbeiten angeführt und somit gezeigt, in welcher Betrachtungstiefe die Methode eingesetzt wird. Außerdem soll gezeigt werden, welche Verteilungsfunktionen für die Simulationen zur Anwendung kommen und mit welcher Anzahl an Iterationen gearbeitet wird.

<sup>165</sup> Die Verteilungsfunktionen wurden mit dem Programm @Risk der Palisade Corporation erstellt.

Um die unterschiedlichen Gliederungen bei verschiedenen Autoren zu vereinheitlichen, werden zuerst die individuell verwendeten Gliederungsebenen angeführt und dann zur jeweilige Ebene nach REFA zusammengefasst.

Laut REFA wird ein Arbeitsablauf in mehrere Ablaufabschnitte unterteilt. Dies ist im Bauwesen sowohl für die Vergabe, Planung, Steuerung und Baudurchführung üblich und wird somit auch schon in frühen Projektphasen durchgeführt. So werden beispielsweise im Zuge der Leistungsbeschreibung Positionen definiert, die die Leistungsart und den Leistungsumfang beschreiben. Diese Gliederung in Positionen entspricht bereits dem Ablaufabschnitt einer Ablaufstufe. Eine Darstellung aller Ablaufabschnitte mit jeweiligen Beispielen für Bewehrungsarbeiten ist in Bild 6–24 dargestellt.

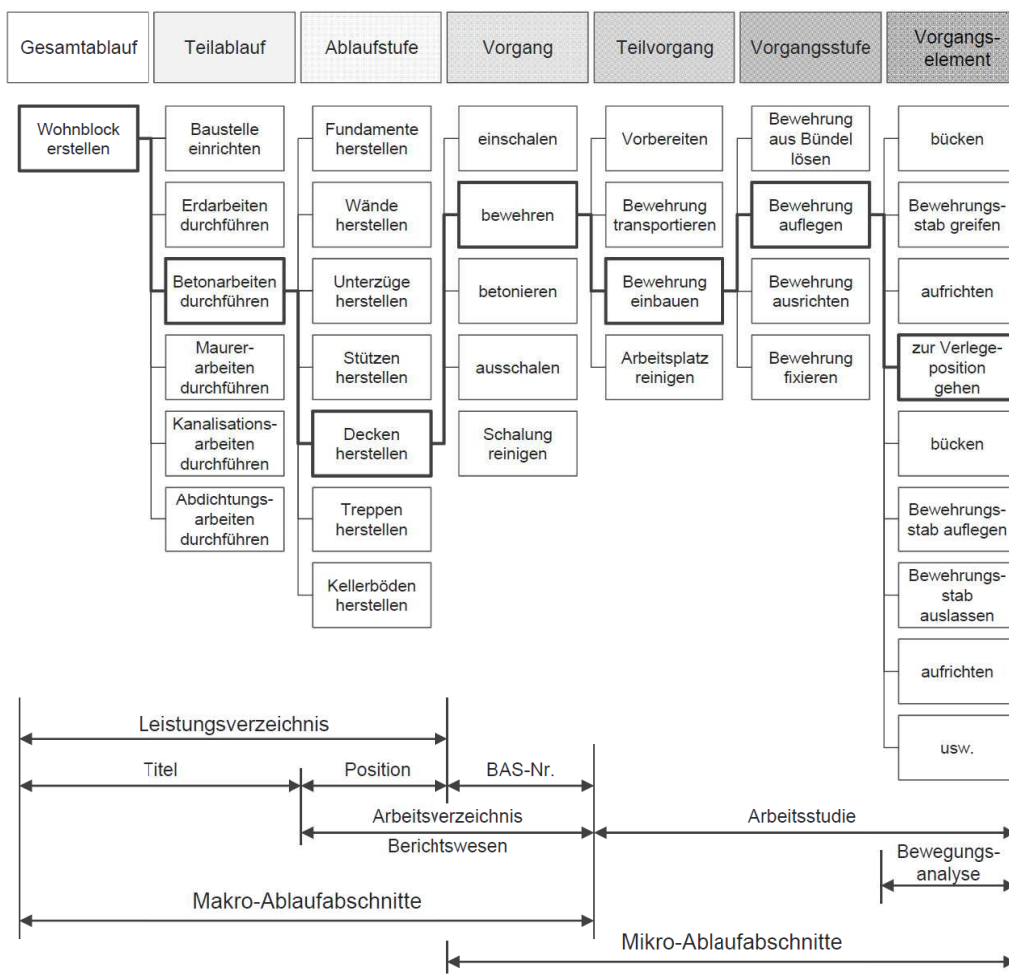


Bild 6–24 Unterteilung eines Bauwerks in Ablaufabschnitte nach REFA [Hofstadler/Franzl<sup>166</sup>]

In der nachstehenden Übersicht werden die Ergebnisse der Situationsanalyse tabellarisch aufgelistet.

<sup>166</sup> HOFSTADLER, C.; FRANZL, G.: Bewehrungsarbeiten im Baubetrieb. S. 133

Situationsanalyse									
Autoren:	Werner	Schach	Hulett	Hofstadler					
Jahr:	2002	2005	2002	2004 - 2011					
Titel:	Datenbankgestützte Risikoanalyse von Bauprojekten - Eine Methode zur integrierten gestützten Monte-Carlo Simulation des Bauablaufes für die Risikoanalyse im Bauunternehmen	Stochastische Investitionskostenberechnung für Verkehrsinfrastrukturprojekte	Project Cost Risk Analysis	Diverse					
Veröffentlicht in:	Dissertation an der Universität Rostock	Fachvortrag - 5. Dresdner Fachtagung Transrapid	<a href="http://www.probletrisk.com">www.probletrisk.com</a>	Diverse					
Branche:	Hochbau	Verkehrswesen (Bahn)	Hochbau	Hochbau					
Projekphase:	Angebotsphase bis Ausführungsphase	Machbarkeitsstudie	Vorhersage der Herstellkosten - Fallbeispiel	von Grundlagenermittlung über Entwurf bis zur Bauausführung					
Baukosten	X	X	X	X					
Bauzeit	X	-	-	X					
Transportanzahl	-	-	-	X					
Aufwandswerte	-	-	-	X					
Leistungsweite	-	-	-	X					
Ermittlung von:									
Gliederung:	Betrachtung auf der Ebene der Leistungspositionen eines LVs	10 bis 20 Kostenarten z.B. Erdbau [m³], Feste Fahrbahn [Dm]	Planung (Design) - Ausstattung (Equipment) - Gründung, Konstruktion (Fundation, Structure) - Installation, Elektrik, Heizung, Lüftung, Klimatisierung (Piping, Elect. HVAC) - Arbeit (Labour) - Gemeinkosten (Indirects)	Stahltonarbeiten gegliedert nach Bauteilgruppen und Vorgängen: - Schalen - Bewehren - Betonieren					
Gliederungsebene nach REFA:	Ablaufstufe	Ablaufstufe	Teillauf	Vorgang					
Software	@Risk	k.A.	Crystal Ball Pro v. 4.0 (Decisionering)	@Risk					
Monte-Carlo	X	X	X	X					
Latin-Hypercube	X	X	X	X					
Anzahl Iterationen	5.000	k.A.	5.000	50.000					
Recheck	X	X	X	X					
gew. Dreieck	X	X	X	X					
gew. Beta	X	X	X	X					
Lognormal		X		X					
Perit				X					
Normalverteilung				X					
Individuell				X					
Quelle:	k.A.	X	X	X					
vergleichbare, alte Projekte	k.A.	X	X	X					
Expertenbefragungen									

Bild 6–25 Situationsanalyse

Die Ergebnisse der Situationsanalyse zeigen, dass sehr differenzierte Bearbeitungsweiten und –tiefen von den Autoren verfolgt werden. Es werden unterschiedlichste Gliederungen vorgenommen (teilweise bedingt durch unterschiedliche Branchen – siehe Schach: Ver-



kehrswegbau), verschiedene Verteilungsfunktionen verwendet und die Anzahl der durchgeführten Iterationen schwankt erheblich (zwischen 5.000 und 50.000).

## 7 @Risk

Die im Zuge dieser Arbeit verwendete Software „@Risk“ stammt von der Firma Palisade. @Risk ist eine Komponente der „Decision Tools Suite“ und dient zur Risikoanalyse. Bei diesem Programm handelt es sich um einen Aufsatz auf MS Excel.

Die Firma Palisade führt an, dass sich ihr Softwareprodukt in den unterschiedlichsten Fachgebieten und Branchen einsetzen lässt und nennt dabei beispielhaft folgende Einsatzgebiete:<sup>167</sup>

- Erdöl-, Erdgas- und Energiesektor
  - ♦ Erdölvorkommensschätzung
  - ♦ Investitionsprojektschätzung
  - ♦ Preisgestaltung
- Arzneimittel, Medizin und Gesundheitsbranche
  - ♦ Neuproduktanalyse
  - ♦ Entwicklungsausgaben
  - ♦ Infektionskrankheitsschätzung
- Umwelt
  - ♦ Schutz gefährdeter Arten
- Luft- und Raumfahrt sowie Transport
  - ♦ Kostenschätzung
  - ♦ Verkehrsstraßenplanung und -optimierung
  - ♦ Lieferkettenverteilung

Weiters wird das Programm im Bereich der Versicherungen, Finanzen und Wertpapiere, Regierung, Verteidigung, in der Qualitätsanalyse sowie bei den unterschiedlichsten Fertigungsprozessen und somit auch im Bauwesen eingesetzt.<sup>168</sup>

### 7.1 Warum @Risk?

In diesem Kapitel werden einige Vor- und Nachteile des Programms @Risk aufgelistet, die im Zuge dieser Bearbeitung durch den Verfasser festgestellt werden konnten. Es handelt sich dabei um eine demonstrative Auflistung, die keinen Anspruch auf Vollständigkeit erhebt.

<sup>167</sup> Vgl. <http://www.palisade.com/>. Datum des Zugriffs: 20.09.2011

<sup>168</sup> Vgl. <http://www.palisade.com/>. Datum des Zugriffs: 20.09.2011



### 7.1.1 Vorteile (demonstrativ)

- @Risk ist ein Aufsatz auf MS Excel (ist beinahe in jedem Unternehmen verfügbar)
- Export von Ergebnissen in Excel möglich
- Eine vorhandene Berechnung in Excel kann mit Hilfe der Decision Tools analysiert werden
- Ähnliche Handhabung wie Excel, geringe Umstellung für Benutzer
- Tabellen können auch an einem Rechner ohne @Risk angesehen und bearbeitet werden (Simulationen sind dann aber nicht möglich)
- Exportierte Diagramme können auch ohne @Risk betrachtet werden
- Korrelationen können eingearbeitet werden
- Variation der Anzahl der Iterationen möglich
- Es können mehrere Simulationen gleichzeitig durchgeführt werden
- Rekonstruktion der Ergebnisse durch Festlegung einer Zahl, die dann für die Ermittlung der Pseudozufallszahlen herangezogen wird (vgl. Tabelle 6.1)
- Monte-Carlo und Latin-Hypercube Probenerhebungsmethode möglich (siehe Kap. 7.3)
- Beliebige Verteilungsfunktionen möglich
- Vorhandene Daten aus alten Projekten können eingebaut werden
- Eine Programmierung mit Visual Basic ist möglich um die Eingangsdaten systematisch in einer Benutzeroberfläche erfassen zu können

### 7.1.2 Nachteile (demonstrativ)

- Keine Freeware
- Für eine ansprechende Eingabeoberfläche sind vertiefende Programmierkenntnisse erforderlich (z.B. Visual Basic)
- Bei einer großen Anzahl an Iterationen kann die Berechnung einige Minuten dauern, bzw. kann es sein, dass die Simulation aus Mangel an Arbeitsspeicher abgebrochen wird

## 7.2 Simulation

Um die Berechnung eines Beispiels mit der Monte-Carlo Methode durchführen zu können, muss eine Simulation in @Risk bzw. MS Excel eingegeben werden. Um dies zu erleichtern, sind alle verwendeten Berechnungsgleichungen und ihre jeweiligen Verknüpfungen in Form eines Übersichtsblattes dargestellt.

Bild 7–1 zeigt die 3 Bereiche, für die die Simulation durchgeführt werden soll (Kosten, Dauer und Transporte). In grün sind alle Gleichungen und Eingabewerte angeführt, die für die Berechnung der Kosten notwendig sind. Die Berechnungsansätze für die Ermittlung der Anzahl der Transporte ist in blau und jene für die Berechnung der Dauer in orange darge-

stellt. Grau hinterlegt sind jene Eingangswerte und Gleichungen, die in mehreren Kategorien für eine Berechnung erforderlich sind.

Die Gleichungsübersicht wurde mit dem Programm „Edraw Mind Map“, eine Freeware der Firma EdrawSoft, erstellt. Eine größere Abbildung des Übersichtsblattes ist im Anhang zu finden.

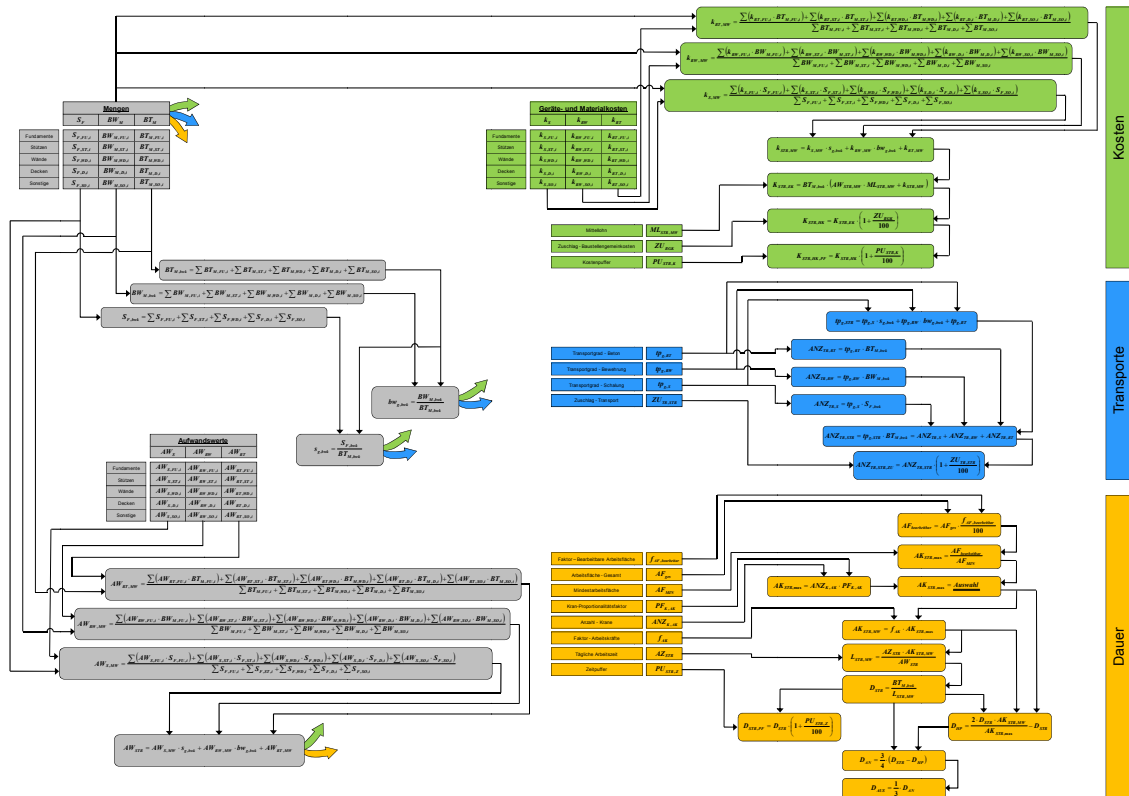


Bild 7-1 Gleichungsübersicht für Kosten, Dauer und Anzahl der Transporte [in Anlehnung an Hofstadler<sup>169170171172</sup>]

<sup>169</sup> Vgl. HOFSTADLER, C.: Bauablaufplanung und Logistik im Baubetrieb. S. 59ff, 108ff

<sup>170</sup> Vgl. HOFSTADLER, C.: Schalarbeiten - Technologische Grundlagen, Sichtbeton, Systemauswahl, Ablaufplanung, Logistik und Kalkulation. S. 303ff, 464f

<sup>171</sup> Vgl. HOFSTADLER, C.; FRANZL, G.: Bewehrungsarbeiten im Baubetrieb. S. 115ff, 153ff, 207ff

<sup>172</sup> Vgl. HOFSTADLER, C.: Beschaffungslogistik für die Phase Bauwerk-Rohbau - Berechnung der Anzahl der Transporte für Stahlbetonarbeiten unter Anwendung der Monte-Carlo-Simulation. In: Festschrift anlässlich des 30-jährigen Bestehens des Instituts für Baubetrieb der Technischen Universität Darmstadt - Baubetriebliche Aufgaben 2009. S. 149ff

### 7.3 Probenerhebung

Die zufällige Auswahl von einzelnen Werten aus den Verteilungsfunktionen der Eingangsparameter, mit denen dann eine Iteration, also ein mögliches Szenario, ausgerechnet wird, nennt man Probenerhebung.<sup>173</sup>

*„Sofern ausreichend viele Iterationen ausgeführt werden, verteilen sich die aus einer Wahrscheinlichkeitsverteilung erhobenen Werteproben allmählich so, dass das Ergebnis ungefähr der bekannten Eingabewahrscheinlichkeitsverteilung entspricht.“<sup>174</sup>*

In @Risk stehen dafür zwei unterschiedliche Probenerhebungsverfahren zur Verfügung:

- Monte-Carlo
- Latin Hypercube

Diese beiden Methoden unterscheiden sich in der Anzahl an erforderlichen Iterationen um eine gute Annäherung an die gewählten Verteilungsfunktionen zu erreichen. Dies ist dann der Fall, wenn eine Simulation so stabile Ergebnisse liefert, dass auch durch weitere Iterationen, keine wesentlichen Änderungen herbeigeführt werden können.<sup>175</sup>

Um die Unterschiede der beiden Methoden zu verdeutlichen, soll eine Dreiecksverteilung (2; 6; 12) einmal mit Monte-Carlo und einmal mit Latin Hypercube angenähert werden. In beiden Fällen werden 1.000 Iterationen durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Bild 7–2 dargestellt.

Es ist bei der Latin Hypercube Methode eine deutlich bessere Annäherung an die vorgegebene Dreiecksverteilung zu erkennen. Um die Funktionsweise der beiden Probenerhebungsverfahren zu erläutern ist ein Grundverständnis der Summenverteilung notwendig.

<sup>173</sup> Vgl. PALISADE CORPORATION: Benutzerhandbuch für @Risk - Risikoanalyse- und Simulations Add-In für Microsoft Excel. S. 705

<sup>174</sup> PALISADE CORPORATION: Benutzerhandbuch für @Risk - Risikoanalyse- und Simulations Add-In für Microsoft Excel. S. 705

<sup>175</sup> Vgl. PALISADE CORPORATION: Benutzerhandbuch für @Risk - Risikoanalyse- und Simulations Add-In für Microsoft Excel. S. 706 u. 711

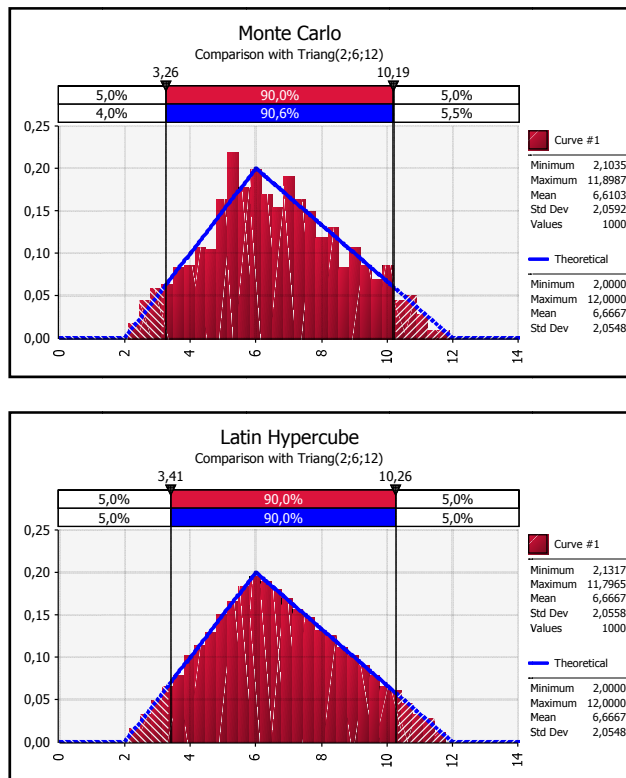


Bild 7–2 Vergleich der Annäherung an eine gewählte Verteilungsfunktion mit Monte-Carlo (oben) und Latin Hypercube (unten)<sup>176</sup>

### 7.3.1 Summenverteilung

Jede Wahrscheinlichkeitsfunktion kann in Form einer Summenverteilung aufgetragen werden. Bei einer Summenverteilung beschreibt die Ordinate die Summenwahrscheinlichkeit und reicht von 0 bis 1 (entspricht einer Wahrscheinlichkeit von 0 % bis 100 %). Auf der Abszisse ist die Bandbreite der möglichen Werte aufgetragen. In dem Bereich, in dem die Summenverteilungskurve einen besonders steilen Verlauf besitzt, befinden sich auch die wahrscheinlichsten Resultate.<sup>177</sup>

In Bild 7–3 sind verschiedene Verteilungsfunktionen mit den jeweiligen Summenverteilungen dargestellt.

<sup>176</sup> Die Verteilungen wurden mit dem Programm @Risk der Palisade Corporation erstellt.

<sup>177</sup> Vgl. PALISADE CORPORATION: Benutzerhandbuch für @Risk - Risikoanalyse- und Simulations Add-In für Microsoft Excel. S. 706f

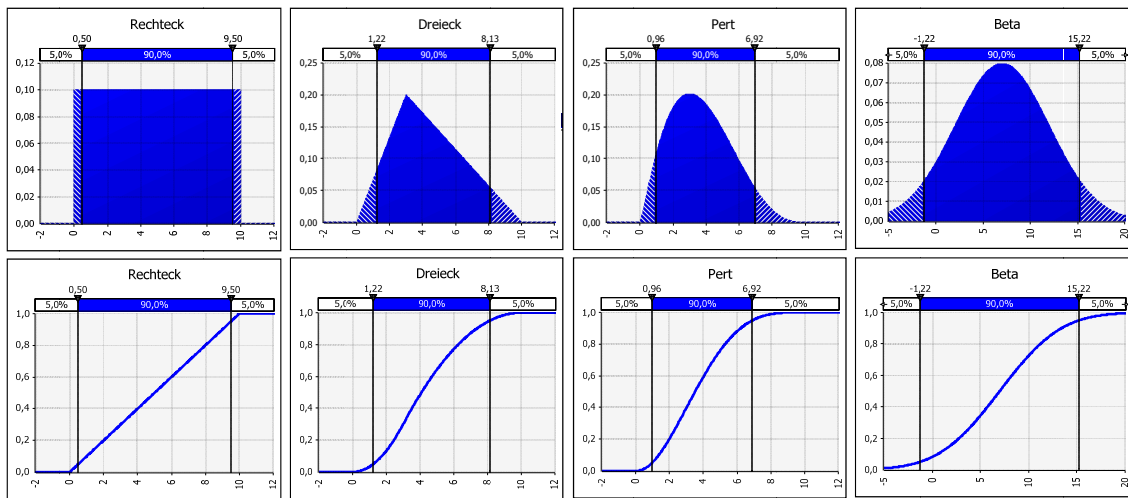


Bild 7–3 Summenverteilungskurven für unterschiedliche Verteilungsfunktionen<sup>178</sup>

Bei der Probenerhebung wird ein zufälliger Wert auf der Ordinate generiert und liefert über den Schnittpunkt mit der Summenverteilungskurve einen entsprechenden Wert auf der Abszisse, der dann für die Berechnung herangezogen wird. In Bild 7–4 ist ein Beispiel einer Probenerhebung für eine Iteration dargestellt.

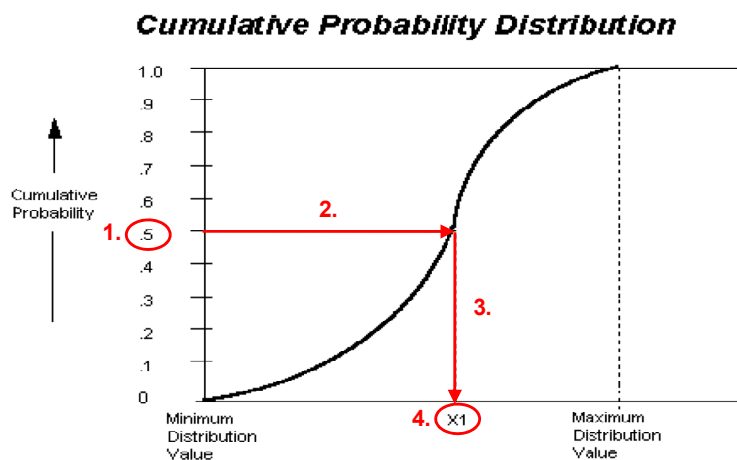


Bild 7–4 Beispiel für eine Probenerhebung (Schritte 1 bis 4)<sup>179</sup>

In einem ersten Schritt wird eine Zufallszahl (in diesem Fall 0,5) generiert und eine horizontale Linie (2.) soweit gezogen, bis sich ein Schnittpunkt mit der Summenverteilungskurve ergibt. Von diesem Schnittpunkt wird eine Vertikale (3.) nach unten eingezeichnet und es kann der Rechenwert (X1) für eine Iteration abgelesen werden.<sup>180</sup>

<sup>178</sup> Die Verteilungen wurden mit dem Programm @Risk der Firma Palisade Corporation erstellt.

<sup>179</sup> PALISADE CORPORATION: Benutzerhandbuch für @Risk - Risikoanalyse- und Simulations Add-In für Microsoft Excel. S. 707

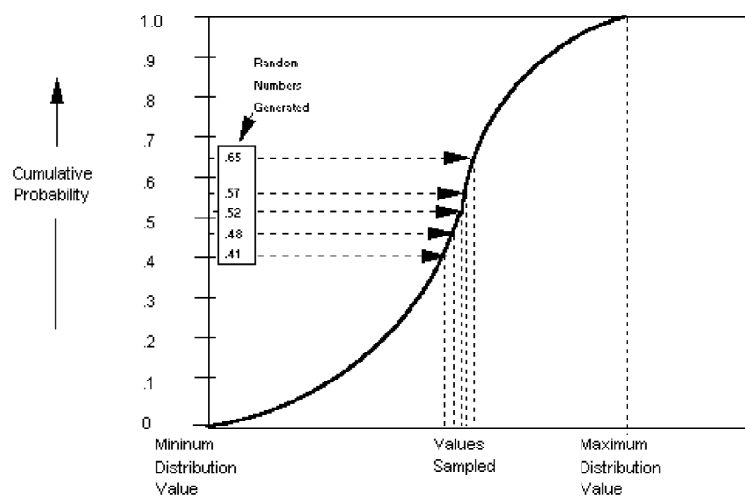
<sup>180</sup> Vgl. PALISADE CORPORATION: Benutzerhandbuch für @Risk - Risikoanalyse- und Simulations Add-In für Microsoft Excel. S. 707

### 7.3.2 Monte-Carlo Probenerhebungsmethode

Bei der Monte-Carlo Probenerhebungsmethode handelt es sich um das ‚traditionelle‘ Verfahren. Es werden vom Computer Zufallszahlen zwischen 0 und 1 generiert. Die Probenerhebung ist somit vollkommen dem Zufall überlassen und es können Werteproben aus jedem Bereich der Verteilung generiert werden. Die Wahrscheinlichkeit, dass aber ein Wert im steilen Bereich der Summenverteilung ausgegeben wird ist entsprechend höher als ein Wert in den Randbereichen. Dies ist insofern problematisch, da bei wenigen Iterationen eine Zusammenballung in gewissen Bereichen (um den wahrscheinlichsten Wert) vorkommen kann und Werte aus den äußeren Verteilungsfunktionen nicht in das Ergebnis einfließen.<sup>181</sup>

Bild 7–5 zeigt eine mögliche Probenerhebung für 5 Iterationen. Alle 5 Werteproben befinden sich in der Mitte der Verteilung und führen so zur erwähnten Ballung.

**Five Iterations of Monte Carlo Sampling With Clustering**



**Bild 7–5 Monte-Carlo Probenerhebungsverfahren**<sup>182</sup>

Dieser Problematik wurde durch die Entwicklung von geschichteten Probenerhebungsmethoden begegnet. Im Programm @Risk ist eine dieser Methoden, nämlich die Latin Hypercube Methode, möglich.<sup>183</sup>

### 7.3.3 Latin Hypercube Probenerhebungsmethode

Latin Hypercube ist ein jüngerer Verfahren zur Probenermittlung als die Monte-Carlo Probenerhebung. Sie bietet die Möglichkeit eine geschichtete Erhebung durchzuführen. Dabei

<sup>181</sup> PALISADE CORPORATION: Benutzerhandbuch für @Risk - Risikoanalyse- und Simulations Add-In für Microsoft Excel. S. 708

<sup>182</sup> PALISADE CORPORATION: Benutzerhandbuch für @Risk - Risikoanalyse- und Simulations Add-In für Microsoft Excel. S. 708

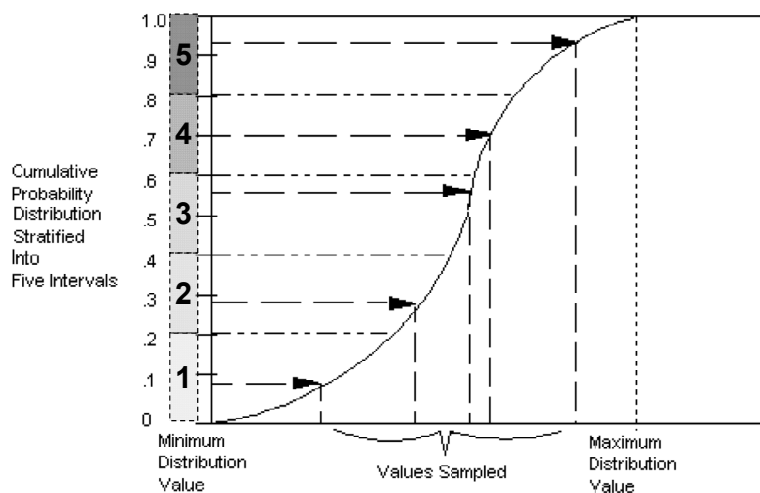
<sup>183</sup> Vgl. PALISADE CORPORATION: Benutzerhandbuch für @Risk - Risikoanalyse- und Simulations Add-In für Microsoft Excel. S. 709

wird, je nach Anzahl an Iterationen, die Ordinate der entsprechenden Summenverteilung in gleich große Bereiche eingeteilt. Bei der Probenermittlung wird nun aus jedem dieser Intervalle ein Wert ermittelt. Dies hat den Vorteil, dass aus jedem Bereich der Verteilungsfunktion Werte generiert werden müssen. Eine Nachbildung der definierten Verteilungsfunktionen ist so auch mit wenigen Iterationen möglich (siehe Bild 7–2).<sup>184</sup>

Dieses Verfahren entspricht damit einem Zufallsexperiment mit dem Prinzip „Ziehen ohne Zurücklegen“. Im Gegensatz dazu stellt die Monte-Carlo Methode ein „Ziehen mit Zurücklegen“ dar.<sup>185</sup>

Bild 7–6 zeigt eine mögliche Probenerhebung für 5 Iterationen mit der Latin Hypercube Methode. Mit den Zahlen 1 bis 5 sind die gleich großen Intervalle der Ordinate gekennzeichnet. In jedem dieser Intervalle wird genau eine Zufallszahl und somit eine Werteprobe ermittelt.

**Five Iterations of Latin Hypercube Sampling**



**Bild 7–6 Latin Hypercube – Probenerhebungsmethode**<sup>186</sup>

Wird bei mehreren Variablen für die Probenerhebung die Latin Hypercube Methode verwendet, so muss sichergestellt werden, dass die ermittelten Werteproben unabhängig voneinander bleiben (wenn keine Korrelationen zwischen den Parametern herrschen).<sup>187</sup>

<sup>184</sup> Vgl. PALISADE CORPORATION: Benutzerhandbuch für @Risk - Risikoanalyse- und Simulations Add-In für Microsoft Excel. S. 709

<sup>185</sup> Vgl. FLEMMING, C.; NETZKER, M.; SCHÖTTLE, A.: Probabilistische Berücksichtigung von Kosten- und Mengenrisiken in der Angebotskalkulation. In: Bautechnik 88 - Heft 2 02/2011. S. 96

<sup>186</sup> PALISADE CORPORATION: Benutzerhandbuch für @Risk - Risikoanalyse- und Simulations Add-In für Microsoft Excel. S. 709

<sup>187</sup> Vgl. PALISADE CORPORATION: Benutzerhandbuch für @Risk - Risikoanalyse- und Simulations Add-In für Microsoft Excel. S. 710

„Diese Unabhängigkeit wird sichergestellt, indem das Intervall, aus dem die Werteprobe für die einzelnen Variablen erhoben werden, willkürlich ausgewählt wird. In einer gegebenen Iteration könnte die Werteprobe für Variable 1 beispielsweise aus Schichtung 4 und die Werteprobe für Variable 2 aus Schichtung 22 genommen werden. Dadurch bleibt der Zufallsfaktor und die Unabhängigkeit erhalten und wird die unerwünschte Korrelation zwischen Variablen vermieden.“<sup>188</sup>

### 7.3.4 Vergleich der Latin Hypercube und Monte-Carlo Probenerhebungsmethode

Um einen Vergleich der beiden Probenerhebungsmethoden (MC und Latin Hypercube) darzustellen, wird mit beiden Methoden eine Berechnung des Gesamt-Aufwandswertes für Stahlbetonarbeiten durchgeführt. Die jeweiligen Histogramme werden in weiterer Folge miteinander verglichen.

Für die Berechnungen werden jeweils nachstehende Werte verwendet:

Tabelle 7.1 Vergleich zwischen Latin Hypercube und Monte-Carlo – Eingangswerte

		MIN		ERW		MAX	
<b>Aufwandswert Schalen</b>	<b>AW<sub>S,MW</sub></b>	0,50	Std/m <sup>2</sup>	0,60	Std/m <sup>2</sup>	0,90	Std/m <sup>2</sup>
<b>Schalungsgrad</b>	<b>S<sub>g,bwk</sub></b>	4,00	m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup>	5,00	m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup>	6,00	m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup>
<b>Aufwandswert Bewehren</b>	<b>AW<sub>BW,MW</sub></b>	8,00	Std/t	8,50	Std/t	10,00	Std/t
<b>Bewehrungsgrad</b>	<b>bw<sub>g,bwk</sub></b>	110,00	kg/m <sup>3</sup>	120,00	kg/m <sup>3</sup>	140,00	kg/m <sup>3</sup>
<b>Aufwandswert Betonieren</b>	<b>AW<sub>BT,MW</sub></b>	0,50	Std/m <sup>3</sup>	0,60	Std/m <sup>3</sup>	0,95	Std/m <sup>3</sup>

Als Verteilungsfunktionen dienen asymmetrische Dreiecksverteilungen. Für die Simulationen wird bei beiden Methoden die gleiche Ausgangszahl für die Initialisierung der Pseudozufallszahlen gewählt (Beispiel für die Generierung von Pseudozufallszahlen, siehe Tabelle 6.1). Damit wird sichergestellt, dass für jede Probenerhebung die selben Zufallszahlen verwendet werden. Die Ausgangszahl lautet dabei ‚1234567890‘.

In Bild 7–7 sind die beiden Histogramme für jeweils 100 Iterationen dargestellt.

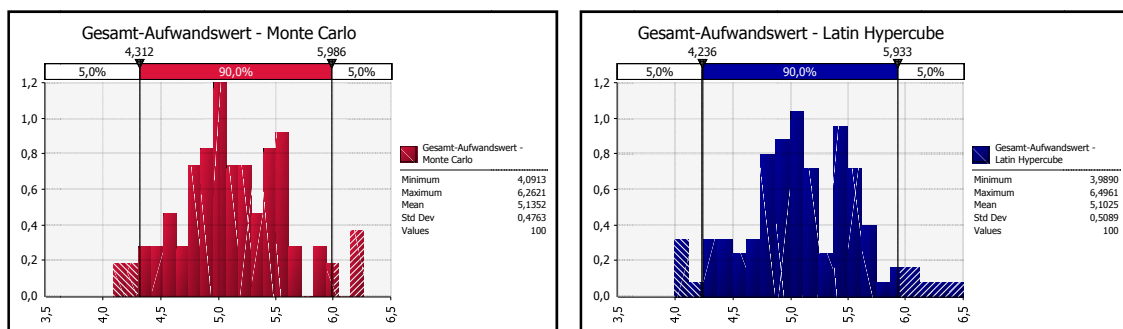


Bild 7–7 100 Iterationen – Links: Monte-Carlo – Rechts: Latin Hypercube<sup>189</sup>

<sup>188</sup> PALISADE CORPORATION: Benutzerhandbuch für @Risk - Risikoanalyse- und Simulations Add-In für Microsoft Excel. S. 710

<sup>189</sup> Die Verteilungen wurden mit dem Programm @Risk der Firma Palisade Corporation erstellt.



Bild 7–8 zeigt die Ergebnisse der Berechnungen für 500 Iterationen.

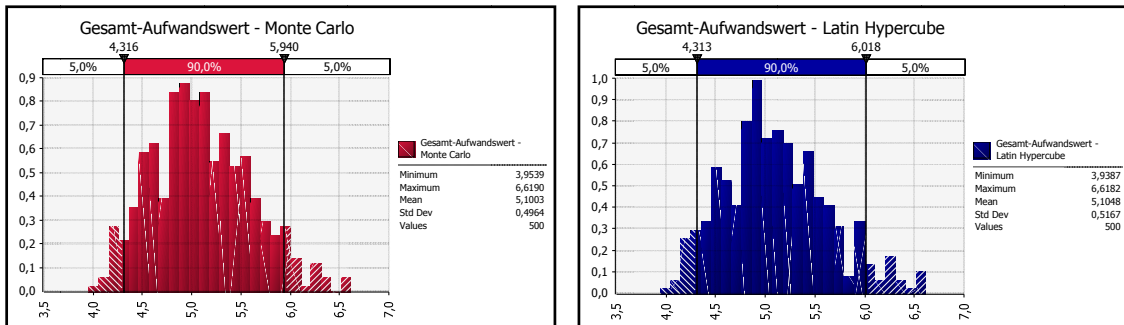


Bild 7–8 500 Iterationen – Links: Monte-Carlo – Rechts: Latin Hypercube<sup>190</sup>

Schließlich werden in Bild 7–9 noch die Histogramme für 1.000 Iterationen angeführt. Bei dieser Anzahl an Iterationen wird bei der Latin Hypercube Methode bereits eine sehr gute Annäherung an die gewählten Verteilungsfunktionen (Dreiecksfunktionen) erzielt (siehe Bild 7–2).

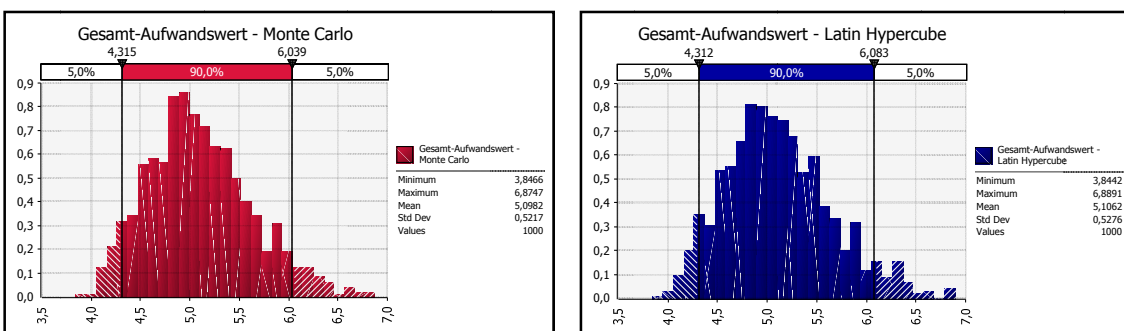


Bild 7–9 1000 Iterationen – Links: Monte-Carlo – Rechts: Latin Hypercube<sup>191</sup>

Es ist zu erkennen, dass auch mit wenigen Iterationen, bei der Latin Hypercube Methode, mehr Ergebnisse in den Randbereichen des Histogramms, also in der Nähe der Extremwerte (Minimum und Maximum) generiert werden. Die Verteilungen mit Latin Hypercube sind daher insgesamt etwas breiter und weisen um den Mittelwert bzw. den Modalwert eine etwas geringer Wahrscheinlichkeit auf. Mit zunehmender Anzahl an Iterationen werden die Unterschiede zwischen den Ergebnissen der beiden Methoden immer geringer. Dies ist damit zu begründen, dass auch bei der Monte-Carlo Methode die Wahrscheinlichkeit, dass Ergebnisse in der Nähe der Extremwerte generiert werden, größer wird.

Allgemein kann festgehalten werden, dass je mehr Iterationen durchgeführt werden, desto homogenere Verteilungskurven stehen für die weiteren Auswertungen zur Verfügung.

<sup>190</sup> Die Verteilungen wurden mit dem Programm @Risk der Firma Palisade Corporation erstellt.

<sup>191</sup> Die Verteilungen wurden mit dem Programm @Risk der Firma Palisade Corporation erstellt.

## 8 Berechnungsbeispiel

Anhand eines Beispiels sollen die derzeit in der Praxis angewendeten Berechnungsverfahren sowie die Monte-Carlo Methode näher betrachtet und deren Ergebnisse miteinander verglichen werden.

Als Referenzprojekt dient das Musiktheater Linz. Der Spatenstich erfolgte im April 2009, die Gleichenerfeier fand im November 2010 statt und die Fassaden- und Ausbauarbeiten sind zum Zeitpunkt, zu dem diese Arbeit verfasst wird, noch im Gange. Die Eröffnung ist für den April 2013 geplant.<sup>192</sup>

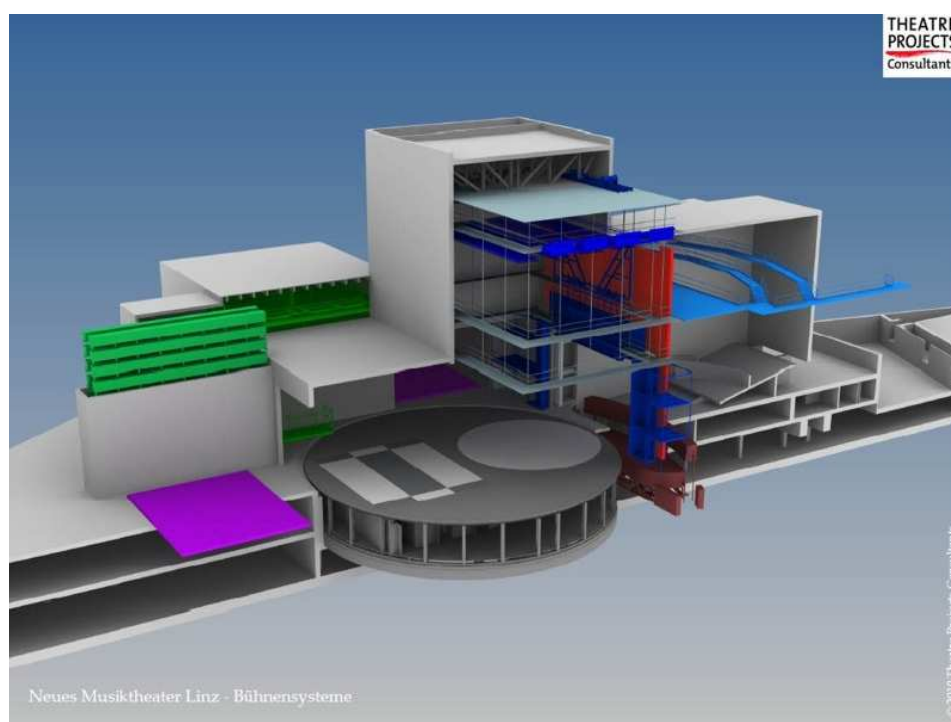


Bild 8–1 Musiktheater Linz<sup>193</sup>

Es handelt sich bei dem Objekt um einen 5-geschoßigen Bau mit 2 Untergeschoßen wobei der Bühnenturm noch 3 weitere Ebenen umfasst. Die Abmessungen des Gebäudes betragen im Norden ca. 150 m, im Osten ca. 25 m, im Westen ca. 65 m und im Süden beträgt die abgewinkelte Länge in etwa 215 m. Das ergibt eine bebaute Fläche von ca. 10.770 m<sup>2</sup>. Die Höhe des Objektes variiert über die Grundrissfläche zwischen 15 und 24 m, wobei der Bühnenturm an seiner Spitze eine Höhe von 37 m erreicht. Die Untergeschoße bieten Raum für ca. 300 Kfz-Stellplätze und beherbergen die gesamten technischen Anlagen. Die

<sup>192</sup> Vgl. [www.musiktheater-linz.at](http://www.musiktheater-linz.at). Datum des Zugriffs: 15.09.2011

<sup>193</sup> [http://www.musiktheater.at/blumau/frameset\\_harand.htm](http://www.musiktheater.at/blumau/frameset_harand.htm). Datum des Zugriffs: 17.10.2011

Bruttogeschoßfläche beträgt etwa 52.000 m<sup>2</sup>, die Nettogeschoßfläche ca. 44.000 m<sup>2</sup> und das Volumen des umbauten Raumes beträgt nahezu 290.000 m<sup>3</sup>.<sup>194</sup>

Die Baumeisterarbeiten Rohbau sowie der konstruktive Stahlbau wurden von der Firma Strabag AG in der Zeit von September 2009 bis Dezember 2010 durchgeführt. Die Firma Strabag AG gibt auf ihrer Homepage ein Auftragsvolumen für die Rohbauarbeiten (inkl. konstruktiver Stahlbau) von 23 Mio. € an.<sup>195</sup>

Für das Berechnungsbeispiel werden die Baukosten, Bauzeit und Anzahl der Transporte, ausschließlich bezogen auf die Stahlbetonarbeiten, betrachtet.

In Tabelle 8.1 ist die Mengenermittlung der Ort betonbauteile getrennt für Schalung, Bewehrung und Beton sowie deren anteilige Prozentsätze dargestellt.

Tabelle 8.1 Mengenermittlung – Musiktheater Linz

Bauteile	Schalungsfläche		Bewehrungsmenge		Betonmenge	
	[m <sup>2</sup> ]	[%]	[t]	[%]	[m <sup>3</sup> ]	[%]
Bodenplatte	1.150	0,90	1.500	30,41	9.600	25,08
Stützen	3.700	2,91	120	2,43	400	1,05
Wände	81.000	63,65	1.500	30,41	15.500	40,50
Decken	30.000	23,58	1.450	29,40	10.400	27,17
Balken, Träger	6.400	5,03	162	3,28	1.380	3,61
Sonstige Platten	1.700	1,34	100	2,03	400	1,05
Treppen	500	0,39	20	0,41	90	0,24
Brüstungen	2.800	2,20	80	1,62	505	1,32
<b>Summe</b>	<b>127.250</b>	<b>100,00</b>	<b>4.932</b>	<b>100,00</b>	<b>38.275</b>	<b>100,00</b>

Diese Mengenangaben sollen als erwartete Werte erachtet werden, denn wie auch *Hofstadler*<sup>196</sup> und *Flemming/Netzker/Schöttle*<sup>197</sup> in ihren Arbeiten feststellen, sind auch die Mengen keine fixen Größen im Verlauf eines Bauprojektes. Mengenerhöhungen und Mengenerhöhungen sind ein Tatbestand, mit dem sich zahlreiche wissenschaftliche Arbeiten im Bereich des Bauvertragswesens beschäftigen und auch die Judikatur wird immer wieder mit Streitigkeiten, denen Mengenänderungen zugrunde liegen, konfrontiert.

In Bild 8–2 ist eine Übersicht der angewendeten Berechnungsmodi dargestellt. Weiters ist der Anstieg des Informationsgehaltes und der Eingabedauer ersichtlich. Die Darstellung über die derzeitige Anwendung der verschiedenen Methoden zeigt, dass die Monte-Carlo Methode dabei eine geringe Rolle spielt.

<sup>194</sup> Vgl. [www.musiktheater-linz.at](http://www.musiktheater-linz.at). Datum des Zugriffs: 15.09.2011

<sup>195</sup> Vgl. [www.strabag.at](http://www.strabag.at). Datum des Zugriffs: 15.09.2011

<sup>196</sup> Vgl. HOFSTADLER, C.: Bauablaufplanung und Logistik im Baubetrieb. S. 53

<sup>197</sup> Vgl. FLEMMING, C.; NETZKER, M.; SCHÖTTLE, A.: Probabilistische Berücksichtigung von Kosten- und Mengenrisiken in der Angebotskalkulation. In: Bautechnik 88 - Heft 2 02/2011. S. 94 ff

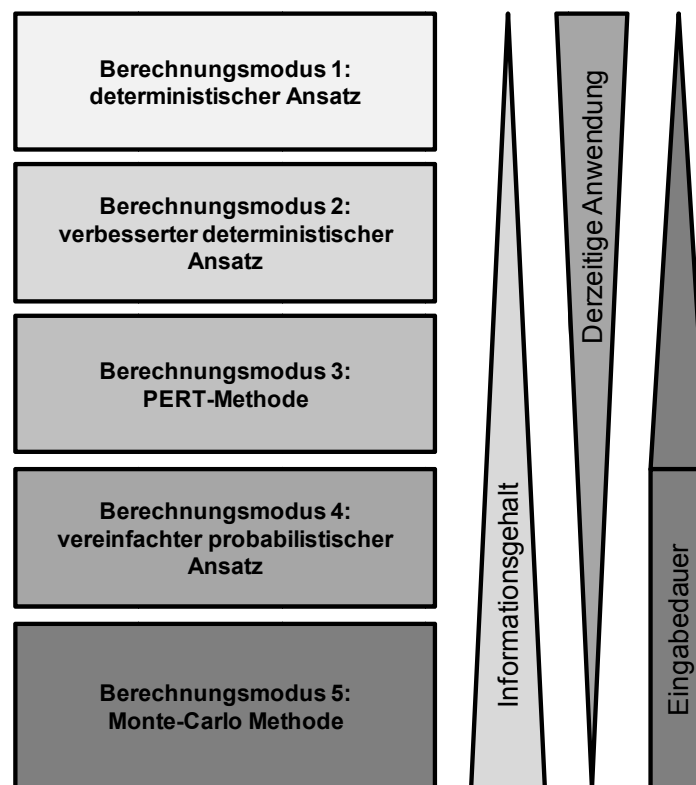


Bild 8–2 Übersicht der durchgeführten Berechnungsmodi 1 bis 5

### 8.1 Berechnungsmodus 1: deterministischer Ansatz

Im Berechnungsmodus 1 wird bei der Berechnung von Baukosten, Bauzeit und Transportanzahl, für die Eingangswerte jeweils ein Wert eingesetzt. Das Ergebnis stellt damit den subjektiv wahrscheinlichsten Fall desjenigen dar, der die Berechnung durchführt. Bei dieser Methode kann weder eine Aussage über die Bandbreite der errechneten Werte noch über die Wahrscheinlichkeit, mit der die Resultate tatsächlich eintreten werden, getroffen werden. Es wird eine Genauigkeit der Ergebnisse vorgetäuscht, die zu groben Fehleinschätzungen führen kann.

Auch *Sander/Spiegl/Schneider* kritisieren die Forderung nach einer exakten Zahl, da dies im direkten Widerspruch zum Wunsch nach einer möglichst genauen Prognose steht<sup>198</sup>. Deterministische Berechnungen bei der Kostenermittlung und der Risikoanalyse sind im Bauwesen weit verbreitet und stellen derzeit den Stand der Technik dar. Diese Betrachtung berücksichtigt jedoch nur ein mögliches Szenario, welches zudem noch höchst unwahrscheinlich ist, da die Einbeziehung von Unschärfen fehlt.<sup>199</sup>

<sup>198</sup> Für die Abgabe eines Angebotes ist es aber sehr wohl notwendig, sich für konkrete Zahlenwerte je Position zu entscheiden. Diesen sollten dann aber eine gesicherte Aussage über deren Eintrittswahrscheinlichkeit zu Grunde liegen.

<sup>199</sup> Vgl. SANDER, P.; SPIEGL, M.; SCHNEIDER, E.: Die exakte Zahl - Gedanken im Umgang mit Unschärfen. In: Die Wirtschaftliche Seite des Bauens - Festschrift zum 60. Geburtstag von Rainer Wanninger. S. 605ff

*„Wir sind es gewohnt mit exakten Zahlen (deterministisch) zu rechnen. Bilanzierungen wie Prognosen in allen Wirtschaftszweigen scheinen nur dann Gehalt zu haben, wenn unter dem Strich eine einzige Zahl steht, deren Information klar und eindeutig ist. [...] Eine weitere, nicht unbedeutende Rolle, spielt der psychologische Aspekt. Eine exakte Zahl erscheint dem Betrachter vertrauenswürdiger als die Angabe einer Bandbreite.“<sup>200</sup>*

Werden probabilistische Methoden eingesetzt, so kann der gesamte Wissensstand in die Prognose einfließen. Es werden dazu Bandbreiten angegeben, die je nach dem Grad der Unschärfe breiter oder feiner sind und mit zunehmender Projektdauer immer enger werden. Das Ergebnis ist dann eine Wahrscheinlichkeitsverteilung für z.B. die Kosten eines Projektes. Anhand dieser Verteilung kann der Bauherr oder Investor festlegen, welches Risikopotenzial er mit seinem Budget decken will. Die Finanzierung für das Projekt wird viel besser planbar und es kann dadurch auch eine Aussage über die Wahrscheinlichkeit getroffen werden, mit der ein bestimmter Kostenwert eintreten wird.<sup>201</sup>

### 8.1.1 Mengen

Für das Beispiel des Berechnungsmodus 1 werden die erwarteten Mengen aus Tabelle 8.1 verwendet. Die Summe der Schalungsflächen ergibt sich dabei zu 127.250 m<sup>2</sup>, die Bewehrungsmenge beträgt 4.932 t und die Betonmenge umfasst in Summe 38.275 m<sup>3</sup> (Ortbeton).

Aus diesen Angaben lassen sich sowohl der Schalungs-  $s_{g,bwk}$  [m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>] als auch der Bewehrungsgrad  $bw_{g,bwk}$  [kg/m<sup>3</sup>] für das gesamte Bauwerk nach Glg. (9) und Glg. (10) berechnen.

$$s_{g,bwk} = \frac{127.250 \text{ m}^2}{38.275 \text{ m}^3} = 3,325 \frac{\text{m}^2}{\text{m}^3}$$

$$bw_{g,bwk} = \frac{1.000 \cdot 4.932 \text{ t}}{38.275 \text{ m}^3} = 128,86 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

### 8.1.2 Aufwandswerte

Die Aufwandswerte für das Schalen, Bewehren und Betonieren wurden für jede Bauteilgruppe getrennt, anhand von Angaben in der Literatur, gewählt und sind in nachstehender Tabelle zusammengefasst.

<sup>200</sup> SANDER, P.; SPIEGL, M.; SCHNEIDER, E.: Die exakte Zahl - Gedanken im Umgang mit Unschärfen. In: Die Wirtschaftliche Seite des Bauens - Festschrift zum 60. Geburtstag von Rainer Wanninger. S. 608f

<sup>201</sup> Vgl. SANDER, P.; SPIEGL, M.; SCHNEIDER, E.: Die exakte Zahl - Gedanken im Umgang mit Unschärfen. In: Die Wirtschaftliche Seite des Bauens - Festschrift zum 60. Geburtstag von Rainer Wanninger. S. 607ff

Tabelle 8.2 Aufwandswerte für das Schalen, Bewehren und Betonieren – Berechnungsmodus 1<sup>202</sup>

Bauteile	AW <sub>S,i</sub>	AW <sub>BW,i</sub>	AW <sub>BT,i</sub>
	[Std/m <sup>2</sup> ]	[Std/t]	[Std/m <sup>3</sup> ]
Bodenplatte	0,90	7,00	0,45
Stützen	0,85	10,50	2,30
Wände	1,40	12,50	0,75
Decken	0,90	9,00	0,50
Balken, Träger	0,90	11,00	0,55
Sonstige Platten	1,15	11,50	0,65
Treppen	3,20	17,00	1,00
Brüstungen	1,50	12,00	0,90

Aus diesen Aufwandswerten und den jeweiligen Mengen je Bauteilgruppe lassen sich in weiterer Folge die mittleren Aufwandswerte für das Schalen, Bewehren und Betonieren nach den Glg. (12), (13) und (14) ermitteln.

Tabelle 8.3 Mittlere Aufwandswerte für das Schalen, Bewehren und Betonieren – Berechnungsmodus 1

Aufwandswert Schalen	AW <sub>S,bwk</sub>	1,242	Std/m <sup>2</sup>
Aufwandswert Bewehren	AW <sub>BW,bwk</sub>	9,690	Std/t
Aufwandswert Betonieren	AW <sub>BT,bwk</sub>	0,617	Std/m <sup>3</sup>

Der Gesamt-Aufwandswert der Stahlbetonarbeiten für das Bauwerk AW<sub>STB,bwk</sub> [Std/m<sup>3</sup>] ergibt sich weiters durch Einsetzen der mittleren Aufwandswerte für das Schalen, Bewehren und Betonieren, zusammen mit dem Schalungs- und Bewehrungsgrad in Glg. (11) zu 5,996 Std/m<sup>3</sup>.

### 8.1.3 Geräte- und Materialkosten

Für die Geräte- und Materialkosten wurden für jede Bauteilgruppe, getrennt nach Schalung, Bewehrung und Beton, Kostensätze aufgrund von Angaben in der Literatur gewählt.

<sup>202</sup> Die Aufwandswerte für das Schalen stammen aus: HOFSTADLER, C.; FRANZL, G.: Bewehrungsarbeiten im Baubetrieb. S. 232

Die Aufwandswerte für das Bewehren stammen aus: HOFSTADLER, C.; FRANZL, G.: Bewehrungsarbeiten im Baubetrieb. S. 233

Die Aufwandswerte für das Betonieren stammen aus: HOFSTADLER, C.; FRANZL, G.: Bewehrungsarbeiten im Baubetrieb. S. 234

Tabelle 8.4 Gerätekosten für Schalung, Bewehrung und Beton – Berechnungsmodus 1<sup>203</sup>

Gerätekosten	Bauteile	$k_{S,i}$	$k_{BW,i}$	$k_{BT,i}$
		[€/m <sup>2</sup> ]	[€/t]	[€/m <sup>3</sup> ]
	Bodenplatte	3,25	14,00	22,00
	Stützen	8,00	11,50	35,00
	Wände	12,00	12,50	24,00
	Decken	14,00	15,00	23,00
	Balken, Träger	6,00	14,50	32,00
	Sonstige Platten	5,00	17,00	26,00
	Treppen	5,50	18,00	34,00
	Brüstungen	6,00	17,00	28,00

Tabelle 8.5 Materialkosten für Schalung, Bewehrung und Beton – Berechnungsmodus 1<sup>204</sup>

Materialkosten	Bauteile	$k_{S,i}$	$k_{BW,i}$	$k_{BT,i}$
		[€/m <sup>2</sup> ]	[€/t]	[€/m <sup>3</sup> ]
	Bodenplatte	0,90	537,00	103,00
	Stützen	1,10	545,00	122,00
	Wände	1,20	532,00	108,00
	Decken	1,00	540,00	113,00
	Balken, Träger	1,60	550,00	113,00
	Sonstige Platten	2,00	540,00	108,00
	Treppen	2,10	540,00	126,00
	Brüstungen	1,40	540,00	108,00

Mit diesen Angaben lassen sich die mittleren Geräte- und Materialkosten getrennt nach Schalung, Bewehrung und Beton durch Gewichtung mit den jeweiligen Mengen errechnen.

Tabelle 8.6 Mittlere Geräte- und Materialkosten für Schalung, Bewehrung und Beton – Berechnungsmodus 1

Geräte- & Materialkosten Schalung	$k_{S,MW}$	12,909	€/m <sup>2</sup>
Geräte- & Materialkosten Bewehrung	$k_{BW,MW}$	551,024	€/t
Geräte- & Materialkosten Beton	$k_{BT,MW}$	132,201	€/m <sup>3</sup>

Die mittleren Geräte- und Materialkosten für einen m<sup>3</sup> Beton  $k_{STB,MW}$  [€/m<sup>3</sup>] errechnen sich aus den mittleren Geräte- und Materialkosten für Schalung, Bewehrung und Beton, unter Einbeziehung des Schalungs- und Bewehrungsgrades zu 246,122 €/m<sup>3</sup>.

<sup>203</sup> Die Gerätekosten für die Schalung wurden in Anlehnung an: HOFSTADLER, C.: Schalarbeiten - Technologische Grundlagen, Sichtbeton, Systemauswahl, Ablaufplanung, Logistik und Kalkulation. S. 314 abgeschätzt

Die Gerätekosten für die Bewehrung stammen aus: HOFSTADLER, C.; FRANZL, G.: Bewehrungsarbeiten im Baubetrieb. S. 237.

Die Gerätekosten für den Beton wurden in Anlehnung an die Preislisten 2011 der Firma Cemex Austria abgeschätzt.

<sup>204</sup> Die Materialkosten für die Schalung wurden in Anlehnung an: HOFSTADLER, C.: Schalarbeiten - Technologische Grundlagen, Sichtbeton, Systemauswahl, Ablaufplanung, Logistik und Kalkulation. S. 330 abgeschätzt.

Die Materialkosten für die Bewehrung stammen aus: HOFSTADLER, C.; FRANZL, G.: Bewehrungsarbeiten im Baubetrieb. S. 238.

Die Materialkosten für den Beton wurden in Anlehnung an die Preislisten 2011 der Firma Cemex Austria unter Berücksichtigung eines 10 %-igen Rabatts abgeschätzt.

### 8.1.4 Einzelkosten/Herstellkosten

Um die Einzelkosten der Stahlbetonarbeiten zu errechnen, ist zusätzlich zu den bereits errechneten Werten, noch die Angabe der Mittellohnkosten erforderlich. Diese können, bei Kenntnis über die Zusammensetzung der Arbeitsgruppe, mit Hilfe des Formblattes K3 lt. ÖNORM B 2061:1999 ermittelt werden. Für dieses Beispiel sollen die erwarteten Mittellohnkosten aber mit 34,00 €/Std angesetzt werden.

Die Berechnung der Einzelkosten für die Stahlbetonarbeiten erfolgt nach Glg. (2) wie folgt:

$$K_{STB,EK} = 38.275 \text{ m}^3 \cdot \left( 5,996 \frac{\text{Std}}{\text{m}^3} \cdot 34,00 \frac{\text{€}}{\text{Std}} + 246,122 \frac{\text{€}}{\text{m}^3} \right) = 17.223.858,50 \text{ €}$$

Die Herstellkosten errechnen sich unter Berücksichtigung eines Zuschlages für die Baustellengemeinkosten, der hier mit 20,00 % angesetzt wird, nach Glg. (4) folgend:

$$K_{STB,HK} = 17.223.858,50 \text{ €} \cdot \left( 1 + \frac{20,00 \%}{100} \right) = 20.668.630,20 \text{ €}$$

Zusätzlich wird ein Kostenpuffer für Unvorhergesehenes, Fehler, Ungenauigkeiten etc. in der Höhe von 10,00 % nach Glg. (5) eingerechnet.

$$K_{STB,HK,PF} = 20.668.630,20 \text{ €} \cdot \left( 1 + \frac{10,00 \%}{100} \right) = 22.735.493,22 \text{ €}$$

Diese Kostenwerte stellen nur ein mögliches Szenario dar und sind somit sehr unrealistisch. Eine verbesserte Aussagekraft der Ergebnisse wird durch die Anwendung der anderen Berechnungsmodi erzielt.

### 8.1.5 Maximale Arbeitskräfteanzahl

Um die maximale Arbeitskräfteanzahl zu berechnen sind mehrere Methoden möglich. Zum Beispiel kann die maximale Arbeitskräfteanzahl über die Anzahl der Krane und den dazu gehörigen Proportionalitätsfaktor nach Glg. (24) ermittelt werden.

Für dieses Beispiel wird die erwartete Krananzahl mit 5 Stk und der erwartete Proportionalitätsfaktor mit 22,0 AK/Kran angenommen. Damit ergibt sich die maximale Arbeitskräfteanzahl bezogen auf die Krane mit 110 AK.

Wird die maximale Arbeitskräfteanzahl durch die Mindestarbeitsfläche je Arbeitskraft ermittelt, so ist zunächst die bearbeitbare Arbeitsfläche zu ermitteln. Für dieses Beispiel sei eine Arbeitsfläche von 10.000 m<sup>2</sup> angenommen. Bearbeitbar sollen davon 60,00 % sein, womit sich eine bearbeitbare Arbeitsfläche von 6.000 m<sup>2</sup> errechnet. Bei einer benötigten Mindestarbeitsfläche je Arbeitskraft von 30,0 m<sup>2</sup>/AK ergibt sich die maximale Arbeitskräfteanzahl mit 200 AK.

Für die weiteren Berechnungen muss nun eine maximale Arbeitskräfteanzahl gewählt werden, wobei der kleinere, der errechneten Werte maßgebend ist. Aufgrund der zur Verfügung stehenden Krane wird von einer maximalen Arbeitskräfteanzahl von 100 AK ausgegangen.



### 8.1.6 Mittlere Arbeitskräfteanzahl

Um von der maximalen auf die mittlere Arbeitskräfteanzahl schließen zu können, ist ein erwartetes Arbeitskräfteverhältnis erforderlich. Dies beschreibt die trapezförmige Verteilung der Anzahl an AK über die gesamte Bauzeit (siehe Bild 4–2).

Für das gegenständliche Beispiel wird das Arbeitskräfteverhältnis mit 0,80 [-] gewählt. Die mittlere Arbeitskräfteanzahl errechnet sich nach Glg. (25) zu 80 AK wie folgt:

$$AK_{STB,MW} = 100 AK \cdot 0,80 = 80 AK$$

### 8.1.7 Stahlbetonleistung

Die Leistung der Stahlbetonarbeiten  $L_{STB,MW}$  [m<sup>3</sup>/d] berechnet sich nach Glg. (21). Die tägliche Arbeitszeit  $AZ_{STB}$  [h/d] wird mit durchschnittlich 9,00 h/d angenommen. Die Leistung errechnet sich somit zu 120,07 m<sup>3</sup>/d.

$$L_{STB,MW} = \frac{80 \frac{Std}{h} \cdot 9,00 \frac{h}{d}}{5,996 \frac{Std}{m^3}} = 120,07 \frac{m^3}{d}$$

### 8.1.8 Dauer der Stahlbetonarbeiten

Für die Berechnung der Dauer der Stahlbetonarbeiten  $D_{STB}$  [d] wird die Gesamtbetonmenge des Bauwerks  $BT_{M,bwk}$  [m<sup>3</sup>] durch den mittleren Leistungswert der Stahlbetonarbeiten  $L_{STB,MW}$  [m<sup>3</sup>/d] dividiert (siehe Glg. (19)).

$$D_{STB} = \frac{38.275 m^3}{120,07 \frac{m^3}{d}} = 318,77 d$$

Die Gesamtdauer für die Stahlbetonarbeiten ergibt sich zu ca. 319 d und kann in weiterer Folge in eine Anlauf-, eine Hauptbau-, und eine Auslaufphase gegliedert werden.

Die Hauptbauphase  $D_{HP}$  [d] errechnet sich nach Glg. (26) wie folgt:

$$D_{HP} = \frac{2 \cdot 318,77 d \cdot 80 AK}{100 AK} - 318,77 d = 191,26 d$$

Die Dauern der Anlaufphase  $D_{AN}$  [d] und der Auslaufphase  $D_{AUS}$  [d] werden nach den Glg. (29) und (28) berechnet.

$$D_{AN} = \frac{3}{4} \cdot (318,77 d - 191,26 d) = 95,63 d$$

$$D_{AUS} = \frac{1}{3} \cdot 95,63 d = 31,88 d$$

Zusätzlich wird für die Gesamtdauer der Stahlbetonarbeiten ein Zeitpuffer in der Höhe von 10,00 %, zur Abfederung von Störungen, nach Glg. (20) eingerechnet. Somit ergibt sich eine Dauer der Stahlbetonarbeiten inkl. Puffer  $D_{STB,PF}$  [d] von etwa 351 d.

$$D_{STB,PF} = 318,77 \text{ d} \cdot \left(1 + \frac{10,00 \%}{100}\right) = 350,65 \text{ d}$$

### 8.1.9 Anzahl der Transporte

Die Ermittlung der Anzahl an Transporten hängt von den Mengen und den jeweiligen Transportgraden für Schalung, Bewehrung und Beton ab. Die für dieses Beispiel gewählten, erwarteten Transportgrade sind in der nachstehenden Tabelle aufgelistet.

Tabelle 8.7 Transportgrade für Schalung, Bewehrung und Beton – Berechnungsmodus 1<sup>205 206</sup>

Transportgrad Schalung	$tp_{g,S}$	0,0011	1/m <sup>2</sup>
Transportgrad Bewehrung	$tp_{g,BW}$	0,0850	1/t
Transportgrad Beton	$tp_{g,BT}$	0,1300	1/m <sup>3</sup>

Damit errechnet sich der mittlere Transportgrad je m<sup>3</sup> Stahlbeton  $tp_{g,STB}$  [1/m<sup>3</sup>] durch Einbeziehung des Schalungs- und Bewehrungsgrades nach Glg. (31) mit 0,1446 1/m<sup>3</sup>.

Die Anzahl der jeweiligen Transporte für Schalung, Bewehrung und Beton sowie die Gesamtanzahl der Transporte sind in Tabelle 8.8 dargestellt.

Tabelle 8.8 Anzahl der Transporte für Schalung, Bewehrung und Beton sowie die Gesamtanzahl der Transporte für die Stahlbetonarbeiten – Berechnungsmodus 1

Anzahl Transporte S	$ANZ_{TR,S}$	139,975	TR
Anzahl Transporte BW	$ANZ_{TR,BW}$	419,22	TR
Anzahl Transporte BT	$ANZ_{TR,BT}$	4.975,75	TR
<b>Anzahl Transporte STB</b>	<b><math>ANZ_{TR,STB}</math></b>	<b>5.534,95</b>	<b>TR</b>

Wird für die Anzahl der Transporte ein Zuschlag in der Höhe von 10,00 % berücksichtigt, so ergibt sich ein Wert von 6.089 Transporten über die gesamte Bauzeit der Stahlbetonarbeiten (exkl. Mannschaftstransporte). Dies entspricht im Durchschnitt etwa 17,5 Transporte pro Tag, die im Logistikkonzept der Baustelle berücksichtigt werden müssen.

<sup>205</sup> Vgl. HOFSTADLER, C.: Schalarbeiten - Technologische Grundlagen, Sichtbeton, Systemauswahl, Ablaufplanung, Logistik und Kalkulation. S. 464

<sup>206</sup> Vgl. HOFSTADLER, C.: Beschaffungslogistik für die Phase Bauwerk-Rohbau - Berechnung der Anzahl der Transporte für Stahlbetonarbeiten unter Anwendung der Monte-Carlo-Simulation. In: Festschrift anlässlich des 30-jährigen Bestehens des Instituts für Baubetrieb der Technischen Universität Darmstadt - Baubetriebliche Aufgaben 2009. S. 151

## 8.2 Berechnungsmodus 2: verbesserter deterministischer Ansatz

Im Berechnungsmodus 2 werden im Grunde die gleichen Berechnungen wie bei Berechnungsmodus 1 durchgeführt. Der Unterschied besteht darin, dass für jeden Eingangsparameter nicht nur ein erwarteter, sondern gleichzeitig noch ein minimaler und ein maximaler Zahlenwert eingesetzt werden. Dies bedeutet, dass alle Berechnungen in dreifacher Weise durchgeführt werden.

Der erhöhte Berechnungsaufwand wird dadurch gerechtfertigt, dass für jedes Ergebnis nicht nur ein (sehr unwahrscheinlicher) Wert, sondern jeweils eine Bandbreite angegeben werden kann. Eine Aussage darüber, mit welcher Wahrscheinlichkeit ein gewisser Wert auftreten wird, ist durch diese Methode aber ebenfalls nicht möglich. Es fließen, durch die Einbeziehung von minimalen, erwarteten und maximalen Werten, viel mehr bekannte Informationen in die Berechnungen ein, als bei Berechnungsmodus 1.

Wird beispielsweise eine begleitende Kostenermittlung im Verlauf der Bauausführung durchgeführt, werden die Bandbreiten für die Eingangswerte zum Projektende hin immer enger und es können immer genauere Aussagen über die zu erwartenden Kosten getroffen werden.

Die minimalen und maximalen Eingangswerte stammen idealerweise aus ähnlichen, bereits abgeschlossenen Projekten mit vergleichbaren Baustellen-, Bauwerks-, Umwelt-, und Umfeldbedingungen oder müssen, wie im gegenständlichen Fall, aus möglichst aktueller Literatur entnommen werden.

Im Zuge der weiteren Berechnungen werden jene Werte, die im Berechnungsmodus 1 eingesetzt wurden, als erwartete Werte gewählt, um so eine bessere Vergleichbarkeit der Ergebnisse erreichen zu können.

### 8.2.1 Mengen

Auch die Mengen stellen keine fixe Größe im Zuge der Projektabwicklung dar, daher werden für die einzelnen Bauteilgruppen getrennt nach Schalung, Bewehrung und Beton (Ortbeton) jeweils Bandbreiten für die Mengen angegeben. Diese sind in den nachstehenden Tabellen angeführt.

Tabelle 8.9 Schalungsflächen – Berechnungsmodus 2

Bauteile	Schalungsflächen					
	MIN		ERW		MAX	
	[m <sup>2</sup> ]	[%]	[m <sup>2</sup> ]	[%]	[m <sup>2</sup> ]	[%]
Bodenplatte	950	0,78	1.150	0,90	1.300	0,99
Stützen	3.500	2,87	3.700	2,91	3.800	2,91
Wände	79.000	64,81	81.000	63,65	82.000	62,72
Decken	28.000	22,97	30.000	23,58	31.000	23,71
Balken, Träger	6.000	4,92	6.400	5,03	7.000	5,35
Sonstige Platten	1.500	1,23	1.700	1,34	2.000	1,53
Treppen	450	0,37	500	0,39	650	0,50
Brüstungen	2.500	2,05	2.800	2,20	3.000	2,29
<b>Summe</b>	<b>121.900</b>	<b>100,00</b>	<b>127.250</b>	<b>100,00</b>	<b>130.750</b>	<b>100,00</b>

Tabelle 8.10 Bewehrungsmengen – Berechnungsmodus 2

Bauteile	Bewehrungsmengen					
	MIN		ERW		MAX	
	[t]	[%]	[t]	[%]	[t]	[%]
Bodenplatte	1.200	29,07	1.500	30,41	1.600	29,81
Stützen	100	2,42	120	2,43	130	2,42
Wände	1.300	31,49	1.500	30,41	1.650	30,74
Decken	1.200	29,07	1.450	29,40	1.600	29,81
Balken, Träger	140	3,39	162	3,28	170	3,17
Sonstige Platten	95	2,30	100	2,03	110	2,05
Treppen	18	0,44	20	0,41	22	0,41
Brüstungen	75	1,82	80	1,62	85	1,58
<b>Summe</b>	<b>4.128</b>	<b>100,00</b>	<b>4.932</b>	<b>100,00</b>	<b>5.367</b>	<b>100,00</b>

Tabelle 8.11 Betonmengen – Berechnungsmodus 2

Bauteile	Betonmengen					
	MIN		ERW		MAX	
	[m³]	[%]	[m³]	[%]	[m³]	[%]
Bodenplatte	9.100	25,16	9.600	25,08	10.000	25,28
Stützen	350	0,97	400	1,05	450	1,14
Wände	15.000	41,48	15.500	40,50	15.800	39,95
Decken	9.800	27,10	10.400	27,17	10.700	27,05
Balken, Träger	1.000	2,77	1.380	3,61	1.500	3,79
Sonstige Platten	350	0,97	400	1,05	430	1,09
Treppen	85	0,24	90	0,24	120	0,30
Brüstungen	480	1,33	505	1,32	550	1,39
<b>Summe</b>	<b>36.165</b>	<b>100,00</b>	<b>38.275</b>	<b>100,00</b>	<b>39.550</b>	<b>100,00</b>

Mit diesen Bandbreiten können in weiterer Folge jeweils drei Werte für den Schalungs- und Bewehrungsgrad errechnet werden. Diese sind in Tabelle 8.12 aufgelistet.

Tabelle 8.12 Bandbreite des Schalungs- und Bewehrungsgrades für das gesamte Bauwerk – Berechnungsmodus 2

		EH	MIN	ERW	MAX
Schalungsgrad	$s_{g,bwk}$	m²/m³	3,371	3,325	3,306
Bewehrungsgrad	$bw_{g,bwk}$	kg/m³	114,144	128,857	135,702

## 8.2.2 Aufwandswerte

Wie für die Mengen, werden auch bei den Aufwandswerten für jede Bauteilgruppe und für jeden Arbeitsschritt (Schalen, Bewehren und Betonieren) jeweils ein minimaler, ein erwarteter und ein maximaler Wert angegeben. Die zusammenfassende Darstellung der Aufwandswerte wird in Tabelle 8.13 bis Tabelle 8.15 gezeigt.

Tabelle 8.13 Aufwandswerte für das Schalen – Berechnungsmodus 2<sup>207</sup>

Bauteile	Aufwandswerte Schalen		
	$AW_{S,i,min}$ [Std/m <sup>2</sup> ]	$AW_{S,i,erw}$ [Std/m <sup>2</sup> ]	$AW_{S,i,max}$ [Std/m <sup>2</sup> ]
Bodenplatte	0,80	0,90	1,10
Stützen	0,60	0,85	1,00
Wände	1,20	1,40	1,50
Decken	0,80	0,90	1,10
Balken, Träger	0,70	0,90	1,00
Sonstige Platten	1,00	1,15	1,30
Treppen	2,50	3,20	3,50
Brüstungen	1,40	1,50	1,70

Tabelle 8.14 Aufwandswerte für das Bewehren – Berechnungsmodus 2<sup>208</sup>

Bauteile	Aufwandswerte Bewehren		
	$AW_{BW,i,min}$ [Std/t]	$AW_{BW,i,erw}$ [Std/t]	$AW_{BW,i,max}$ [Std/t]
Bodenplatte	5,00	7,00	8,50
Stützen	9,00	10,50	12,00
Wände	11,00	12,50	14,00
Decken	7,00	9,00	10,00
Balken, Träger	9,00	11,00	12,00
Sonstige Platten	10,00	11,50	13,00
Treppen	15,00	17,00	20,00
Brüstungen	10,00	12,00	13,00

Tabelle 8.15 Aufwandswerte für das Betonieren – Berechnungsmodus 2<sup>209</sup>

Bauteile	Aufwandswerte Betonieren		
	$AW_{BT,i,min}$ [Std/m <sup>3</sup> ]	$AW_{BT,i,erw}$ [Std/m <sup>3</sup> ]	$AW_{BT,i,max}$ [Std/m <sup>3</sup> ]
Bodenplatte	0,35	0,45	0,50
Stützen	2,00	2,30	2,50
Wände	0,65	0,75	0,85
Decken	0,40	0,50	0,55
Balken, Träger	0,45	0,55	0,65
Sonstige Platten	0,60	0,65	0,75
Treppen	0,85	1,00	1,10
Brüstungen	0,80	0,90	1,00

Aus den Einzel-Aufwandswerten und den zugehörigen Mengen lassen sich die mittleren Aufwandswerte für das Schalen, Bewehren und Betonieren in der jeweiligen Bandbreite errechnen. Weiters kann damit, unter Einbeziehung des Schalungs- und Bewehrungsgrades, der Gesamt-Aufwandswert für die Stahlbetonarbeiten in seiner Bandbreite berechnet werden. Die Ergebnisse sind in Tabelle 8.16 aufgelistet.

<sup>207</sup> Die Aufwandswerte für das Schalen stammen aus: HOFSTADLER, C.; FRANZL, G.: Bewehrungsarbeiten im Baubetrieb. S. 232

<sup>208</sup> Die Aufwandswerte für das Bewehren stammen aus: HOFSTADLER, C.; FRANZL, G.: Bewehrungsarbeiten im Baubetrieb. S. 233

<sup>209</sup> Die Aufwandswerte für das Betonieren stammen aus: HOFSTADLER, C.; FRANZL, G.: Bewehrungsarbeiten im Baubetrieb. S. 234

Tabelle 8.16 Mittlere Aufwandswerte für Schalen, Bewehren und Betonieren sowie der Gesamtaufwandswert für Stahlbetonarbeiten – Berechnungsmodus 2

		EH	MIN	ERW	MAX
Aufwandswert Schalen	$AW_{S,bwk}$	Std/m <sup>2</sup>	1,070	1,242	1,371
Aufwandswert Bewehren	$AW_{BW,bwk}$	Std/t	7,953	9,690	11,044
Aufwandswert Betonieren	$AW_{BT,bwk}$	Std/m <sup>3</sup>	0,516	0,617	0,693
<b>Aufwandswert STB</b>	<b><math>AW_{STB,bwk}</math></b>	<b>Std/m<sup>3</sup></b>	<b>5,029</b>	<b>5,996</b>	<b>6,726</b>

### 8.2.3 Geräte- und Materialkosten

Die Angabe der Geräte- und Materialkosten erfolgt idealerweise anhand von Daten bereits ausgeführter Projekte. Sind solche Daten nicht verfügbar, müssen Werte aus der Literatur entnommen und an die gegebenen Bedingungen angepasst werden. Die Bandbreiten der Geräte- und Materialkosten für dieses Beispiel sind in den nachstehenden Tabellen getrennt für Schalung, Bewehrung und Beton aufgelistet.

Tabelle 8.17 Gerätekosten Schalung – Berechnungsmodus 2<sup>210</sup>

Bauteile	Gerätekosten Schalung		
	$k_{S,i,min}$ [€/m <sup>2</sup> ]	$k_{S,i,erw}$ [€/m <sup>2</sup> ]	$k_{S,i,max}$ [€/m <sup>2</sup> ]
Bodenplatte	2,75	3,25	3,50
Stützen	7,50	8,00	8,50
Wände	11,75	12,00	12,75
Decken	13,50	14,00	14,50
Balken, Träger	5,75	6,00	6,75
Sonstige Platten	4,50	5,00	5,75
Treppen	4,75	5,50	5,75
Brüstungen	5,50	6,00	6,25

Tabelle 8.18 Gerätekosten Bewehrung – Berechnungsmodus 2<sup>211</sup>

Bauteile	Gerätekosten Bewehrung		
	$k_{BW,i,min}$ [€/t]	$k_{BW,i,erw}$ [€/t]	$k_{BW,i,max}$ [€/t]
Bodenplatte	11,00	14,00	14,50
Stützen	10,00	11,50	13,00
Wände	11,00	12,50	13,00
Decken	13,00	15,00	15,50
Balken, Träger	13,00	14,50	16,00
Sonstige Platten	16,00	17,00	19,00
Treppen	16,00	18,00	19,00
Brüstungen	16,00	17,00	19,00

<sup>210</sup> Die Gerätekosten für die Schalung wurden in Anlehnung an: HOFSTADLER, C.: Schalarbeiten - Technologische Grundlagen, Sichtbeton, Systemauswahl, Ablaufplanung, Logistik und Kalkulation. S. 314 abgeschätzt.

<sup>211</sup> Die Gerätekosten für die Bewehrung wurden in Anlehnung an: HOFSTADLER, C.; FRANZL, G.: Bewehrungsarbeiten im Baubetrieb. S. 237 abgeschätzt.

Tabelle 8.19 Gerätekosten Beton – Berechnungsmodus 2<sup>212</sup>

Bauteile	Gerätekosten Beton		
	$k_{BT,i,min}$ [€/m <sup>3</sup> ]	$k_{BT,i,erw}$ [€/m <sup>3</sup> ]	$k_{BT,i,max}$ [€/m <sup>3</sup> ]
Bodenplatte	20,00	22,00	25,00
Stützen	33,00	35,00	38,00
Wände	20,00	24,00	26,00
Decken	20,00	23,00	27,00
Balken, Träger	30,00	32,00	34,00
Sonstige Platten	23,00	26,00	28,00
Treppen	32,00	34,00	37,00
Brüstungen	26,00	28,00	30,00

Tabelle 8.20 Materialkosten Schalung – Berechnungsmodus 2<sup>213</sup>

Bauteile	Materialkosten Schalung		
	$k_{S,i,min}$ [€/m <sup>2</sup> ]	$k_{S,i,erw}$ [€/m <sup>2</sup> ]	$k_{S,i,max}$ [€/m <sup>2</sup> ]
Bodenplatte	0,80	0,90	1,00
Stützen	0,90	1,10	1,30
Wände	1,00	1,20	1,40
Decken	0,90	1,00	1,20
Balken, Träger	1,20	1,60	2,00
Sonstige Platten	1,30	2,00	2,20
Treppen	1,40	2,10	2,60
Brüstungen	1,30	1,40	1,80

Tabelle 8.21 Materialkosten Bewehrung – Berechnungsmodus 2<sup>214</sup>

Bauteile	Materialkosten Bewehrung		
	$k_{BW,i,min}$ [€/t]	$k_{BW,i,erw}$ [€/t]	$k_{BW,i,max}$ [€/t]
Bodenplatte	535,00	537,00	540,00
Stützen	530,00	545,00	555,00
Wände	530,00	532,00	535,00
Decken	530,00	540,00	545,00
Balken, Träger	530,00	550,00	555,00
Sonstige Platten	530,00	540,00	545,00
Treppen	530,00	540,00	545,00
Brüstungen	530,00	540,00	545,00

<sup>212</sup> Die Gerätekosten für den Beton wurden in Anlehnung an die Preislisten 2011 der Firma Cemex Austria abgeschätzt.

<sup>213</sup> Die Materialkosten für die Schalung wurden in Anlehnung an: HOFSTADLER, C.: Schararbeiten - Technologische Grundlagen, Sichtbeton, Systemauswahl, Ablaufplanung, Logistik und Kalkulation. S. 330 abgeschätzt.

<sup>214</sup> Die Materialkosten für die Bewehrung wurden in Anlehnung an: HOFSTADLER, C.; FRANZL, G.: Bewehrungsarbeiten im Baubetrieb. S. 238 abgeschätzt.

Tabelle 8.22 Materialkosten Beton – Berechnungsmodus 2<sup>215</sup>

Bauteile	Materialkosten Beton		
	$k_{BT,i,min}$ [€/m <sup>3</sup> ]	$k_{BT,i,erw}$ [€/m <sup>3</sup> ]	$k_{BT,i,max}$ [€/m <sup>3</sup> ]
Bodenplatte	99,00	103,00	117,00
Stützen	115,00	122,00	135,00
Wände	90,00	108,00	117,00
Decken	90,00	113,00	122,00
Balken, Träger	99,00	113,00	126,00
Sonstige Platten	104,00	108,00	126,00
Treppen	99,00	126,00	135,00
Brüstungen	99,00	108,00	117,00

Werden die Geräte- und Materialkosten gewichtet nach den Mengen aufaddiert und durch die jeweiligen Gesamtmengen dividiert, so erhält man die mittleren Geräte- und Materialkosten getrennt nach Schalung, Bewehrung und Beton. Durch die Zusammenfassung dieser Werte, unter Einbeziehung der Schalungs- und Bewehrungsgrade, ergibt sich die Bandbreite der Geräte- und Materialkosten für die gesamten Stahlbetonarbeiten. Die Ergebnisse dieser Berechnungen sind in Tabelle 8.23 angeführt.

Tabelle 8.23 Mittlere Geräte- und Materialkosten für Schalung, Bewehrung und Beton sowie für die gesamten Stahlbetonarbeiten – Berechnungsmodus 2

		EH	MIN	ERW	MAX
Geräte- & Materialkosten Schalung	$k_{S,MW}$	€/m <sup>2</sup>	12,415	12,909	13,742
Geräte- & Materialkosten Bewehrung	$k_{BW,MW}$	€/t	543,306	551,024	555,524
Geräte- & Materialkosten Beton	$k_{BT,MW}$	€/m <sup>3</sup>	113,571	132,201	145,620
<b>Geräte- &amp; Materialkosten Stahlbeton</b>	<b><math>k_{STB,MW}</math></b>	<b>€/m<sup>3</sup></b>	<b>217,432</b>	<b>246,122</b>	<b>266,437</b>

## 8.2.4 Einzelkosten/Herstellkosten

Die für die weitere Ermittlung der Einzel- bzw. Herstellkosten erforderlichen Eingangswerte sind in der nachstehenden Tabelle 8.24 angeführt.

Tabelle 8.24 Mittellohnkosten, Zuschlag für Baustellengemeinkosten und Kostenpuffer – Berechnungsmodus 2

	MIN	ERW	MAX
Mittellohnkosten $ML_{STB,MW}$ [€/Std]	33,00	34,00	36,00
Zuschlag BGK $ZU_{BGK}$ [%]	15,00	20,00	25,00
Kostenpuffer $PU_{STB,K}$ [%]	5,00	10,00	15,00

<sup>215</sup> Die Materialkosten für den Beton wurden in Anlehnung an die Preislisten 2011 der Firma Cemex Austria unter Berücksichtigung eines 10 %-igen Rabatts abgeschätzt.



Durch die, bereits bei Berechnungsmodus 1 angewandten Gleichungen, werden aus den bekannten Werten die Einzel- und Herstellkosten für die Stahlbetonarbeiten sowie die Herstellkosten inkl. Kostenpuffer ermittelt und in Tabelle 8.25 aufgelistet.

Tabelle 8.25 Einzel- und Herstellkosten der Stahlbetonarbeiten – Berechnungsmodus 2

		EH	MIN	ERW	MAX
Stahlbeton Einzelkosten	$K_{STB,EK}$	€	13.865.689,25	17.223.858,50	20.113.557,50
Stahlbeton Herstellkosten	$K_{STB,HK}$	€	15.945.542,64	20.668.630,20	25.141.946,88
<b>Stahlbeton Herstellkosten inkl. Puffer</b>	<b><math>K_{STB,HK,PF}</math></b>	<b>€</b>	<b>16.742.819,77</b>	<b>22.735.493,22</b>	<b>28.913.238,91</b>

Der erwartete Wert entspricht genau jenem, aus dem Berechnungsmodus 1, da genau die gleichen Eingangswerte eingesetzt wurden. Nun kann aber angegeben werden, wie hoch jeweils die minimalen und die maximalen Kosten (nach dem derzeitigen Informationsstand) sind. Diese Extremwerte werden aber in der Realität nicht (bzw. nur mit sehr geringer Wahrscheinlichkeit) eintreten, da es sich in diesen Fällen um Berechnungen mit allen pessimistischen bzw. allen optimistischen Eingangswerten handelt. Über die Wahrscheinlichkeit, mit der der erwartete Wert eintreten wird, kann mit dem Berechnungsmodus 2 keinerlei Aussage getroffen werden. Die angegebene Bandbreite für die Herstellkosten inkl. Puffer  $K_{STB,HK,PF}$  [€] weist zwischen dem Minimum und dem Maximum eine Differenz von ca. 12.200.000 € auf. Dies entspricht einer Kostendifferenz von etwa 73 % bezogen auf den minimalen Wert. Die Differenz vom erwarteten Kostenwert zum Minimalwert beträgt 26,4 % und zum Maximalwert 27,2 %. Damit liegen bei diesem Berechnungsmodus die erwarteten Herstellkosten inkl. Puffer in einer Bandbreite von weniger als  $\pm 30$  % und würden demnach der Stufe einer Kostenschätzung (in der Phase des Vorentwurfs) nach deutscher Judikatur entsprechen (vgl. Bild 3–2). In Bild 8–3 sind die prozentualen Abweichungen vom erwarteten Wert grafisch dargestellt. Ziel der anderen Berechnungsmodi ist es eine Verbesserung in der Aussagekraft der Ergebnisse zu erreichen.

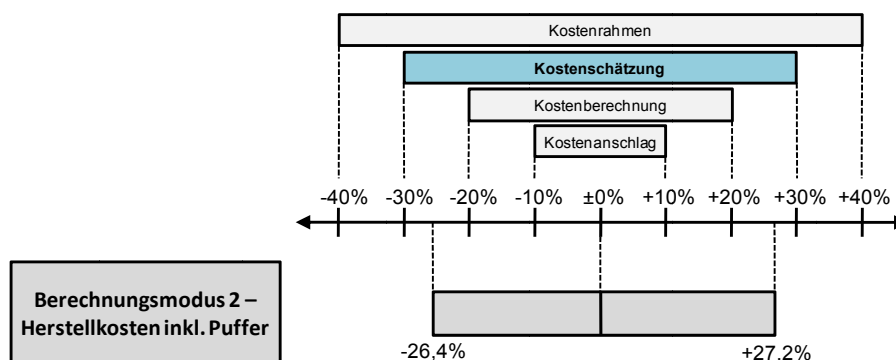


Bild 8–3 Prozentuale Bandbreite der Herstellkosten für die Stahlbetonarbeiten inkl. Kostenpuffer – Berechnungsmodus 2

### 8.2.5 Maximale Arbeitskräfteanzahl

Die Eingangswerte, um die maximale Anzahl an Arbeitskräften über die Krananzahl berechnen zu können, sind in Tabelle 8.26 in Form von minimalen, erwarteten und maximalen Werten ersichtlich.

**Tabelle 8.26 Eingangswerte zur Berechnung der maximalen Arbeitskräfteanzahl auf Basis der Krananzahl – Berechnungsmodus 2**

	MIN	ERW	MAX
Anzahl Krane ANZ <sub>K,AK</sub> [Kran]	4,00	5,00	6,00
Proportionalitätsfaktor PF <sub>K,AK</sub> [AK/Kran]	18,00	22,00	25,00

Die Bandbreiten für die maximale Arbeitskräfteanzahl, bezogen auf die Krananzahl und den dazugehörigen Proportionalitätsfaktor, ist in Tabelle 8.27 angeführt.

**Tabelle 8.27 Maximale Arbeitskräfteanzahl auf Basis der Krananzahl – Berechnungsmodus 2**

	EH	MIN	ERW	MAX	
Max. Arbeitskräfteanzahl - Krane	AK <sub>STB,max</sub>	AK	72,0	110,0	150,0

Die Eingangswerte, um die maximale Anzahl an Arbeitskräften über die Mindestarbeitsfläche berechnen zu können, sind in Tabelle 8.28 in Form von minimalen, erwarteten und maximalen Werten ersichtlich.

**Tabelle 8.28 Eingangswerte zur Berechnung der maximalen Arbeitskräfteanzahl auf Basis der Mindestarbeitsfläche – Berechnungsmodus 2**

	MIN	ERW	MAX
Arbeitsfläche Gesamt AF <sub>ges</sub> [m <sup>2</sup> ]	9.500,00	10.000,00	10.500,00
Faktor bearbeitbare AF f <sub>AF,bearbeitbar</sub> [%]	50,00	60,00	70,00
Mindestarbeitsfläche AF <sub>MIN</sub> [m <sup>2</sup> /AK]	25,00	30,00	35,00

Die Bandbreiten für die maximale Arbeitskräfteanzahl, bezogen auf die Mindestarbeitsfläche je Arbeitskraft, ist in Tabelle 8.29 angeführt.

**Tabelle 8.29 Maximale Arbeitskräfteanzahl auf Basis der Mindestarbeitsfläche – Berechnungsmodus 2**

	EH	MIN	ERW	MAX	
Bearbeitbare Arbeitsfläche	AF <sub>bearbeitbar</sub>	m <sup>2</sup>	4.750,00	6.000,00	7.350,00
Max. Arbeitskräfteanzahl - Arbeitsfläche	AK <sub>STB,max</sub>	AK	190,0	200,0	210,0

Für die weiteren Berechnungen wird nun auf Basis der errechneten Bandbreiten, der maximalen Arbeitskräfteanzahl, eine neue Bandbreite ausgewählt. Die kleineren, der errechneten

neten Werte (hier jene, die auf Basis der Krananzahl berechnet wurden) sind dabei maßgebend.

Um in weiterer Folge die minimale, erwartete und maximale Bauzeit für die Stahlbetonarbeiten zu errechnen, ist es notwendig eine optimistische, eine erwartete und eine pessimistische Angabe über die maximale Arbeitskräfteanzahl zu geben. Diese Daten sind in Tabelle 8.30 dargestellt.

**Tabelle 8.30 Optimistische, erwartete und pessimistische maximale Arbeitskräfteanzahl – Berechnungsmodus 2**

		EH	Optimistisch	Erwartet	Pessimistisch
Gewählte max. Arbeitskräfteanzahl	$AK_{STB,max,gew.}$	AK	120,0	100,0	80,0

### 8.2.6 Mittlere Arbeitskräfteanzahl

Basierend auf dem Trapezmodell der Arbeitskräfteverteilung über die Bauzeit (siehe Bild 4–2) ist die Angabe eines Faktors  $f_{AK}$  [-], der das Verhältnis der maximalen zur mittleren Arbeitskräfteanzahl beschreibt, erforderlich. Dieser ist in seiner Bandbreite nachstehender Tabelle zu entnehmen.

**Tabelle 8.31 Arbeitskräfteverhältnis – Berechnungsmodus 2**

	Optimistisch	Erwartet	Pessimistisch
Arbeitskräfteverhältnis $f_{AK}$ [-]	0,85	0,80	0,75

Damit ergibt sich die Bandbreite der mittleren Arbeitskräfteanzahl  $AK_{STB,MW}$  [AK] entsprechend folgender Tabelle:

**Tabelle 8.32 Mittlere Arbeitskräfteanzahl – Berechnungsmodus 2**

		EH	Optimistisch	Erwartet	Pessimistisch
Arbeitskräfte MW	$AK_{STB,MW}$	AK	102,0	80,0	60,0

In weiterer Folge wird die optimistische Anzahl an AK mit den minimalen Mengen und Aufwandswerten und umgekehrt die pessimistische Anzahl an AK mit den maximalen Mengen und Aufwandswerten kombiniert um die minimale bzw. maximale Dauer der Stahlbetonarbeiten errechnen zu können.

### 8.2.7 Stahlbetonleistung

Um die Stahlbetonleistung ermitteln zu können, ist jeweils eine optimistische, erwartete und pessimistische Angabe der täglichen Arbeitszeit  $AZ_{STB}$  [h/d] erforderlich. Diese ist in Tabelle 8.33 angeführt.

Tabelle 8.33 Tägliche Arbeitszeit – Berechnungsmodus 2

	Optimistisch	Erwartet	Pessimistisch
tägl. Arbeitszeit $AZ_{STB}$ [h/d]	10,00	9,00	8,00

Um die minimale tägliche Leistung der Stahlbetonarbeiten  $L_{STB,MW,MIN}$  [m<sup>3</sup>/d] zu berechnen, ist die pessimistische tägliche Arbeitszeit  $AZ_{STB,pes.}$  [h/d] mit der pessimistischen mittleren Anzahl an Arbeitskräften  $AK_{STB,MW,pes.}$  [Std/h] zu multiplizieren und durch den maximalen Aufwandswert für Stahlbetonarbeiten  $AW_{STB,bwk,max.}$  [Std/m<sup>3</sup>] zu dividieren.

$$L_{STB,MW,MIN} = \frac{8,00 \frac{h}{d} \cdot 60,0 \frac{Std}{h}}{6,726 \frac{Std}{m^3}} = 71,369 \frac{m^3}{d}$$

Um die maximale tägliche Leistung der Stahlbetonarbeiten  $L_{STB,MW,MAX}$  [m<sup>3</sup>/d] zu berechnen, ist die optimistische tägliche Arbeitszeit  $AZ_{STB,opt.}$  [h/d] mit der optimistischen mittleren Anzahl an Arbeitskräften  $AK_{STB,MW,opt.}$  [Std/h] zu multiplizieren und durch den minimalen Aufwandswert für Stahlbetonarbeiten  $AW_{STB,bwk,min.}$  [Std/m<sup>3</sup>] zu dividieren.

$$L_{STB,MW,MAX} = \frac{10,00 \frac{h}{d} \cdot 102,0 \frac{Std}{h}}{5,029 \frac{Std}{m^3}} = 202,810 \frac{m^3}{d}$$

Die Auflistung aller Leistungswerte der Stahlbetonarbeiten erfolgt in Tabelle 8.34.

Tabelle 8.34 Mittlere tägliche Leistung der Stahlbetonarbeiten – Berechnungsmodus 2

		EH	MIN	ERW	MAX
Stahlbetonleistung	$L_{STB,MW}$	m <sup>3</sup> /d	71,369	120,070	202,810

Der erwartete Leistungswert für die Stahlbetonarbeiten entspricht jenem aus dem Berechnungsmodus 1, da die gleichen Eingangswerte eingesetzt wurden.

## 8.2.8 Dauer der Stahlbetonarbeiten

Die Bandbreite für die Dauer der Stahlbetonarbeiten  $D_{STB}$  [d] berechnet sich mittels Division der jeweiligen Ortbetonmenge für das Bauwerk  $BT_{M,bwk}$  [m<sup>3</sup>] durch die tägliche Leistung für die Stahlbetonarbeiten  $L_{STB,MW}$  [m<sup>3</sup>/d]. Die Ergebnisse sind in Tabelle 8.35 dargestellt.

Tabelle 8.35 Dauer der Stahlbetonarbeiten – Berechnungsmodus 2

		EH	MIN	ERW	MAX
Dauer STB-Ges.	$D_{STB}$	d	178,320	318,772	554,166

Die Gliederung der Gesamtdauer in Anlauf-, Hauptbau- und Auslaufphase wird getrennt, für die minimale, erwartete und maximale Dauer durchgeführt. Eine Auflistung der Ergebnisse ist in nachstehender Tabelle zu finden.

**Tabelle 8.36 Anlauf-, Hauptbau- und Auslaufphase – Berechnungsmodus 2**

		EH	MIN	ERW	MAX
Dauer Hauptbauphase	$D_{HP}$	d	124,824	191,263	277,083
Dauer Anlaufphase	$D_{AN}$	d	40,12	95,63	207,81
Dauer Auslaufphase	$D_{AUS}$	d	13,37	31,88	69,27

Zusätzlich wird für jede, der ermittelten Dauern ein Zeitpuffer  $PU_{STB,Z}$  [%] eingerechnet, der für die minimale Dauer mit 8,00 %, für die erwartete Dauer mit 10,00 % und für die maximale Dauer mit 15,00 % angesetzt wird. Die sich daraus ergebenden Dauern inkl. Puffer sind Tabelle 8.37 zu entnehmen.

**Tabelle 8.37 Gesamtdauer der Stahlbetonarbeiten inkl. Puffer – Berechnungsmodus 2**

		EH	MIN	ERW	MAX
Dauer STB-Gesamt inkl. PU	$D_{STB,PF}$	d	192,59	350,65	637,29

Die erwartete Gesamtdauer entspricht jener des Berechnungsmodus 1, da die gleichen Eingangswerte verwendet wurden. Die minimalen und maximalen Werte spiegeln jedoch die Verknüpfung aller pessimistischen bzw. optimistischen Eingangsparameter wider. Die Wahrscheinlichkeit, dass ein solcher Fall in der Realität tatsächlich eintritt ist verschwindend gering. Dies erklärt auch die sehr große Differenz zwischen der minimalen und maximalen Dauer von ca. 445 Tagen, was einer Abweichung von 231 % bezogen auf den Minimalwert entspricht.

### 8.2.9 Anzahl der Transporte

Die Ermittlung der Anzahl an Transporten hängt von den Mengen und den entsprechenden Transportgraden für Schalung, Bewehrung und Beton ab.

Die Transportgrade sowie ein entsprechender Zuschlag werden ebenfalls, entsprechend des Berechnungsmodus 2, in Form von minimalen, erwarteten und maximalen Eingangswerten in Tabelle 8.38 angegeben.

Tabelle 8.38 Transportgrade für Schalung, Bewehrung und Beton – Berechnungsmodus 2<sup>216 217</sup>

	MIN	ERW	MAX
Transportgrad Schalung $tp_{g,S}$ [1/m <sup>2</sup> ]	0,0009	0,0011	0,0015
Transportgrad Bewehrung $tp_{g,BW}$ [1/t]	0,0800	0,0850	0,0900
Transportgrad Beton $tp_{g,BT}$ [1/m <sup>3</sup> ]	0,1000	0,1300	0,1400
Zuschlag Transporte $ZU_{TR}$ [%]	8,00	10,00	12,00

In weiterer Folge kann sowohl ein mittlerer Transportgrad für die Stahlbetonarbeiten  $tp_{g,STB}$  [1/m<sup>3</sup>] als auch die Anzahl der Transporte getrennt für Schalung  $ANZ_{TR,S}$  [TR], Bewehrung  $ANZ_{TR,BW}$  [TR] und Beton  $ANZ_{TR,BT}$  [TR] sowie die Transportanzahl der gesamten Stahlbetonarbeiten mit und ohne Zuschlag errechnet werden. Die berechneten Werte sind in Tabelle 8.39 zusammengefasst dargestellt.

Tabelle 8.39 Mittlerer Transportgrad für Stahlbetonarbeiten und Anzahl der Transporte – Berechnungsmodus 2

		EH	MIN	ERW	MAX
Transportgrad STB	$tp_{g,STB}$	[1/m <sup>3</sup> ]	0,1122	0,1446	0,1572
Anzahl Transporte S	$ANZ_{TR,S}$	TR	109,71	139,98	196,13
Anzahl Transporte BW	$ANZ_{TR,BW}$	TR	330,24	419,22	483,03
Anzahl Transporte BT	$ANZ_{TR,BT}$	TR	3.616,50	4.975,75	5.537,00
<b>Anzahl Transporte STB</b>	<b><math>ANZ_{TR,STB}</math></b>	<b>TR</b>	<b>4.056,45</b>	<b>5.534,95</b>	<b>6.216,16</b>
Anzahl Transporte STB inkl. Zuschlag	$ANZ_{TR,STB,ZU}$	TR	4.380,97	6.088,44	6.962,09

Die Differenz zwischen minimaler und maximaler Anzahl an Transporten inkl. Zuschlag errechnet sich zu ca. 2.581 Transporten. Dies entspricht einer Abweichung von ca. 59 % bezogen auf die minimale Transportanzahl.

Die kurze Bauzeit, die in Kap. 8.2.8 als minimaler Wert mit ca. 193 Tagen (inkl. Zeitpuffer) berechnet wurde, kann nun mit der minimalen Anzahl an Transporten in Zusammenhang gebracht werden. Pro Tag würde sich die Anzahl der Transporte auf ca. 23 belaufen. Dies bedeutet, bei einer angenommenen täglichen Arbeitszeit von 10,0 h/d, dass 2,3 TR/h abgefertigt werden müssten oder umgekehrt etwa 26,0 min/TR zur Verfügung stehen würden.

<sup>216</sup> Vgl. HOFSTADLER, C.: Schalarbeiten - Technologische Grundlagen, Sichtbeton, Systemauswahl, Ablaufplanung, Logistik und Kalkulation. S. 464

<sup>217</sup> Vgl. HOFSTADLER, C.: Beschaffungslogistik für die Phase Bauwerk-Rohbau - Berechnung der Anzahl der Transporte für Stahlbetonarbeiten unter Anwendung der Monte-Carlo-Simulation. In: Festschrift anlässlich des 30-jährigen Bestehens des Instituts für Baubetrieb der Technischen Universität Darmstadt - Baubetriebliche Aufgaben 2009. S. 151

### 8.3 Berechnungsmodus 3: PERT-Methode

Im Berechnungsmodus 3 dienen die Grunddaten aus dem Berechnungsmodus 2 als Ausgangswerte, mit denen jeweils ein optimistischer, ein mittlerer und ein pessimistischer PERT-Wert errechnet wird. Mit den ermittelten PERT-Werten werden dann die bekannten Berechnungen für die Baukosten, Bauzeit und Anzahl der Transporte durchgeführt.

Man geht bei der PERT-Methode davon aus, dass die minimalen und maximalen Werte nicht eintreten werden. Daher fließt in jede Berechnung die gesamte Bandbreite eines Eingangsparameters mit unterschiedlicher Gewichtung ein.

Nachstehend sind die Gleichungen für die Errechnung der pessimistischen, mittleren und optimistischen PERT-Werte angeführt:<sup>218</sup>

$$PERT_{pess.} = \frac{MIN + 3 \cdot ERW + 2 \cdot MAX}{6} \quad (46)$$

$$PERT_{mittel} = \frac{MIN + 4 \cdot ERW + MAX}{6} \quad (47)$$

$$PERT_{opt.} = \frac{2 \cdot MIN + 3 \cdot ERW + MAX}{6} \quad (48)$$

Entsprechend der Berechnungsart (pessimistisch, mittel oder optimistisch) werden der minimale, erwartete und der maximale Wert unterschiedlich gewichtet.

Bei dieser Methode fließen genauso viele Informationen in die Berechnung mit ein wie im Berechnungsmodus 2, allerdings wird die Bandbreite der Ergebnisse eingeschränkt. Es werden somit Szenarien ausgeschlossen, bei denen alle Minimal- bzw. Maximalwerte gemeinsam wirken. Eine Aussage über die Eintrittswahrscheinlichkeit der ermittelten Ergebnisse kann bei der PERT-Methode nicht getroffen werden.

#### 8.3.1 Mengen

Die Bandbreiten für die Mengenangaben werden vom Berechnungsmodus 2 übernommen und mit Hilfe der PERT-Methode in einen optimistischen, einen mittleren und einen pessimistischen Wert umgerechnet. Mit diesen ermittelten Werten werden in weiterer Folge die einzelnen Berechnungen durchgeführt. Auflistungen über die Schalungsflächen, Bewehrungsmengen und Betonmengen (Ortbeton) sind in den nachstehenden Tabellen ersichtlich.

<sup>218</sup> Vgl. WERNER, A.: Datenbankgestützte Risikoanalyse von Bauprojekten - Eine Methode zur rechnergestützten Monte-Carlo-Simulation des Bauablaufes für die Risikoanalyse im Bauunternehmen. Dissertation an der Universität Rostock. S. 72

Tabelle 8.40 Schalungsflächen – Berechnungsmodus 3

Bauteile	Schalungsflächen								
	MIN		ERW		MAX		PERT <sub>opt.</sub>	PERT <sub>mittel</sub>	PERT <sub> pess.</sub>
	[m <sup>2</sup> ]	[%]	[m <sup>2</sup> ]	[%]	[m <sup>2</sup> ]	[%]			
Bodenplatte	950	0,78	1.150	0,90	1.300	0,99	1.108,33	1.141,67	1.166,67
Stützen	3.500	2,87	3.700	2,91	3.800	2,91	3.650,00	3.683,33	3.700,00
Wände	79.000	64,81	81.000	63,65	82.000	62,72	80.500,00	80.833,33	81.000,00
Decken	28.000	22,97	30.000	23,58	31.000	23,71	29.500,00	29.833,33	30.000,00
Balken, Träger	6.000	4,92	6.400	5,03	7.000	5,35	6.366,67	6.433,33	6.533,33
Sonstige Platten	1.500	1,23	1.700	1,34	2.000	1,53	1.683,33	1.716,67	1.766,67
Treppen	450	0,37	500	0,39	650	0,50	508,33	516,67	541,67
Brüstungen	2.500	2,05	2.800	2,20	3.000	2,29	2.733,33	2.783,33	2.816,67
<b>Summe</b>	<b>121.900</b>	<b>100,00</b>	<b>127.250</b>	<b>100,00</b>	<b>130.750</b>	<b>100,00</b>	<b>126.050,00</b>	<b>126.941,67</b>	<b>127.525,00</b>

Tabelle 8.41 Bewehrungsmengen – Berechnungsmodus 3

Bauteile	Bewehrungsmengen								
	MIN		ERW		MAX		PERT <sub>opt.</sub>	PERT <sub>mittel</sub>	PERT <sub> pess.</sub>
	[t]	[%]	[t]	[%]	[t]	[%]			
Bodenplatte	1.200	29,07	1.500	30,41	1.600	29,81	1.416,67	1.466,67	1.483,33
Stützen	100	2,42	120	2,43	130	2,42	115,00	118,33	120,00
Wände	1.300	31,49	1.500	30,41	1.650	30,74	1.458,33	1.491,67	1.516,67
Decken	1.200	29,07	1.450	29,40	1.600	29,81	1.391,67	1.433,33	1.458,33
Balken, Träger	140	3,39	162	3,28	170	3,17	156,00	159,67	161,00
Sonstige Platten	95	2,30	100	2,03	110	2,05	100,00	100,83	102,50
Treppen	18	0,44	20	0,41	22	0,41	19,67	20,00	20,33
Brüstungen	75	1,82	80	1,62	85	1,58	79,17	80,00	80,83
<b>Summe</b>	<b>4.128</b>	<b>100,00</b>	<b>4.932</b>	<b>100,00</b>	<b>5.367</b>	<b>100,00</b>	<b>4.736,50</b>	<b>4.870,50</b>	<b>4.943,00</b>

Tabelle 8.42 Betonmengen – Berechnungsmodus 3

Bauteile	Betonmengen								
	MIN		ERW		MAX		PERT <sub>opt.</sub>	PERT <sub>mittel</sub>	PERT <sub> pess.</sub>
	[m <sup>3</sup> ]	[%]	[m <sup>3</sup> ]	[%]	[m <sup>3</sup> ]	[%]			
Bodenplatte	9.100	25,16	9.600	25,08	10.000	25,28	9.500,00	9.583,33	9.650,00
Stützen	350	0,97	400	1,05	450	1,14	391,67	400,00	408,33
Wände	15.000	41,48	15.500	40,50	15.800	39,95	15.383,33	15.466,67	15.516,67
Decken	9.800	27,10	10.400	27,17	10.700	27,05	10.250,00	10.350,00	10.400,00
Balken, Träger	1.000	2,77	1.380	3,61	1.500	3,79	1.273,33	1.336,67	1.356,67
Sonstige Platten	350	0,97	400	1,05	430	1,09	388,33	396,67	401,67
Treppen	85	0,24	90	0,24	120	0,30	93,33	94,17	99,17
Brüstungen	480	1,33	505	1,32	550	1,39	504,17	508,33	515,83
<b>Summe</b>	<b>36.165</b>	<b>100,00</b>	<b>38.275</b>	<b>100,00</b>	<b>39.550</b>	<b>100,00</b>	<b>37.784,17</b>	<b>38.135,83</b>	<b>38.348,33</b>

Aus den Mengenangaben können in weiterer Folge jeweils drei Werte für den Schalungs- und den Bewehrungsgrad, wie sie in Tabelle 8.43 ersichtlich sind, berechnet werden.

Tabelle 8.43 Schalungs- und Bewehrungsgrad für das gesamte Bauwerk – Berechnungsmodus 3

		EH	Optimistisch	Mittel	Pessimistisch
Schalungsgrad	S <sub>g,bwk</sub>	m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup>	3,336	3,329	3,325
Bewehrungsgrad	bw <sub>g,bwk</sub>	kg/m <sup>3</sup>	125,357	127,715	128,897

### 8.3.2 Aufwandswerte

Bei den Aufwandswerten werden für jede Bauteilgruppe und für jede Tätigkeit (Schalen, Bewehren und Betonieren) jeweils ein minimaler, erwarteter und maximaler Wert angegeben und daraus ein optimistischer, ein mittlerer und ein pessimistischer PERT-Wert errech-



net. Zusammengefasst sind die Ergebnisse dieser Berechnungen in den nachstehenden Tabellen.

Tabelle 8.44 Aufwandswerte für das Schalen – Berechnungsmodus 3

Bauteile	Aufwandswerte Schalen					
	AW <sub>S,i,min</sub> [Std/m <sup>2</sup> ]	AW <sub>S,i,erw</sub> [Std/m <sup>2</sup> ]	AW <sub>S,i,max</sub> [Std/m <sup>2</sup> ]	PERT <sub>opt.</sub>	PERT <sub>mittel</sub>	PERT <sub>pers.</sub>
Bodenplatte	0,80	0,90	1,10	0,900	0,917	0,950
Stützen	0,60	0,85	1,00	0,792	0,833	0,858
Wände	1,20	1,40	1,50	1,350	1,383	1,400
Decken	0,80	0,90	1,10	0,900	0,917	0,950
Balken, Träger	0,70	0,90	1,00	0,850	0,883	0,900
Sonstige Platten	1,00	1,15	1,30	1,125	1,150	1,175
Treppen	2,50	3,20	3,50	3,017	3,133	3,183
Brüstungen	1,40	1,50	1,70	1,500	1,517	1,550

Tabelle 8.45 Aufwandswerte für das Bewehren – Berechnungsmodus 3

Bauteile	Aufwandswerte Bewehren					
	AW <sub>BW,i,min</sub> [Std/t]	AW <sub>BW,i,erw</sub> [Std/t]	AW <sub>BW,i,max</sub> [Std/t]	PERT <sub>opt.</sub>	PERT <sub>mittel</sub>	PERT <sub>pers.</sub>
Bodenplatte	5,00	7,00	8,50	6,583	6,917	7,167
Stützen	9,00	10,50	12,00	10,250	10,500	10,750
Wände	11,00	12,50	14,00	12,250	12,500	12,750
Decken	7,00	9,00	10,00	8,500	8,833	9,000
Balken, Träger	9,00	11,00	12,00	10,500	10,833	11,000
Sonstige Platten	10,00	11,50	13,00	11,250	11,500	11,750
Treppen	15,00	17,00	20,00	16,833	17,167	17,667
Brüstungen	10,00	12,00	13,00	11,500	11,833	12,000

Tabelle 8.46 Aufwandswerte für das Betonieren – Berechnungsmodus 3

Bauteile	Aufwandswerte Betonieren					
	AW <sub>BT,i,min</sub> [Std/m <sup>3</sup> ]	AW <sub>BT,i,erw</sub> [Std/m <sup>3</sup> ]	AW <sub>BT,i,max</sub> [Std/m <sup>3</sup> ]	PERT <sub>opt.</sub>	PERT <sub>mittel</sub>	PERT <sub>pers.</sub>
Bodenplatte	0,35	0,45	0,50	0,425	0,442	0,450
Stützen	2,00	2,30	2,50	2,233	2,283	2,317
Wände	0,65	0,75	0,85	0,733	0,750	0,767
Decken	0,40	0,50	0,55	0,475	0,492	0,500
Balken, Träger	0,45	0,55	0,65	0,533	0,550	0,567
Sonstige Platten	0,60	0,65	0,75	0,650	0,658	0,675
Treppen	0,85	1,00	1,10	0,967	0,992	1,008
Brüstungen	0,80	0,90	1,00	0,883	0,900	0,917

Aus den Einzel-Aufwandswerten und den zugehörigen Mengen lassen sich in weiterer Folge die mittleren Aufwandswerte für das Schalen, Bewehren und Betonieren berechnen. Die Ergebnisse sind in Tabelle 8.47 dargestellt.

Tabelle 8.47 Mittlere Aufwandswerte für Schalen, Bewehren und Betonieren sowie der Gesamtaufwandswert für Stahlbetonarbeiten – Berechnungsmodus 3

		EH	Optimistisch	Mittel	Pessimistisch
Aufwandswert Schalen	AW <sub>S,bwk</sub>	Std/m <sup>2</sup>	1,206	1,235	1,256
Aufwandswert Bewehren	AW <sub>BW,bwk</sub>	Std/t	9,332	9,624	9,850
Aufwandswert Betonieren	AW <sub>BT,bwk</sub>	Std/m <sup>3</sup>	0,596	0,613	0,626
<b>Aufwandswert STB</b>	<b>AW<sub>STB,bwk</sub></b>	<b>Std/m<sup>3</sup></b>	<b>5,790</b>	<b>5,953</b>	<b>6,074</b>

### 8.3.3 Geräte- und Materialkosten

Die Geräte- und Materialkosten für das vorliegende Beispiel werden in Tabelle 8.48 bis Tabelle 8.50, getrennt nach Schalung, Bewehrung und Beton aufgelistet. Für jedes Bauteil werden dabei ein optimistischer, ein mittlerer und ein pessimistischer PERT-Wert angegeben. Die Basisdaten für diese Tabellen sind die gleichen, die im Berechnungsmodus 2 getrennt nach Geräte- und Materialkosten aufgelistet wurden.

Tabelle 8.48 Geräte- und Materialkosten Schalung – Berechnungsmodus 3

Bauteile	Geräte- und Materialkosten Schalung					
	$k_{S,i,min}$ [€/m <sup>2</sup> ]	$k_{S,i,erw}$ [€/m <sup>2</sup> ]	$k_{S,i,max}$ [€/m <sup>2</sup> ]	PERT <sub>opt.</sub>	PERT <sub>mittel</sub>	PERT <sub>pess.</sub>
Bodenplatte	3,55	4,15	4,50	4,01	4,11	4,17
Stützen	8,40	9,10	9,80	8,98	9,10	9,22
Wände	12,75	13,20	14,15	13,21	13,28	13,44
Decken	14,40	15,00	15,70	14,92	15,02	15,13
Balken, Träger	6,95	7,60	8,75	7,58	7,68	7,88
Sonstige Platten	5,80	7,00	7,95	6,76	6,96	7,12
Treppen	6,15	7,60	8,35	7,24	7,48	7,61
Brüstungen	6,80	7,40	8,05	7,31	7,41	7,52

Tabelle 8.49 Geräte- und Materialkosten Bewehrung – Berechnungsmodus 3

Bauteile	Geräte- und Materialkosten Bewehrung					
	$k_{BW,i,min}$ [€/t]	$k_{BW,i,erw}$ [€/t]	$k_{BW,i,max}$ [€/t]	PERT <sub>opt.</sub>	PERT <sub>mittel</sub>	PERT <sub>pess.</sub>
Bodenplatte	546,00	551,00	554,50	549,92	550,75	551,33
Stützen	540,00	556,50	568,00	552,92	555,67	557,58
Wände	541,00	544,50	548,00	543,92	544,50	545,08
Decken	543,00	555,00	560,50	551,92	553,92	554,83
Balken, Träger	543,00	564,50	571,00	558,42	562,00	563,08
Sonstige Platten	546,00	557,00	564,00	554,50	556,33	557,50
Treppen	546,00	558,00	564,00	555,00	557,00	558,00
Brüstungen	546,00	557,00	564,00	554,50	556,33	557,50

Tabelle 8.50 Geräte- und Materialkosten Beton – Berechnungsmodus 3

Bauteile	Geräte- und Materialkosten Beton					
	$k_{BT,i,min}$ [€/m <sup>3</sup> ]	$k_{BT,i,erw}$ [€/m <sup>3</sup> ]	$k_{BT,i,max}$ [€/m <sup>3</sup> ]	PERT <sub>opt.</sub>	PERT <sub>mittel</sub>	PERT <sub>pess.</sub>
Bodenplatte	119,00	125,00	142,00	125,83	126,83	129,67
Stützen	148,00	157,00	173,00	156,67	158,17	160,83
Wände	110,00	132,00	143,00	126,50	130,17	132,00
Decken	110,00	136,00	149,00	129,50	133,83	136,00
Balken, Träger	129,00	145,00	160,00	142,17	144,83	147,33
Sonstige Platten	127,00	134,00	154,00	135,00	136,17	139,50
Treppen	131,00	160,00	172,00	152,33	157,17	159,17
Brüstungen	125,00	136,00	147,00	134,17	136,00	137,83

Werden die Geräte- und Materialkosten gewichtet nach den Mengen aufaddiert und durch die jeweiligen Gesamtmengen dividiert, so ergeben sich daraus die mittleren Geräte- und Materialkosten getrennt nach Schalung, Bewehrung und Beton. Bezieht man zu diesen Werten den Schalungs- und Bewehrungsgrad mit ein, so folgen daraus die mittleren Geräte- und Materialkosten für die gesamten Stahlbetonarbeiten. Die berechneten Werte sind in nachstehender Tabelle angeführt.

Tabelle 8.51 Mittlere Geräte- und Materialkosten für Schalung, Bewehrung und Beton sowie für die gesamten Stahlbetonarbeiten – Berechnungsmodus 3

		EH	Optimistisch	Mittel	Pessimistisch
Geräte- & Materialkosten Schalung	$k_{S,MW}$	€/m <sup>2</sup>	12,882	12,965	13,104
Geräte- & Materialkosten Bewehrung	$k_{BW,MW}$	€/t	549,204	550,489	551,239
Geräte- & Materialkosten Beton	$k_{BT,MW}$	€/m <sup>3</sup>	128,240	131,339	133,574
Geräte- & Materialkosten Stahlbeton	$k_{STB,MW}$	€/m <sup>3</sup>	240,063	244,801	248,203

### 8.3.4 Einzelkosten/Herstellkosten

Um die Einzel- bzw. Herstellkosten berechnen zu können sind weitere Eingangswerte erforderlich. Diese sind wiederum als minimale, erwartete und maximale Werte angegeben, um daraus optimistische, mittlere und pessimistische PERT-Werte ermitteln zu können. Dieser Schritt ist in Tabelle 8.52 dargestellt.

Tabelle 8.52 Mittellohnkosten, Zuschlag für Baustellengemeinkosten, Kostenpuffer – Berechnungsmodus 3

	MIN	ERW	MAX	PERT <sub>opt.</sub>	PERT <sub>mittel</sub>	PERT <sub>pers.</sub>
Mittellohnkosten $ML_{STB,MW}$ [€/Std]	33,00	34,00	36,00	34,00	34,17	34,50
Zuschlag BGK $ZU_{BGK}$ [%]	15,00	20,00	25,00	19,17	20,00	20,83
Kostenpuffer $PU_{STB,K}$ [%]	5,00	10,00	15,00	9,17	10,00	10,83

Mittels dieser und der bereits errechneten Parameter können anhand der bekannten Gleichungen die Einzel- und Herstellkosten für die Stahlbetonarbeiten sowie die Herstellkosten inkl. Kostenpuffer berechnet werden.

Tabelle 8.53 Einzel- und Herstellkosten der Stahlbetonarbeiten – Berechnungsmodus 3

		EH	Optimistisch	Mittel	Pessimistisch
Stahlbeton Einzelkosten	$K_{STB,EK}$	€	16.509.205,94	17.092.699,47	17.553.753,50
Stahlbeton Herstellkosten	$K_{STB,HK}$	€	19.673.470,42	20.511.239,36	21.210.785,48
<b>Stahlbeton Herstellkosten inkl. Puffer</b>	<b><math>K_{STB,HK,PF}</math></b>	<b>€</b>	<b>21.476.871,87</b>	<b>22.562.363,30</b>	<b>23.508.620,58</b>

Die errechneten Kosten liegen beim gegenständlichen Berechnungsmodus 3 in einem engeren Bereich, als es im Berechnungsmodus 2 der Fall ist. Es wird hier davon ausgegangen, dass nicht alle Ereignisse, die zu einem möglichst schlechten (bzw. guten) Ergebnis führen auch wirklich eintreten. Aus diesem Grund fließen für jeden Parameter immer alle drei Eingangswerte (Minimum, erwarteter Wert und Maximum), unterschiedlich gewichtet, in die optimistische, mittlere und pessimistische Berechnung ein.

Damit errechnet sich die Differenz zwischen den optimistischen und den pessimistischen Herstellkosten inkl. Puffer  $K_{STB,K,PF}$  [€] zu 9,5 %, bezogen auf die optimistischen Kosten. Die Differenz vom erwarteten Kostenwert zum optimistischen Wert beträgt 4,8 % und zum pessimistischen Wert 4,2 %. Damit liegen bei diesem Berechnungsmodus die erwarteten Herstellkosten inkl. Puffer in einer Bandbreite von weniger als  $\pm 10$  % und würden demnach der Stufe eines Kostenanschlages (in der Phase der Vorbereitung und Vergabe) nach deutscher Judikatur (vgl. Bild 3–2) entsprechen. In Bild 8–4 sind die prozentualen Abweichungen vom mittleren Kostenwert grafisch dargestellt.

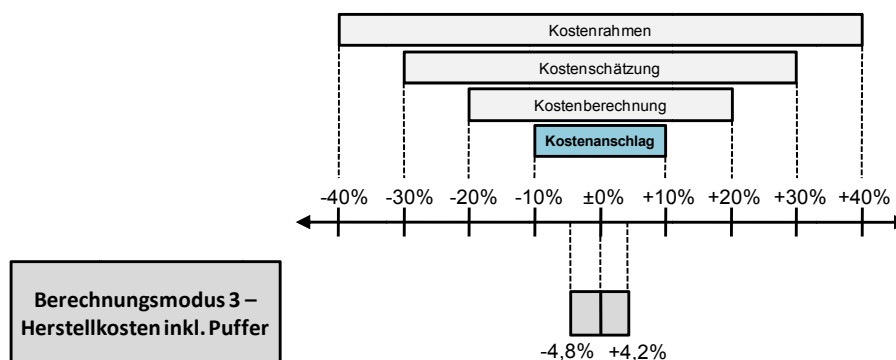


Bild 8–4 Prozentuale Bandbreite der Herstellkosten für die Stahlbetonarbeiten inkl. Kostenpuffer – Berechnungsmodus 3

Damit erhält man eine erhebliche Bandbreitenverengung gegenüber dem Berechnungsmodus 2. Interessant ist allerdings, dass bei beiden Berechnungsmodi die gleichen Ausgangsdaten (somit auch der gleiche Informationsstand) für die Berechnungen verwendet wurden.

### 8.3.5 Maximale Arbeitskräfteanzahl

Die maximale Anzahl an Arbeitskräften wird einerseits über die Anzahl der Krane und einen Proportionalitätsfaktor und andererseits über die Mindestarbeitsfläche je Arbeitskraft berechnet.

Die Bandbreite der Eingangswerte, für die Berechnung auf Basis der Krananzahl, und die dazugehörigen optimistischen, mittleren und pessimistischen PERT-Werte sind in nachstehender Tabelle angeführt.

Tabelle 8.54 Eingangswerte zur Berechnung der maximalen Arbeitskräfteanzahl auf Basis der Krananzahl – Berechnungsmodus 3

	Optimistisch	Mittel	Pessimistisch	PERT <sub>opt.</sub>	PERT <sub>mittel</sub>	PERT <sub>pess.</sub>
Anzahl Krane ANZ <sub>K,AK</sub> [Kran]	6,00	5,00	4,00	5,17	5,00	4,83
Proportionalitätsf. PF <sub>K,AK</sub> [AK/Kran]	25,00	22,00	18,00	22,33	21,83	21,17

Die daraus ermittelte Bandbreite der maximalen Arbeitskräfteanzahl, auf Basis der Krananzahl, ist in Tabelle 8.55 eingetragen.

Tabelle 8.55 Maximale Arbeitskräfteanzahl auf Basis der Krananzahl – Berechnungsmodus 3

		EH	Optimistisch	Mittel	Pessimistisch
Max. Arbeitskräfteanzahl - Krane	$AK_{STB,max}$	AK	115,4	109,2	102,3

Die Bandbreite der Eingangswerte, für die Berechnung auf Basis der Mindestarbeitsfläche je AK, und die dazugehörigen optimistischen, mittleren und pessimistischen PERT-Werte sind in nachstehender Tabelle angeführt.

Tabelle 8.56 Eingangswerte zur Berechnung der maximalen Arbeitskräfteanzahl auf Basis der Mindestarbeitsfläche – Berechnungsmodus 3

	Optimistisch	Mittel	Pessimistisch	PERT <sub>opt.</sub>	PERT <sub>mittel</sub>	PERT <sub> pess.</sub>
Arbeitsfläche Ges. $AF_{ges}$ [m <sup>2</sup> ]	10.500,00	10.000,00	9.500,00	10.083,33	10.000,00	9.916,67
Faktor bearb. AF $f_{AF,bearbeitbar}$ [%]	70,00	60,00	50,00	61,67	60,00	58,33
Mindestarbeitsfl. $AF_{MIN}$ [m <sup>2</sup> /AK]	35,00	30,00	25,00	30,83	30,00	29,17

Die daraus ermittelte Bandbreite der maximalen Arbeitskräfteanzahl, auf Basis der Mindestarbeitsfläche, ist in Tabelle 8.57 eingetragen.

Tabelle 8.57 Maximale Arbeitskräfteanzahl auf Basis der Mindestarbeitsfläche – Berechnungsmodus 3

		EH	Optimistisch	Mittel	Pessimistisch
Bearbeitbare Arbeitsfläche	$AF_{bearbeitbar}$	m <sup>2</sup>	6.218,06	6.000,00	5.784,72
Max. Arbeitskräfteanzahl - Arbeitsfläche	$AK_{STB,max}$	AK	201,7	200,0	198,3

Für die weiteren Berechnungen der Bauzeit, wird auf Basis der errechneten Bandbreiten, der maximalen Arbeitskräfteanzahl, eine neue Bandbreite gewählt. Die kleineren, der ermittelten Werte (hier jene, die auf Basis der Krananzahl berechnet wurden) sind dabei maßgebend. Es wird eine optimistische, eine mittlere und eine pessimistische Anzahl an Arbeitskräften angegeben. Die Werte sind in Tabelle 8.58 ersichtlich.

Tabelle 8.58 Optimistische, mittlere und pessimistische maximale Arbeitskräfteanzahl – Berechnungsmodus 3

		EH	Optimistisch	Mittel	Pessimistisch
Gewählte max. Arbeitskräfteanzahl	$AK_{STB,max,gew.}$	AK	120,0	100,0	80,0

Um die Vergleichbarkeit mit den anderen Berechnungsmodi zu gewährleisten, wird für den Berechnungsmodus 3 die gleiche Bandbreite wie schon bei Berechnungsmodus 2 gewählt.

### 8.3.6 Mittlere Arbeitskräfteanzahl

Für die Umrechnung von der maximalen auf die mittlere Arbeitskräfteanzahl wird ein Arbeitskräfteverhältnis, welches in Tabelle 8.59 angegeben ist, verwendet.

Tabelle 8.59 Arbeitskräfteverhältnis – Berechnungsmodus 3

	Optimistisch	Erwartet	Pessimistisch	PERT <sub>opt.</sub>	PERT <sub>mittel</sub>	PERT <sub>pess.</sub>
Arbeitskräfteverhältnis $f_{AK}$ [-]	0,85	0,80	0,75	0,81	0,80	0,79

Somit kann die mittlere Anzahl an Arbeitskräften entsprechend Tabelle 8.60 berechnet werden.

Tabelle 8.60 Mittlere Arbeitskräfteanzahl – Berechnungsmodus 3

		EH	Optimistisch	Mittel	Pessimistisch
Arbeitskräfte Mittelwert	AK <sub>STB,MW</sub>	AK	97,0	80,0	63,3

### 8.3.7 Stahlbetonleistung

Die tägliche Arbeitszeit  $AZ_{STB}$  [h/d] ist ein, für die Berechnung der Stahlbetonleistung  $L_{STB,MW}$  [m<sup>3</sup>/d] erforderlicher Wert, der für die weitere Berechnung folgend angenommen wird:

Tabelle 8.61 Tägliche Arbeitszeit – Berechnungsmodus 3

	Optimistisch	Erwartet	Pessimistisch	PERT <sub>opt.</sub>	PERT <sub>mittel</sub>	PERT <sub>pess.</sub>
tägl. Arbeitszeit $AZ_{STB}$ [h/d]	10,00	9,00	8,00	9,17	9,00	8,83

Damit lassen sich die optimistische, die mittlere und die pessimistische Leistung der Stahlbetonarbeiten berechnen. Die Ergebnisse sind in Tabelle 8.62 angeführt.

Tabelle 8.62 Mittlere tägliche Leistung der Stahlbetonarbeiten – Berechnungsmodus 3

		EH	Optimistisch	Mittel	Pessimistisch
Stahlbetonleistung	$L_{STB,MW}$	m <sup>3</sup> /d	153,560	120,941	92,110

### 8.3.8 Dauer der Stahlbetonarbeiten

Durch die Division der jeweiligen Betonmenge durch die tägliche Stahlbetonleistung ergibt sich eine Bandbreite für die Dauer der Stahlbetonarbeiten  $D_{STB}$  [d], welche in nachstehender Tabelle aufgelistet ist.

Tabelle 8.63 Dauer der Stahlbetonarbeiten – Berechnungsmodus 3

		EH	Optimistisch	Mittel	Pessimistisch
Dauer STB-Gesamt	$D_{STB}$	d	246,055	315,326	416,333

Die Gliederung dieser Gesamtdauer in eine Anlauf-, Hauptbau- und Auslaufphase wird getrennt für die optimistischen, mittleren und pessimistischen Werte durchgeführt und in Tabelle 8.64 zusammengefasst.

Tabelle 8.64 Anlauf-, Hauptbau- und Auslaufphase – Berechnungsmodus 3

		EH	Optimistisch	Mittel	Pessimistisch
Dauer Hauptbauphase	$D_{HP}$	d	151,734	189,196	242,861
Dauer Anlaufphase	$D_{AN}$	d	70,74	94,60	130,10
Dauer Auslaufphase	$D_{AUS}$	d	23,58	31,53	43,37

Zusätzlich wird ein Zeitpuffer  $PU_{STB,Z}$  [%] entsprechend Tabelle 8.65 zur Abfederung von Störungen eingerechnet.

Tabelle 8.65 Zeitpuffer – Berechnungsmodus 3

	MIN	ERW	MAX	PERT <sub>opt.</sub>	PERT <sub>mittel</sub>	PERT <sub> pess.</sub>
Zeitpuffer $PU_{STB,Z}$ [%]	8,00	10,00	15,00	10,17	10,50	11,33

Womit sich eine Bandbreite für die Dauer der Stahlbetonarbeiten inkl. Puffer  $D_{STB,PF}$  [d] ergibt, die in Tabelle 8.66 dargestellt ist.

Tabelle 8.66 Gesamtdauer der Stahlbetonarbeiten inkl. Puffer – Berechnungsmodus 3

		EH	Optimistisch	Mittel	Pessimistisch
Dauer STB-Gesamt inkl. PU	$D_{STB,PF}$	d	271,07	348,44	463,52

Diese Bandbreite ist im Vergleich zu den Ergebnissen des Berechnungsmodus 2 zwar enger, die Differenz zwischen dem optimistischen und pessimistischen Wert liegt aber noch immer bei 71 % bezogen auf den optimistischen Wert. Eine Angabe der Wahrscheinlichkeit, mit der die einzelnen Werte eintreten werden, kann bei der PERT-Methode nicht gemacht werden.

### 8.3.9 Anzahl der Transporte

Für die Berechnung der Anzahl an Transporten sind die entsprechenden Mengen mit den zugehörigen Transportgraden erforderlich. Diese Transportgrade sind in Tabelle 8.67 getrennt nach Schalung, Bewehrung und Beton dargestellt. Zusätzlich wird auch noch ein

Zuschlag auf die Gesamtanzahl angeben, der Unvorhergesehenes, Fehler, Ungenauigkeiten etc. abdecken soll.

Tabelle 8.67 Transportgrade für Schalung, Bewehrung und Beton – Berechnungsmodus 3

	MIN	ERW	MAX	PERT <sub>opt.</sub>	PERT <sub>mittel</sub>	PERT <sub> pess.</sub>
Transportgrad Schalung $tp_{g,S}$ [1/m <sup>2</sup> ]	0,0009	0,0011	0,0015	0,0011	0,0011	0,0012
Transportgrad Bewehrung $tp_{g,BW}$ [1/t]	0,0800	0,0850	0,0900	0,0842	0,0850	0,0858
Transportgrad Beton $tp_{g,BT}$ [1/m <sup>3</sup> ]	0,1000	0,1300	0,1400	0,1217	0,1267	0,1283
Zuschlag Transporte ZU <sub>TR</sub> [%]	8,00	10,00	12,00	9,6667	10,00	10,3333

In weiterer Folge können sowohl der mittlere Transportgrad für die gesamten Stahlbetonarbeiten  $tp_{g,STB}$  [1/m<sup>3</sup>] als auch die Anzahl der Transporte getrennt für Schalung ANZ<sub>TR,S</sub> [TR], Bewehrung ANZ<sub>TR,BW</sub> [TR] und Beton ANZ<sub>TR,BT</sub> [TR] sowie die Gesamtanzahl aller Transporte mit und ohne Zuschlag errechnet werden. Die Ergebnisse dieser Berechnungen sind in nachstehender Tabelle aufgelistet.

Tabelle 8.68 Mittlerer Transportgrad für Stahlbeton und Anzahl der Transporte – Berechnungsmodus 3

		EH	Optimistisch	Mittel	Pessimistisch
Transportgrad STB	$tp_{g,STB}$	[1/m <sup>3</sup> ]	0,1359	0,1413	0,1434
Anzahl Transporte S	ANZ <sub>TR,S</sub>	TR	138,66	143,87	153,03
Anzahl Transporte BW	ANZ <sub>TR,BW</sub>	TR	398,66	413,99	424,27
Anzahl Transporte BT	ANZ <sub>TR,BT</sub>	TR	4.597,07	4.830,54	4.921,37
<b>Anzahl Transporte STB</b>	<b>ANZ<sub>TR,STB</sub></b>	<b>TR</b>	<b>5.134,38</b>	<b>5.388,40</b>	<b>5.498,67</b>
Anzahl Transporte STB inkl. Zuschlag	ANZ <sub>TR,STB,ZU</sub>	TR	5.630,71	5.927,24	6.066,87

Auch bei der Anzahl der Transporte ist eine Verringerung der Bandbreite erkennbar. Die Differenz zwischen der optimistischen und der pessimistischen Anzahl an Transporten inkl. Zuschlag für die gesamten Stahlbetonarbeiten beträgt 436 Transporte. Dies entspricht einer Abweichung von etwa 7,7 % bezogen auf den optimistischen Wert.

#### 8.4 Berechnungsmodus 4: vereinfachter probabilistischer Ansatz

Der Berechnungsmodus 4 beschreibt ein Verfahren, bei dem jeder Eingangsparameter durch einen minimalen, einen erwarteten und einen maximalen Wert beschrieben wird. Zusätzlich wird jeder dieser Werte mit einer subjektiv festgelegte Eintrittswahrscheinlichkeit belegt. Die Summe der Wahrscheinlichkeiten für einen Parameter muss 1 bzw. 100 % nach Glg. (49) ergeben.



$$\sum p_{EW,i} = 1 \quad (49)$$

Werden die Produkte aus den Eingangswerten mit ihrer jeweiligen Wahrscheinlichkeit aufaddiert, so liefert diese Vorgehensweise den subjektiv wahrscheinlichsten Eingangswert. Die restlichen Berechnungen werden entsprechend der anderen Berechnungsmodi mit diesem ‚wahrscheinlichsten Wert‘ durchgeführt.

Der Vorteil dieser Methode ist, dass viel wahrscheinlichere Ergebnisse geliefert werden. Dafür ist aber ein erhöhter Rechenaufwand sowie die zusätzlich erforderliche Eingabe der Eintrittswahrscheinlichkeiten notwendig. Außerdem werden die Ergebnisse wie im Berechnungsmodus 1 nur in Form einer Zahl wiedergegeben. Die Angabe einer Bandbreite ist im Berechnungsmodus 4 nicht möglich. Um eine Bandbreite angeben zu können, wären zusätzliche Berechnungen von optimistischen und pessimistischen Szenarien notwendig.

Als Grunddaten der Eingangsparameter werden die minimalen, erwarteten und maximalen Werte aus Kap. 8.2 angesetzt, um die Ergebnisse der verschiedenen Berechnungsmodi miteinander vergleichen zu können.

#### 8.4.1 Mengen

Die Mengen eines Bauwerks können in einer Bandbreite vom Minimal- bis zum Maximalwert angegeben werden. Die Eingangsparameter werden getrennt für Schalung, Bewehrung und Beton sowie je Bauteilgruppe erfasst. Jedem der Eingangswerte wird eine entsprechende Eintrittswahrscheinlichkeit zugeordnet. Eine Auflistung dieser Mengenangaben ist in Tabelle 8.69 bis Tabelle 8.71 dargestellt.

Tabelle 8.69 Schalungsflächen – Berechnungsmodus 4

Bauteile	Schalungsflächen							
	MIN		ERW		MAX		$\Sigma p_{EW}$	Wahrsch. Wert
	[m <sup>2</sup> ]	[p <sub>EW,i</sub> ]	[m <sup>2</sup> ]	[p <sub>EW,i</sub> ]	[m <sup>2</sup> ]	[p <sub>EW,i</sub> ]		
Bodenplatte	950	0,05	1.150	0,80	1.300	0,15	1,00	1.163
Stützen	3.500	0,15	3.700	0,50	3.800	0,35	1,00	3.705
Wände	79.000	0,10	81.000	0,60	82.000	0,30	1,00	81.100
Decken	28.000	0,05	30.000	0,80	31.000	0,15	1,00	30.050
Balken, Träger	6.000	0,20	6.400	0,60	7.000	0,20	1,00	6.440
Sonstige Platten	1.500	0,15	1.700	0,65	2.000	0,20	1,00	1.730
Treppen	450	0,02	500	0,90	650	0,08	1,00	511
Brüstungen	2.500	0,10	2.800	0,70	3.000	0,20	1,00	2.810
<b>Summe</b>	<b>121.900</b>		<b>127.250</b>		<b>130.750</b>			<b>127.509</b>

Tabelle 8.70 Bewehrungsmengen – Berechnungsmodus 4

Bauteile	Bewehrungsmengen						$\Sigma p_{EW}$	Wahrsch. Wert
	MIN		ERW		MAX			
	[t]	[ $p_{EW,i}$ ]	[t]	[ $p_{EW,i}$ ]	[t]	[ $p_{EW,i}$ ]		
Bodenplatte	1.200	0,10	1.500	0,80	1.600	0,10	1,00	1.480
Stützen	100	0,05	120	0,70	130	0,25	1,00	122
Wände	1.300	0,10	1.500	0,70	1.650	0,20	1,00	1.510
Decken	1.200	0,10	1.450	0,60	1.600	0,30	1,00	1.470
Balken, Träger	140	0,10	162	0,55	170	0,35	1,00	163
Sonstige Platten	95	0,20	100	0,50	110	0,30	1,00	102
Treppen	18	0,15	20	0,65	22	0,20	1,00	20
Brüstungen	75	0,10	80	0,60	85	0,30	1,00	81
<b>Summe</b>	<b>4.128</b>		<b>4.932</b>		<b>5.367</b>			<b>4.947</b>

Tabelle 8.71 Betonmengen – Berechnungsmodus 4

Bauteile	Betonmengen						$\Sigma p_{EW}$	Wahrsch. Wert
	MIN		ERW		MAX			
	[m³]	[ $p_{EW,i}$ ]	[m³]	[ $p_{EW,i}$ ]	[m³]	[ $p_{EW,i}$ ]		
Bodenplatte	9.100	0,05	9.600	0,70	10.000	0,25	1,00	9.675
Stützen	350	0,10	400	0,60	450	0,30	1,00	410
Wände	15.000	0,05	15.500	0,65	15.800	0,30	1,00	15.565
Decken	9.800	0,10	10.400	0,75	10.700	0,15	1,00	10.385
Balken, Träger	1.000	0,10	1.380	0,70	1.500	0,20	1,00	1.366
Sonstige Platten	350	0,15	400	0,50	430	0,35	1,00	403
Treppen	85	0,05	90	0,80	120	0,15	1,00	94
Brüstungen	480	0,10	505	0,65	550	0,25	1,00	514
<b>Summe</b>	<b>36.165</b>		<b>38.275</b>		<b>39.550</b>			<b>38.412</b>

Damit lassen sich wahrscheinlichste Werte für den Schalungs- und Bewehrungsgrad für das gesamte Bauwerk berechnen (siehe Tabelle 8.72).

Tabelle 8.72 Schalungs- und Bewehrungsgrad für das gesamte Bauwerk – Berechnungsmodus 4

		EH	Wahrsch. Wert
Schalungsgrad	$s_{g,bwk}$	m²/m³	3,319
Bewehrungsgrad	$bw_{g,bwk}$	kg/m³	128,793

### 8.4.2 Aufwandswerte

Wie für die Mengen, werden auch bei den Aufwandswerten für jede Bauteilgruppe und getrennt nach Schalen, Bewehren und Betonieren die wahrscheinlichsten Aufwandswerte errechnet. Die Ausgangsdaten, in Form von minimalen, erwarteten und maximalen Werten, stammen aus Gründen der Vergleichbarkeit aus Tabelle 8.13 bis Tabelle 8.15 des Berechnungsmodus 2.

Zusammengefasst werden die entsprechenden Aufwandswerte in Tabelle 8.73 bis Tabelle 8.75.

Tabelle 8.73 Aufwandswerte für das Schalen – Berechnungsmodus 4

Bauteile	Aufwandswerte Schalen						$\Sigma p_{EW}$	Wahrsch. Wert
	AW <sub>S,i,min</sub>		AW <sub>S,i,erw</sub>		AW <sub>S,i,max</sub>			
	[Std/m <sup>2</sup> ]	[P <sub>EW,i</sub> ]	[Std/m <sup>2</sup> ]	[P <sub>EW,i</sub> ]	[Std/m <sup>2</sup> ]	[P <sub>EW,i</sub> ]		
Bodenplatte	0,80	0,10	0,90	0,80	1,10	0,10	1,00	0,910
Stützen	0,60	0,10	0,85	0,70	1,00	0,20	1,00	0,855
Wände	1,20	0,15	1,40	0,50	1,50	0,35	1,00	1,405
Decken	0,80	0,10	0,90	0,60	1,10	0,30	1,00	0,950
Balken, Träger	0,70	0,10	0,90	0,65	1,00	0,25	1,00	0,905
Sonstige Platten	1,00	0,15	1,15	0,55	1,30	0,30	1,00	1,173
Treppen	2,50	0,05	3,20	0,60	3,50	0,35	1,00	3,270
Brüstungen	1,40	0,15	1,50	0,65	1,70	0,20	1,00	1,525

Tabelle 8.74 Aufwandswerte für das Bewehren – Berechnungsmodus 4

Bauteile	Aufwandswerte Bewehren						$\Sigma p_{EW}$	Wahrsch. Wert
	AW <sub>BW,i,min</sub>		AW <sub>BW,i,erw</sub>		AW <sub>BW,i,max</sub>			
	[Std/t]	[P <sub>EW,i</sub> ]	[Std/t]	[P <sub>EW,i</sub> ]	[Std/t]	[P <sub>EW,i</sub> ]		
Bodenplatte	5,00	0,10	7,00	0,60	8,50	0,30	1,00	7,25
Stützen	9,00	0,10	10,50	0,70	12,00	0,20	1,00	10,65
Wände	11,00	0,20	12,50	0,50	14,00	0,30	1,00	12,65
Decken	7,00	0,05	9,00	0,70	10,00	0,25	1,00	9,15
Balken, Träger	9,00	0,15	11,00	0,60	12,00	0,25	1,00	10,95
Sonstige Platten	10,00	0,15	11,50	0,50	13,00	0,35	1,00	11,80
Treppen	15,00	0,05	17,00	0,55	20,00	0,40	1,00	18,10
Brüstungen	10,00	0,10	12,00	0,70	13,00	0,20	1,00	12,00

Tabelle 8.75 Aufwandswerte für das Betonieren – Berechnungsmodus 4

Bauteile	Aufwandswerte Betonieren						$\Sigma p_{EW}$	Wahrsch. Wert
	AW <sub>BT,i,min</sub>		AW <sub>BT,i,erw</sub>		AW <sub>BT,i,max</sub>			
	[Std/m <sup>3</sup> ]	[P <sub>EW,i</sub> ]	[Std/m <sup>3</sup> ]	[P <sub>EW,i</sub> ]	[Std/m <sup>3</sup> ]	[P <sub>EW,i</sub> ]		
Bodenplatte	0,35	0,05	0,45	0,80	0,50	0,15	1,00	0,453
Stützen	2,00	0,05	2,30	0,80	2,50	0,15	1,00	2,315
Wände	0,65	0,15	0,75	0,65	0,85	0,20	1,00	0,755
Decken	0,40	0,10	0,50	0,75	0,55	0,15	1,00	0,498
Balken, Träger	0,45	0,10	0,55	0,70	0,65	0,20	1,00	0,560
Sonstige Platten	0,60	0,10	0,65	0,60	0,75	0,30	1,00	0,675
Treppen	0,85	0,05	1,00	0,55	1,10	0,40	1,00	1,033
Brüstungen	0,80	0,10	0,90	0,70	1,00	0,20	1,00	0,910

Mit den wahrscheinlichsten Aufwandswerten und den zugehörigen, wahrscheinlichsten Mengen lassen sich die mittleren Aufwandswerte für das Schalen, Bewehren und Betonieren errechnen. Weiters kann, unter Einbeziehung des Schalungs- und Bewehrungsgrades, der wahrscheinlichste Gesamt-Aufwandswert für die Stahlbetonarbeiten ermittelt werden. Die Ergebnisse dieser Berechnungen sind in nachstehender Tabelle aufgelistet.

Tabelle 8.76 Mittlere Aufwandswerte für Schalen, Bewehren und Betonieren sowie der Gesamt-Aufwandswert für Stahlbetonarbeiten – Berechnungsmodus 4

		EH	Wahrsch. Wert
Aufwandswert Schalung	AW <sub>S,bwk</sub>	Std/m <sup>2</sup>	1,259
Aufwandswert Bewehrung	AW <sub>BW,bwk</sub>	Std/t	9,884
Aufwandswert Beton	AW <sub>BT,bwk</sub>	Std/m <sup>3</sup>	0,621
<b>Aufwandswert STB</b>	<b>AW<sub>STB,bwk</sub></b>	<b>Std/m<sup>3</sup></b>	<b>6,073</b>

### 8.4.3 Geräte- und Materialkosten

Bei den Geräte- und Materialkosten werden ebenfalls die minimalen, erwarteten und maximalen Werte mit ihrer subjektiven Eintrittswahrscheinlichkeit kombiniert, um so die wahrscheinlichsten Kosten ermitteln zu können. Dieser Vorgang wird für die Geräte- und Materialkosten getrennt nach Schalung, Bewehrung und Beton sowie für die einzelnen Bauteilgruppen durchgeführt. In den folgenden Tabellen sind diese Ergebnisse zusammengefasst.

Tabelle 8.77 Gerätekosten Schalung – Berechnungsmodus 4

Bauteile	Gerätekosten Schalung						$\Sigma p_{EW}$	Wahrsch. Wert
	$k_{S,i,min}$		$k_{S,i,erw}$		$k_{S,i,max}$			
	[€/m <sup>2</sup> ]	[p <sub>EW,i</sub> ]	[€/m <sup>2</sup> ]	[p <sub>EW,i</sub> ]	[€/m <sup>2</sup> ]	[p <sub>EW,i</sub> ]		
Bodenplatte	2,75	0,10	3,25	0,70	3,50	0,20	1,00	3,250
Stützen	7,50	0,05	8,00	0,65	8,50	0,30	1,00	8,125
Wände	11,75	0,05	12,00	0,75	12,75	0,20	1,00	12,138
Decken	13,50	0,05	14,00	0,80	14,50	0,15	1,00	14,050
Balken, Träger	5,75	0,10	6,00	0,60	6,75	0,30	1,00	6,200
Sonstige Platten	4,50	0,10	5,00	0,55	5,75	0,35	1,00	5,213
Treppen	4,75	0,10	5,50	0,50	5,75	0,40	1,00	5,525
Brüstungen	5,50	0,10	6,00	0,70	6,25	0,20	1,00	6,000

Tabelle 8.78 Gerätekosten Bewehrung – Berechnungsmodus 4

Bauteile	Gerätekosten Bewehrung						$\Sigma p_{EW}$	Wahrsch. Wert
	$k_{BW,i,min}$		$k_{BW,i,erw}$		$k_{BW,i,max}$			
	[€/t]	[p <sub>EW,i</sub> ]	[€/t]	[p <sub>EW,i</sub> ]	[€/t]	[p <sub>EW,i</sub> ]		
Bodenplatte	11,00	0,10	14,00	0,75	14,50	0,15	1,00	13,775
Stützen	10,00	0,05	11,50	0,80	13,00	0,15	1,00	11,650
Wände	11,00	0,05	12,50	0,75	13,00	0,20	1,00	12,525
Decken	13,00	0,10	15,00	0,70	15,50	0,20	1,00	14,900
Balken, Träger	13,00	0,15	14,50	0,65	16,00	0,20	1,00	14,575
Sonstige Platten	16,00	0,10	17,00	0,55	19,00	0,35	1,00	17,600
Treppen	16,00	0,10	18,00	0,60	19,00	0,30	1,00	18,100
Brüstungen	16,00	0,05	17,00	0,70	19,00	0,25	1,00	17,450

Tabelle 8.79 Gerätekosten Beton – Berechnungsmodus 4

Bauteile	Gerätekosten Beton						$\Sigma p_{EW}$	Wahrsch. Wert
	$k_{BT,i,min}$		$k_{BT,i,erw}$		$k_{BT,i,max}$			
	[€/m <sup>3</sup> ]	[p <sub>EW,i</sub> ]	[€/m <sup>3</sup> ]	[p <sub>EW,i</sub> ]	[€/m <sup>3</sup> ]	[p <sub>EW,i</sub> ]		
Bodenplatte	20,00	0,10	22,00	0,70	25,00	0,20	1,00	22,400
Stützen	33,00	0,05	35,00	0,80	38,00	0,15	1,00	35,350
Wände	20,00	0,05	24,00	0,65	26,00	0,30	1,00	24,400
Decken	20,00	0,10	23,00	0,75	27,00	0,15	1,00	23,300
Balken, Träger	30,00	0,10	32,00	0,60	34,00	0,30	1,00	32,400
Sonstige Platten	23,00	0,15	26,00	0,50	28,00	0,35	1,00	26,250
Treppen	32,00	0,10	34,00	0,65	37,00	0,25	1,00	34,550
Brüstungen	26,00	0,05	28,00	0,75	30,00	0,20	1,00	28,300

Tabelle 8.80 Materialkosten Schalung – Berechnungsmodus 4

Bauteile	Materialkosten Schalung						$\Sigma p_{EW}$	Wahrsch. Wert
	$k_{S,i,min}$		$k_{S,i,erw}$		$k_{S,i,max}$			
	[€/m <sup>2</sup> ]	[p <sub>EW,i</sub> ]	[€/m <sup>2</sup> ]	[p <sub>EW,i</sub> ]	[€/m <sup>2</sup> ]	[p <sub>EW,i</sub> ]		
Bodenplatte	0,80	0,05	0,90	0,75	1,00	0,20	1,00	0,915
Stützen	0,90	0,05	1,10	0,85	1,30	0,10	1,00	1,110
Wände	1,00	0,05	1,20	0,65	1,40	0,30	1,00	1,250
Decken	0,90	0,05	1,00	0,60	1,20	0,35	1,00	1,065
Balken, Träger	1,20	0,15	1,60	0,55	2,00	0,30	1,00	1,660
Sonstige Platten	1,30	0,10	2,00	0,65	2,20	0,25	1,00	1,980
Treppen	1,40	0,10	2,10	0,50	2,60	0,40	1,00	2,230
Brüstungen	1,30	0,10	1,40	0,80	1,80	0,10	1,00	1,430

Tabelle 8.81 Materialkosten Bewehrung – Berechnungsmodus 4

Bauteile	Materialkosten Bewehrung						$\Sigma p_{EW}$	Wahrsch. Wert
	$k_{BW,i,min}$		$k_{BW,i,erw}$		$k_{BW,i,max}$			
	[€/t]	[p <sub>EW,i</sub> ]	[€/t]	[p <sub>EW,i</sub> ]	[€/t]	[p <sub>EW,i</sub> ]		
Bodenplatte	535,00	0,05	537,00	0,75	540,00	0,20	1,00	537,500
Stützen	530,00	0,10	545,00	0,60	555,00	0,30	1,00	546,500
Wände	530,00	0,10	532,00	0,60	535,00	0,30	1,00	532,700
Decken	530,00	0,10	540,00	0,65	545,00	0,25	1,00	540,250
Balken, Träger	530,00	0,10	550,00	0,80	555,00	0,10	1,00	548,500
Sonstige Platten	530,00	0,10	540,00	0,55	545,00	0,35	1,00	540,750
Treppen	530,00	0,05	540,00	0,60	545,00	0,35	1,00	541,250
Brüstungen	530,00	0,10	540,00	0,70	545,00	0,20	1,00	540,000

Tabelle 8.82 Materialkosten Beton – Berechnungsmodus 4

Bauteile	Materialkosten Beton						$\Sigma p_{EW}$	Wahrsch. Wert
	$k_{BT,i,min}$		$k_{BT,i,erw}$		$k_{BT,i,max}$			
	[€/m <sup>3</sup> ]	[p <sub>EW,i</sub> ]	[€/m <sup>3</sup> ]	[p <sub>EW,i</sub> ]	[€/m <sup>3</sup> ]	[p <sub>EW,i</sub> ]		
Bodenplatte	99,00	0,05	103,00	0,80	117,00	0,15	1,00	104,900
Stützen	115,00	0,05	122,00	0,75	135,00	0,20	1,00	124,250
Wände	90,00	0,05	108,00	0,70	117,00	0,25	1,00	109,350
Decken	90,00	0,05	113,00	0,65	122,00	0,30	1,00	114,550
Balken, Träger	99,00	0,10	113,00	0,70	126,00	0,20	1,00	114,200
Sonstige Platten	104,00	0,15	108,00	0,55	126,00	0,30	1,00	112,800
Treppen	99,00	0,05	126,00	0,60	135,00	0,35	1,00	127,800
Brüstungen	99,00	0,05	108,00	0,75	117,00	0,20	1,00	109,350

In einem weiteren Schritt werden die Geräte- und Materialkosten zusammengefasst für Schalung, Bewehrung und Beton dargestellt. Außerdem können, durch die Umrechnung der Einheiten mit Hilfe des Schalungs- und Bewehrungsgrades, die Geräte- und Materialkosten für die gesamten Stahlbetonarbeiten berechnet werden. Die Ergebnisse dieser Berechnungen sind in Tabelle 8.83 aufgelistet.

Tabelle 8.83 Mittlere Geräte- und Materialkosten für Schalung, Bewehrung und Beton sowie für die gesamten Stahlbetonarbeiten – Berechnungsmodus 4

		EH	Wahrsch. Wert
Geräte- & Materialkosten Schalung	$k_{S,MW}$	€/m <sup>2</sup>	13,073
Geräte- & Materialkosten Bewehrung	$k_{BW,MW}$	€/t	551,416
Geräte- & Materialkosten Beton	$k_{BT,MW}$	€/m <sup>3</sup>	134,145
Geräte- & Materialkosten Stahlbeton	$k_{STB,MW}$	€/m <sup>3</sup>	248,558

#### 8.4.4 Einzelkosten/Herstellkosten

Die zusätzlich erforderlichen Eingangsparameter zur Berechnung der Einzel- und Herstellkosten, wie die Mittellohnkosten  $ML_{STB,MW}$  [€/Std], der Zuschlag für die Baustellengemeinkosten  $ZU_{BGK}$  [%] und der Kostenpuffer  $PU_{STB,K}$  [%] werden ebenfalls nach dem Prinzip des Berechnungsmodus 4 je in Form eines wahrscheinlichsten Wertes ermittelt. Diese sind in nachstehender Tabelle angeführt.

Tabelle 8.84 Mittellohnkosten, Zuschlag für Baustellengemeinkosten, Kostenpuffer – Berechnungsmodus 4

	MIN		ERW		MAX		$\Sigma p_{EW}$	Wahrsch. Wert
	[EH]	[ $P_{EW,i}$ ]	[EH]	[ $P_{EW,i}$ ]	[EH]	[ $P_{EW,i}$ ]		
Mittellohnkosten $ML_{STB,MW}$ [€/Std]	33,00	0,05	34,00	0,70	36,00	0,25	1,00	34,450
Zuschlag BGK $ZU_{BGK}$ [%]	15,00	0,05	20,00	0,70	25,00	0,25	1,00	21,000
Kostenpuffer $PU_{STB,K}$ [%]	5,00	0,05	10,00	0,70	15,00	0,25	1,00	11,000

Damit können die Einzel- und Herstellkosten der Stahlbetonarbeiten bzw. die Herstellkosten inkl. Kostenpuffer berechnet werden.

Tabelle 8.85 Einzel- und Herstellkosten der Stahlbetonarbeiten – Berechnungsmodus 4

		EH	Wahrsch. Wert
Stahlbeton Einzelkosten	$K_{STB,EK}$	€	17.583.926,72
Stahlbeton Herstellkosten	$K_{STB,HK}$	€	21.276.551,33
<b>Stahlbeton Herstellkosten inkl. Puffer</b>	<b><math>K_{STB,HK,PF}</math></b>	<b>€</b>	<b>23.616.971,98</b>

Dieses Ergebnis für die Kosten der Stahlbetonarbeiten stellt zwar das subjektiv wahrscheinlichste dar, es kann aber keine Aussage darüber getroffen werden, mit welcher Wahrscheinlichkeit dieser Wert wirklich eintreten wird. Außerdem spiegeln diese Kosten wieder nur ein mögliches Szenario wider, ähnlich wie es im Berechnungsmodus 1 der Fall war. Der Unterschied besteht hierbei aber, dass sehr viel mehr Informationen in die Berechnung eingeflossen sind, als bei der deterministischen Methode. Weiters ist die Angabe einer Bandbreite, bei diesem vereinfachten probabilistischen Ansatz, nicht möglich. Diesem Problem könnte mit weiterem Rechenaufwand und der Angabe von optimistischen und pessimistischen Eintrittswahrscheinlichkeiten begegnet werden. Das skalare Ergebnis der Kostenberechnung des Berechnungsmodus 4 liegt über dem pessimistischen Kostenwert des Berechnungsmodus 3. Es wird also davon ausgegangen, dass sich die tatsächlichen Kosten eher im oberen Bereich der bisher berechneten Bandbreiten bewegen wird.

### 8.4.5 Maximale Arbeitskräfteanzahl

Die wahrscheinlichsten Eingangswerte, zur Berechnung der maximalen Anzahl an Arbeitskräften, auf Basis der Krananzahl, sind in Tabelle 8.86 aus den minimalen, erwarteten und maximalen Werten und den jeweiligen, subjektiven Eintrittswahrscheinlichkeiten errechnet.

Tabelle 8.86 Eingangswerte zur Berechnung der maximalen Arbeitskräfteanzahl auf Basis der Krananzahl – Berechnungsmodus 4

	MIN		ERW		MAX		$\Sigma p_{EW}$	Wahrsch. Wert
	[EH]	[ $p_{EW,i}$ ]	[EH]	[ $p_{EW,i}$ ]	[EH]	[ $p_{EW,i}$ ]		
Anzahl Krane ANZ <sub>K,AK</sub> [Kran]	4,00	0,05	5,00	0,90	6,00	0,05	1,00	5,00
Proportionalitätsf. PF <sub>K,AK</sub> [AK/Kran]	18,00	0,10	22,00	0,70	25,00	0,20	1,00	22,20

Die sich daraus ergebende, wahrscheinlichste maximale Arbeitskräfteanzahl, bezogen auf die Anzahl der Krane, gibt Tabelle 8.87 wieder.

Tabelle 8.87 Maximale Arbeitskräfteanzahl auf Basis der Krananzahl – Berechnungsmodus 4

		EH	Wahrsch. Wert
Max. Arbeitskräfteanzahl - Krane	AK <sub>STB,max</sub>	AK	111,0

Die wahrscheinlichsten Eingangswerte, zur Berechnung der maximalen Anzahl an Arbeitskräften, auf Basis der Mindestarbeitsfläche je AK, sind in Tabelle 8.88 aus den minimalen, erwarteten und maximalen Werten und den jeweiligen, subjektiven Eintrittswahrscheinlichkeiten errechnet.

Tabelle 8.88 Eingangswerte zur Berechnung der maximalen Arbeitskräfteanzahl auf Basis der Mindestarbeitsfläche – Berechnungsmodus 4

	MIN		ERW		MAX		$\Sigma p_{EW}$	Wahrsch. Wert
	[EH]	[ $p_{EW,i}$ ]	[EH]	[ $p_{EW,i}$ ]	[EH]	[ $p_{EW,i}$ ]		
Arbeitsfläche Ges. AF <sub>ges</sub> [m <sup>2</sup> ]	9.500,00	0,30	10.000,00	0,50	10.500,00	0,20	1,00	9.950,00
Faktor bearb. AF f <sub>AF,bearbeitbar</sub> [%]	50,00	0,20	60,00	0,70	70,00	0,10	1,00	59,00
Mindestarbeitsfl. AF <sub>MIN</sub> [m <sup>2</sup> /AK]	25,00	0,05	30,00	0,75	35,00	0,20	1,00	30,75

Die sich daraus ergebende, wahrscheinlichste maximale Arbeitskräfteanzahl, bezogen auf die Mindestarbeitsfläche, gibt Tabelle 8.89 wieder.

Tabelle 8.89 Maximale Arbeitskräfteanzahl auf Basis der Mindestarbeitsfläche – Berechnungsmodus 4

		EH	Wahrsch. Wert
Bearbeitbare Arbeitsfläche	AF <sub>bearbeitbar</sub>	m <sup>2</sup>	5.870,50
Max. Arbeitskräfteanzahl - Arbeitsfläche	AK <sub>STB,max</sub>	AK	190,9

Für die Ermittlung der Bauzeit wird, auf Basis der errechneten Werte, eine maximale Anzahl an Arbeitskräften gewählt. Der kleinere, der ermittelten Werte (hier jener, der auf Basis der Krananzahl berechnet wurde) ist dabei maßgebend. Es wird in weiterer Folge von einer maximalen Anzahl an Arbeitskräften von 100 AK ausgegangen.

#### 8.4.6 Mittlere Arbeitskräfteanzahl

Um die mittlere Arbeitskräfteanzahl berechnen zu können, ist die Angabe eines Arbeitskräfteverhältnisses  $f_{AK}$  [-] notwendig. Der subjektiv wahrscheinlichste Wert wird in nachstehender Tabelle ermittelt.

Tabelle 8.90 Arbeitskräfteverhältnis – Berechnungsmodus 4

	MIN		ERW		MAX		$\Sigma p_{EW}$	Wahrsch. Wert
	[EH]	[P <sub>EW,i</sub> ]	[EH]	[P <sub>EW,i</sub> ]	[EH]	[P <sub>EW,i</sub> ]		
Arbeitskräfte Faktor $f_{AK}$ [-]	0,85	0,05	0,80	0,55	0,75	0,40	1,00	0,783

Die sich daraus ergebende mittlere Anzahl an Arbeitskräften beträgt 78,3 AK.

#### 8.4.7 Stahlbetonleistung

Für die Berechnung der Stahlbetonleistung  $L_{STB,MW}$  [m<sup>3</sup>/d] muss eine tägliche Arbeitszeit  $AZ_{STB}$  [h/d] angenommen werden. Diese wird aus einer gewählten Bandbreite mit den jeweiligen Eintrittswahrscheinlichkeiten errechnet (siehe Tabelle 8.91).

Tabelle 8.91 Tägliche Arbeitszeit – Berechnungsmodus 4

	MIN		ERW		MAX		$\Sigma p_{EW}$	Wahrsch. Wert
	[EH]	[P <sub>EW,i</sub> ]	[EH]	[P <sub>EW,i</sub> ]	[EH]	[P <sub>EW,i</sub> ]		
tägl. Arbeitszeit $AZ_{STB}$ [h/d]	10,00	0,05	9,00	0,50	8,00	0,45	1,00	8,60

Die wahrscheinlichste mittlere Leistung der Stahlbetonarbeiten  $L_{STB,MW}$  [m<sup>3</sup>/d] berechnet sich demnach zu 110,81 m<sup>3</sup>/d.



### 8.4.8 Dauer der Stahlbetonarbeiten

Die Dauer der Stahlbetonarbeiten  $D_{STB}$  [d] ergibt sich aus der Division der gesamten Betonmenge des Bauwerks  $BT_{M,bwk}$  [m<sup>3</sup>] durch die mittlere Leistung der Stahlbetonarbeiten  $L_{STB,MW}$  [m<sup>3</sup>/d]. Weiters können die Dauern für die Anlauf-, die Hauptbau- und die Auslaufphase errechnet werden. Die Ergebnisse sind in nachstehender Tabelle zusammengefasst.

**Tabelle 8.92 Dauer der gesamten Stahlbetonarbeiten sowie für die Anlauf-, Hauptbau- und Auslaufphase – Berechnungsmodus 4**

		EH	Wahrsch. Wert
Dauer STB-Gesamt	$D_{STB}$	d	346,644
Dauer Hauptbauphase	$D_{HP}$	d	195,854
Dauer Anlaufphase	$D_{AN}$	d	113,09
Dauer Auslaufphase	$D_{AUS}$	d	37,70

Wird zusätzlich noch ein Zeitpuffer  $PU_{STB,Z}$  [%] zur Abfederung von Störungen laut Tabelle 8.93 angenommen, errechnet sich die Dauer inkl. Puffer  $D_{STB,PF}$  [d] zu 384,08 d.

**Tabelle 8.93 Zeitpuffer – Berechnungsmodus 4**

	MIN		ERW		MAX		$\Sigma p_{EW}$	Wahrsch. Wert
	[EH]	[ $p_{EW,i}$ ]	[EH]	[ $p_{EW,i}$ ]	[EH]	[ $p_{EW,i}$ ]		
Zeitpuffer $PU_{STB,Z}$ [%]	8,00	0,10	10,00	0,70	15,00	0,20	1,00	10,800

Die so ermittelte Dauer für die Stahlbetonarbeiten liegt in einem Bereich zwischen dem mittleren und dem pessimistischen Wert des Berechnungsmodus 3. Somit wird angenommen, dass sich die tatsächliche Dauer im oberen Bereich der errechneten Bandbreiten befindet.

Für den Berechnungsmodus 4 ist anzumerken, dass nur ein mögliches Szenario berücksichtigt wird, welches zwar das subjektiv wahrscheinlichste darstellt, bei dem aber keine Aussage darüber getroffen werden kann, mit welcher Wahrscheinlichkeit dieser Wert, nach den vorhandenen Informationen, tatsächlich eintreten wird.

### 8.4.9 Anzahl der Transporte

Die Anzahl der Transporte ist von den jeweiligen Mengen und den zugehörigen Transportgraden abhängig. Die Grundwerte der Transportgrade entsprechen jenen von Berechnungsmodus 2. Jedem Wert wird eine subjektive Eintrittswahrscheinlichkeit zugeordnet, womit sich jeweils ein wahrscheinlichster Transportgrad errechnen lässt. Zusätzlich wird noch ein Zuschlag  $ZU_{TR}$  [%] für die Anzahl der Transporte angeführt, der Unvorhergesehenes, Fehler, Ungenauigkeiten etc. abdecken soll.

Die Daten sind in Tabelle 8.94 zusammengefasst dargestellt.

Tabelle 8.94 Transportgrade für Schalung, Bewehrung und Beton sowie der Zuschlag für die Anzahl der Transporte – Berechnungsmodus 4

	MIN		ERW		MAX		$\Sigma p_{EW}$	Wahrsch. Wert
	[EH]	[ $P_{EW,i}$ ]	[EH]	[ $P_{EW,i}$ ]	[EH]	[ $P_{EW,i}$ ]		
Transportgrad Schalung $tp_{g,S}$ [1/m <sup>2</sup> ]	0,0009	0,10	0,0011	0,75	0,0015	0,15	1,00	0,00114
Transportgrad Bewehrung $tp_{g,BW}$ [1/t]	0,0800	0,05	0,0850	0,90	0,0900	0,05	1,00	0,08500
Transportgrad Beton $tp_{g,BT}$ [1/m <sup>3</sup> ]	0,1000	0,05	0,1300	0,80	0,1400	0,15	1,00	0,13000
Zuschlag Transporte $ZU_{TR}$ [%]	8,00	0,10	10,00	0,70	12,00	0,20	1,00	10,20

Mit den angeführten Werten lassen sich der mittlere Transportgrad für die gesamten Stahlbetonarbeiten  $tp_{g,STB}$  [1/m<sup>3</sup>], die Anzahl der Transporte für Schalung  $ANZ_{TR,S}$  [TR], Bewehrung  $ANZ_{TR,BW}$  [TR] und Beton  $ANZ_{TR,BT}$  [TR], die Gesamtanzahl an Transporten für die Stahlbetonarbeiten  $ANZ_{TR,STB}$  [TR] sowie die Anzahl der Transporte inkl. des angenommenen Zuschlags  $ANZ_{TR,STB,ZU}$  [TR] berechnen (siehe Tabelle 8.95).

Tabelle 8.95 Mittlerer Transportgrad für Stahlbeton und Anzahl der Transporte – Berechnungsmodus 4

		EH	Wahrsch. Wert
Transportgrad STB	$tp_{g,STB}$	[1/m <sup>3</sup> ]	0,1447
Anzahl Transporte S	$ANZ_{TR,S}$	TR	145,36
Anzahl Transporte BW	$ANZ_{TR,BW}$	TR	420,51
Anzahl Transporte BT	$ANZ_{TR,BT}$	TR	4.993,56
<b>Anzahl Transporte STB</b>	<b><math>ANZ_{TR,STB}</math></b>	<b>TR</b>	<b>5.559,43</b>
Anzahl Transporte STB inkl. Zuschlag	$ANZ_{TR,STB,ZU}$	TR	6.126,49

Damit liegt die Anzahl der Transporte über der pessimistischen Anzahl nach Berechnungsmodus 3. Es kann somit angenommen werden, dass sich die tatsächliche Anzahl an Transporten im oberen Bereich der bisher errechneten Bandbreiten befindet.

Bezieht man die wahrscheinliche Anzahl an Transporten inkl. Zuschlag auf die wahrscheinliche Dauer der Stahlbetonarbeiten inkl. Puffer (~ 384 d), so müssen durchschnittlich ca. 16 Transporte pro Tag die Baustelle beliefern. Bei einer wahrscheinlichen täglichen Arbeitszeit von etwa 8,6 h/d bedeutet dies, dass ca. 1,9 Transporte je Stunde abgefertigt werden müssten, wodurch etwa 32 min je Transport zur Verfügung stehen würden.

## 8.5 Berechnungsmodus 5: Monte-Carlo Simulation

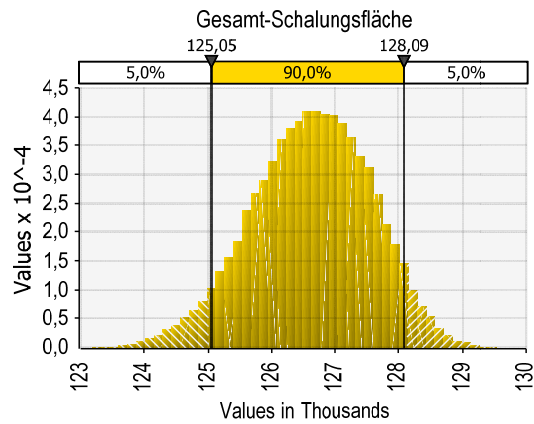
Im Berechnungsmodus 5 wird die Monte-Carlo Methode zur Berechnung der Bauzeit, Baukosten und der Anzahl an Transporten für die Stahlbetonarbeiten herangezogen. Auf die Funktionsweise dieser Methode wurde in Kap. 6 eingegangen. Als Ausgangsdaten werden aus Gründen der Vergleichbarkeit die Eingangswerte aus dem Berechnungsmodus 2 (also die minimalen, erwarteten und maximalen Werte) übernommen. Für die Monte-Carlo Simulation müssen für jeden Eingangsparameter Verteilungsfunktionen definiert werden. Diese sollen den tatsächlichen Verlauf in der Natur möglichst ideal abbilden. Daher ist die Verwendung von diskreten Verteilungen oder Rechteckverteilungen meist auszuschließen. Wie in Kap. 6.6 und Kap. 6.10 beschrieben, wurden bei bisheriger Anwendung dieser Methode im Bauwesen sehr häufig Dreiecksverteilungen angewendet. Allerdings wurde in Kap. 6.6 auch darauf hingewiesen, dass Wahrscheinlichkeitsverteilungen wie etwa die Log-Normal-, LogLogistic-, BETA- oder PERT-Verteilung die Wirklichkeit besser widerspiegeln, als Dreiecksverteilungen.

Für eine erste Berechnung ist es jedoch durchaus sinnvoll alle Berechnungen mit Dreiecksverteilungen durchzuführen. In einem weiteren Schritt werden dann Vergleiche zwischen diesen Ergebnissen und jenen, die mit Hilfe von PERT-Verteilungen generiert wurden, durchgeführt. Es werden für diese Gegenüberstellung PERT-Verteilungen verwendet, da diese, ähnlich wie Dreiecksverteilungen, mit 3 Werten (Minimum, erwarteter Wert und Maximum) beschrieben werden können.

Alle Simulationen werden jeweils mit 50.000 Iterationen und der Latin Hypercube Probenhebungsmethode durchgeführt. Verwendet wurde dafür das Softwareprogramm @Risk der Firma Palisade, mit dem auch alle Abbildungen in diesem Kapitel erstellt wurden.

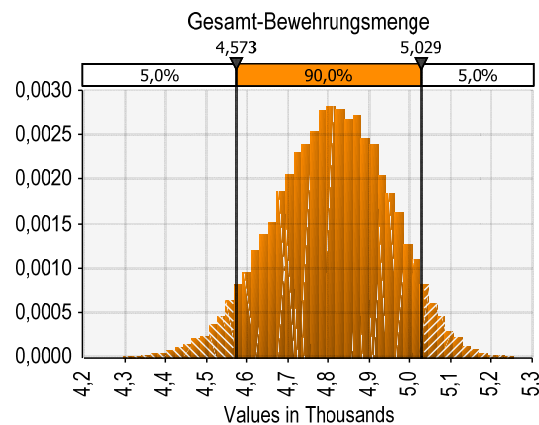
### 8.5.1 Mengen

Es werden für die Berechnung mit der MC-Methode die gleichen Bandbreiten wie in Berechnungsmodus 2 verwendet, um die Vergleichbarkeit zwischen den einzelnen Berechnungsmodi gewährleisten zu können. Die ermittelten Verteilungen der Gesamtschalungsfläche, Gesamt-Bewehrungsmenge und Gesamt-Betonmenge sind in den nachstehenden Abbildungen dargestellt.



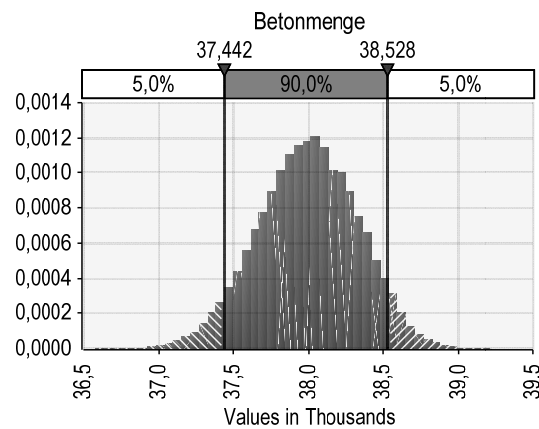
**Bild 8–5 Gesamt-Schalungsfläche [m²] – Berechnungsmodus 5**

In Bild 8–5 ist die Verteilung der Gesamt-Schalungsfläche dargestellt, wobei auf der Abszisse die Schalungsfläche in Tausend-m² Schritten und auf der Ordinate die Häufigkeiten aufgetragen sind. Mit 90%iger Wahrscheinlichkeit liegt die Schalungsfläche zwischen 125.050 m² und 128.090 m².



**Bild 8–6 Gesamt-Bewehrungsmenge [t] – Berechnungsmodus 5**

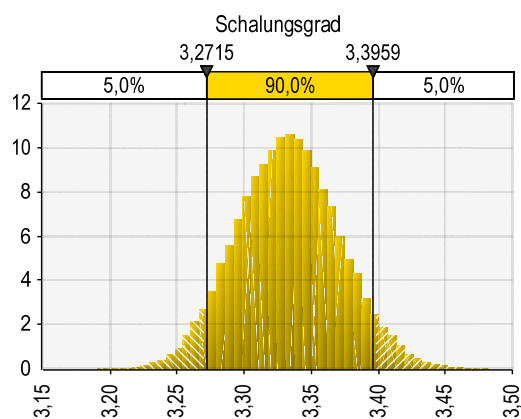
In Bild 8–6 ist die Verteilung der Gesamt-Bewehrungsmenge dargestellt, wobei auf der Abszisse die Bewehrungsmenge in Tausend-t und auf der Ordinate die Häufigkeiten aufgetragen sind. Mit 90%iger Wahrscheinlichkeit liegt die Bewehrungsmenge zwischen 4.573 t und 5.029 t.



**Bild 8–7 Gesamt-Betonmenge [m<sup>3</sup>] – Berechnungsmodus 5**

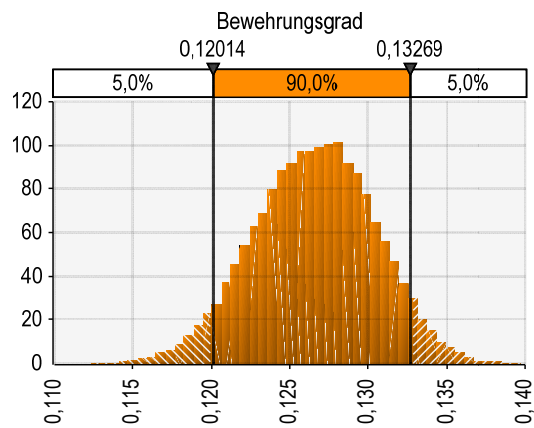
Bild 8–7 zeigt die Verteilung der Gesamt-Betonmenge, wobei auf der Abszisse die Betonmenge in Tausend-m<sup>3</sup> und auf der Ordinate die Häufigkeiten aufgetragen sind. Mit 90%iger Wahrscheinlichkeit liegt die Betonmenge zwischen 37.442 m<sup>3</sup> und 38.528 m<sup>3</sup>.

Aus den Verteilungen der Mengen lassen sich der Schalungs- und der Bewehrungsgrad mit der jeweiligen Dichtefunktion errechnen.



**Bild 8–8 Schalungsgrad [m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>] – Berechnungsmodus 5**

Der Schalungsgrad für das gesamte Bauwerk  $s_{g,bwk}$  [m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>] errechnet sich nach Glg. (9) und kann mit einer Wahrscheinlichkeit von 90 % zwischen 3,2715 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup> und 3,3959 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup> angegeben werden.

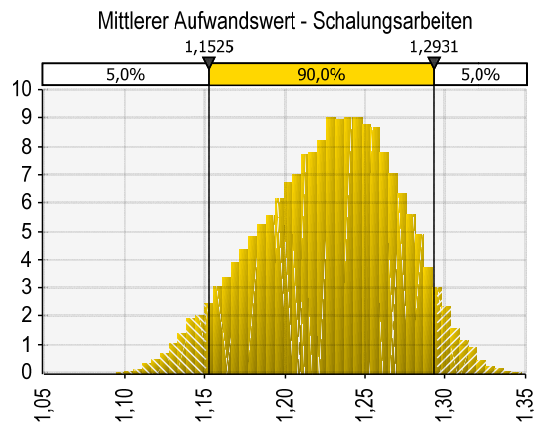


**Bild 8–9 Bewehrungsgrad [t/m³] – Berechnungsmodus 5**

Der Bewehrungsgrad für das gesamte Bauwerk  $bw_{g,bwk}$  [t/m³] errechnet sich nach Glg. (10) und kann mit einer Wahrscheinlichkeit von 90 % zwischen 0,12014 t/m³ und 0,13269 t/m³ angegeben werden.

### 8.5.2 Aufwandswerte

Wie die Mengen, werden auch die Aufwandswerte in Form von Verteilungsfunktionen errechnet und in Bild 8–10 bis Bild 8–12 grafisch dargestellt.



**Bild 8–10 Mittlerer Aufwandswert – Schalungsarbeiten [Std/m²] – Berechnungsmodus 5**

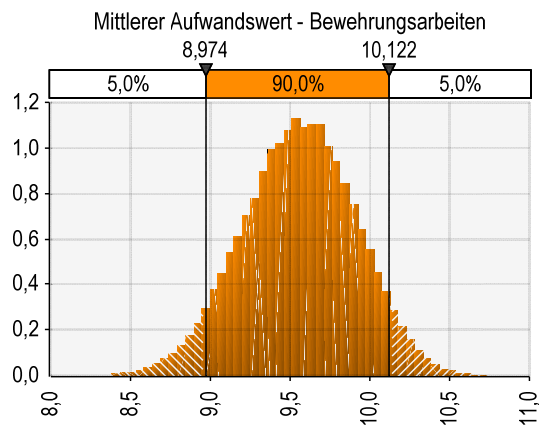


Bild 8–11 Mittlerer Aufwandswert – Bewehrungsarbeiten [Std/t] – Berechnungsmodus 5

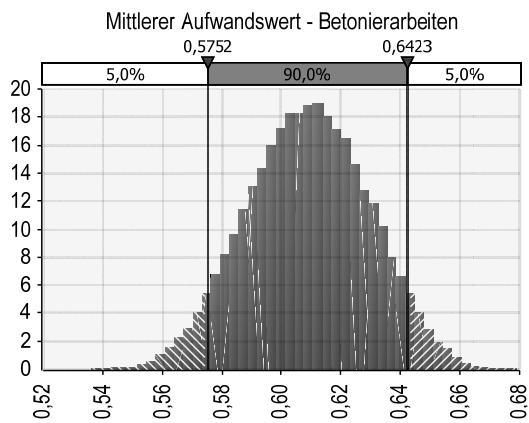
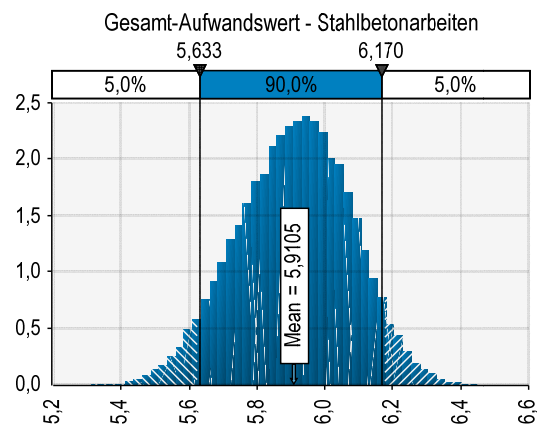


Bild 8–12 Mittlerer Aufwandswert – Betonierarbeiten [Std/m³] – Berechnungsmodus 5

Der Gesamt-Aufwandswert für die Stahlbetonarbeiten  $AW_{STB}$  [Std/m³] errechnet sich in weiterer Folge durch die Kombination der mittleren Aufwandswerte für das Schalen, Bewehren und Betonieren mit dem Schalungs- und Bewehrungsgrad nach Glg. (11). Als Ergebnis dieser Berechnung wird folgendes Histogramm generiert.

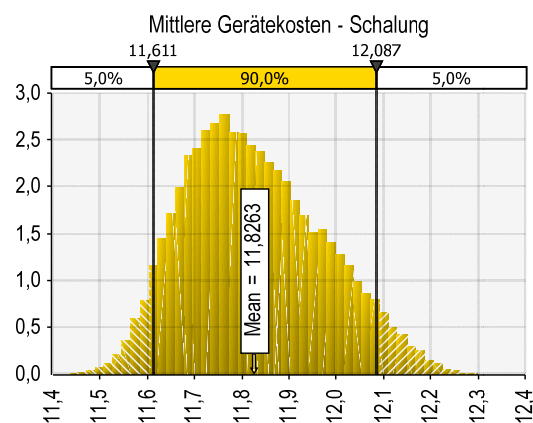


**Bild 8–13 Gesamt-Aufwandswert der Stahlbetonarbeiten [Std/m<sup>3</sup>] – Berechnungsmodus 5**

Der Gesamt-Aufwandswert der Stahlbetonarbeiten liegt damit mit 90%iger Wahrscheinlichkeit zwischen 5,633 Std/m<sup>3</sup> und 6,170 Std/m<sup>3</sup>. Das Minimum wurde mit 5,314 Std/m<sup>3</sup> und das Maximum mit 6,452 Std/m<sup>3</sup> errechnet. Der Mittelwert liegt bei 5,910 Std/m<sup>3</sup> und die Standardabweichung kann mit 0,163 Std/m<sup>3</sup> angegeben werden. Weiters wird festgehalten, dass der Mittelwert mit einer Wahrscheinlichkeit von 51,5 % überschritten und ein Gesamt-Aufwandswert von 6,117 Std/m<sup>3</sup> mit 90%iger Wahrscheinlichkeit unterschritten wird.

### 8.5.3 Geräte- und Materialkosten

Zur Berechnung der Verteilungsfunktion der Geräte- und Materialkosten wurden die Grunddaten getrennt nach Bauteilgruppen für das Schalen, Bewehren und Betonieren erfasst und mit Dreiecksverteilungen belegt. In Bild 8–14 bis Bild 8–16 sind die Häufigkeitsverteilungen der Gerätekosten und in Bild 8–17 bis Bild 8–19 jene für die Materialkosten aufgelistet.



**Bild 8–14 Mittlere Gerätekosten – Schalung [€/m<sup>2</sup>] – Berechnungsmodus 5**



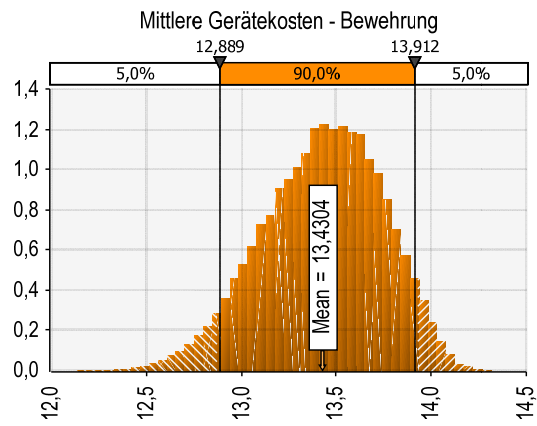


Bild 8–15 Mittlere Gerätekosten – Bewehrung [€/t] – Berechnungsmodus 5

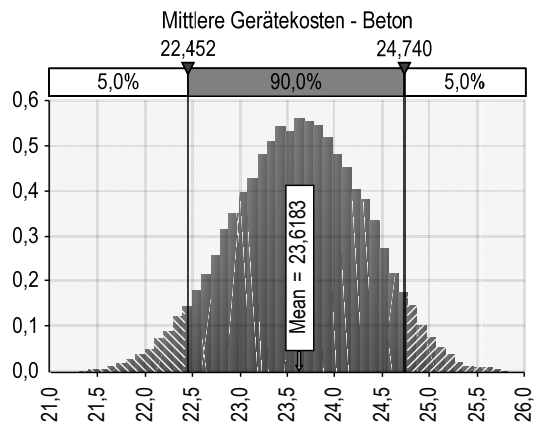


Bild 8–16 Mittlere Gerätekosten – Beton [€/m³] – Berechnungsmodus 5

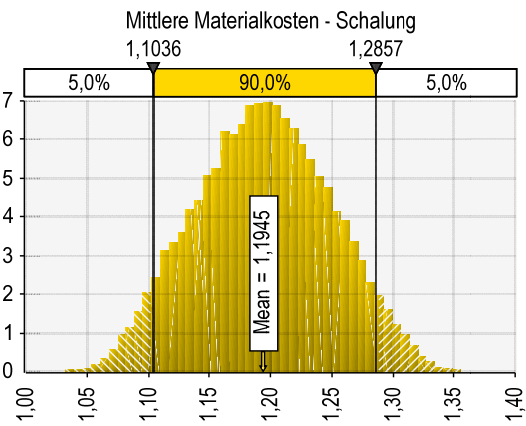


Bild 8–17 Mittlere Materialkosten – Schalung [€/m²] – Berechnungsmodus 5

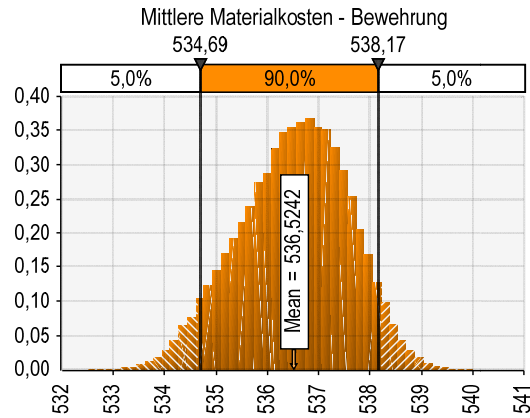


Bild 8–18 Mittlere Materialkosten – Bewehrung [€/t] – Berechnungsmodus 5

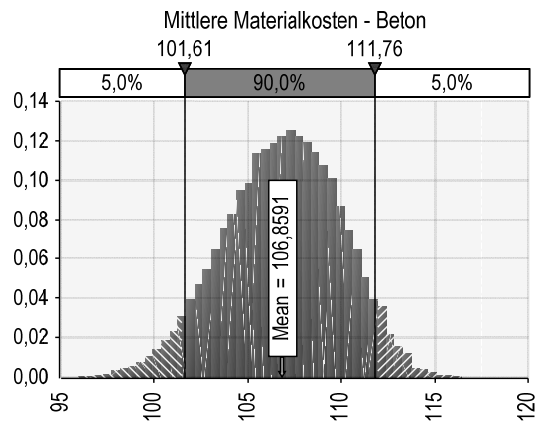
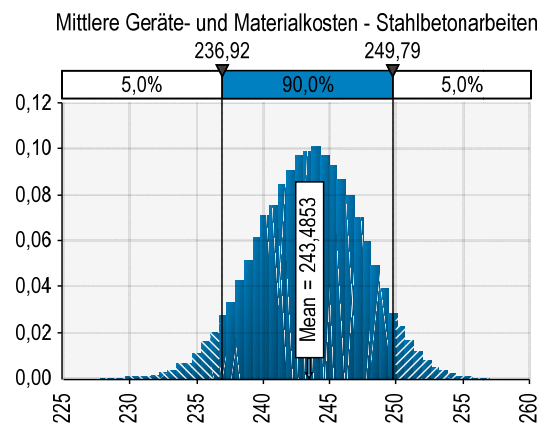


Bild 8–19 Mittlere Materialkosten – Beton [€/m³] – Berechnungsmodus 5

Durch das Aufaddieren der jeweiligen Geräte- und Materialkosten für die Anteile Schalung, Bewehrung und Beton, unter Berücksichtigung des Schalungs- und Bewehrungsgrades, werden die Geräte- und Materialkosten der Stahlbetonarbeiten  $k_{STB,MW}$  [€/m³] nach Glg. (3) errechnet. Die Verteilungsfunktion ist in Bild 8–20 grafisch dargestellt.



**Bild 8–20 Mittlere Geräte- und Materialkosten – Stahlbetonarbeiten [€/m³] – Berechnungsmodus 5**

Die mittleren Geräte- und Materialkosten der Stahlbetonarbeiten liegen damit mit 90%iger Wahrscheinlichkeit zwischen 236,92 €/m³ und 249,79 €/m³. Das Minimum wurde mit 227,76 €/m³ und das Maximum mit 257,01 €/m³ errechnet. Der Mittelwert liegt bei 243,49 €/m³ und die Standardabweichung kann mit 3,91 €/m³ angegeben werden. Weiters wird festgehalten, dass der Mittelwert mit einer Wahrscheinlichkeit von 50,9 % überschritten wird und Geräte- und Materialkosten von 248,45 €/m³ mit 90%iger Wahrscheinlichkeit unterschritten werden.

#### 8.5.4 Einzelkosten/Herstellkosten

Für die Ermittlung der Einzel- und Herstellkosten ist die Angabe der Mittellohnenkosten  $ML_{STB,MW}$  [€/Std], des Zuschlages für die Baustellengemeinkosten  $ZU_{BKG}$  [%] und des Kostenpuffers  $PU_{STB,K}$  [%] in Form von Verteilungsfunktionen erforderlich. Diese Werte werden als Dreiecksverteilungen mit den minimalen, erwarteten und maximalen Werten lt. Tabelle 8.24 angenommen, um eine Vergleichbarkeit mit den anderen Berechnungsmodi zu gewährleisten.

In Bild 8–21 ist die Wahrscheinlichkeitsverteilung der Einzelkosten der Stahlbetonarbeiten grafisch dargestellt. Das Histogramm ist trotz des Einflusses von teilweise sehr schiefen Verteilungen der Eingangsparameter nahezu symmetrisch. Es sei aber hier ausdrücklich darauf hingewiesen, dass sich bei anderer Annahme der Eingangswerte durchaus auch schiefere Verteilungen für die Einzelkosten ergeben können. Auf der Abszisse sind die Einzelkosten in Millionen € und auf die Ordinate die jeweilige Häufigkeit aufgetragen. Der Mittelwert beträgt 16.961.323,00 €. Dieser Wert wird jedoch mit 50,2%iger Wahrscheinlichkeit überschritten. Die minimalen Einzelkosten wurden mit rund 15.862.000 € und die maximalen Einzelkosten mit rund 16.961.000 € ermittelt. Mit 90%iger Wahrscheinlichkeit werden die Einzelkosten zwischen 16.458.000 € und 17.455.000 € liegen.

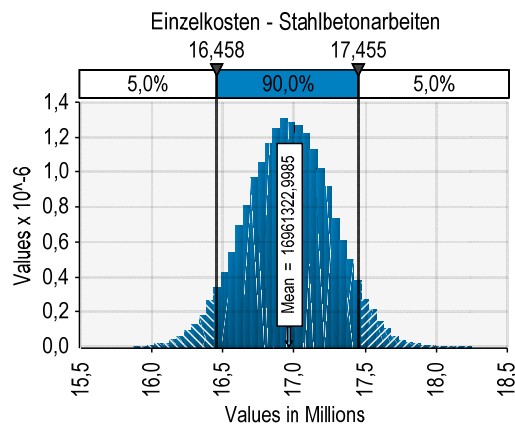


Bild 8–21 Einzelkosten der Stahlbetonarbeiten [€] – Berechnungsmodus 5

In Bild 8–22 wird die Verteilung der Herstellkosten, welche den Einzelkosten zuzüglich eines Zuschlages für die Baustellengemeinkosten entsprechen, dargestellt.

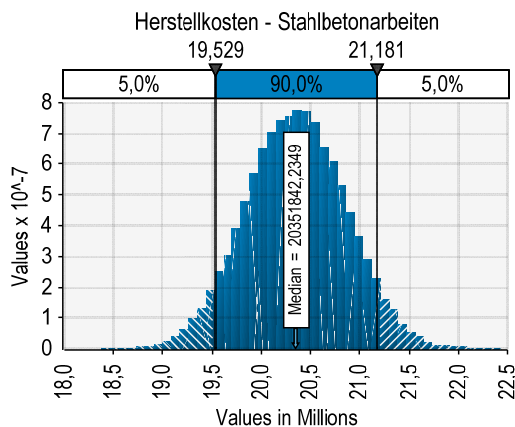
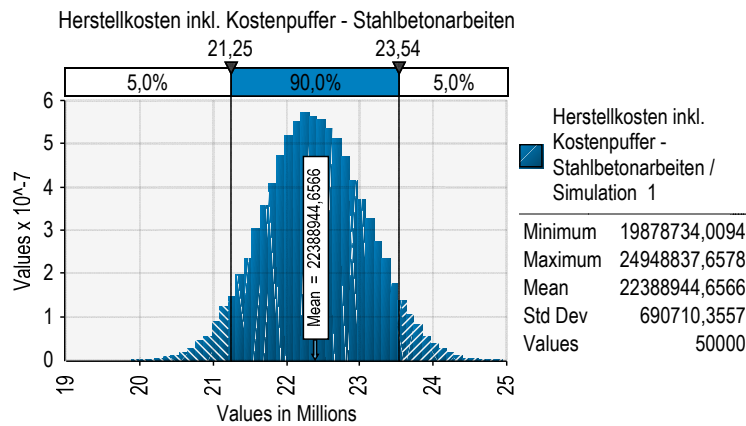


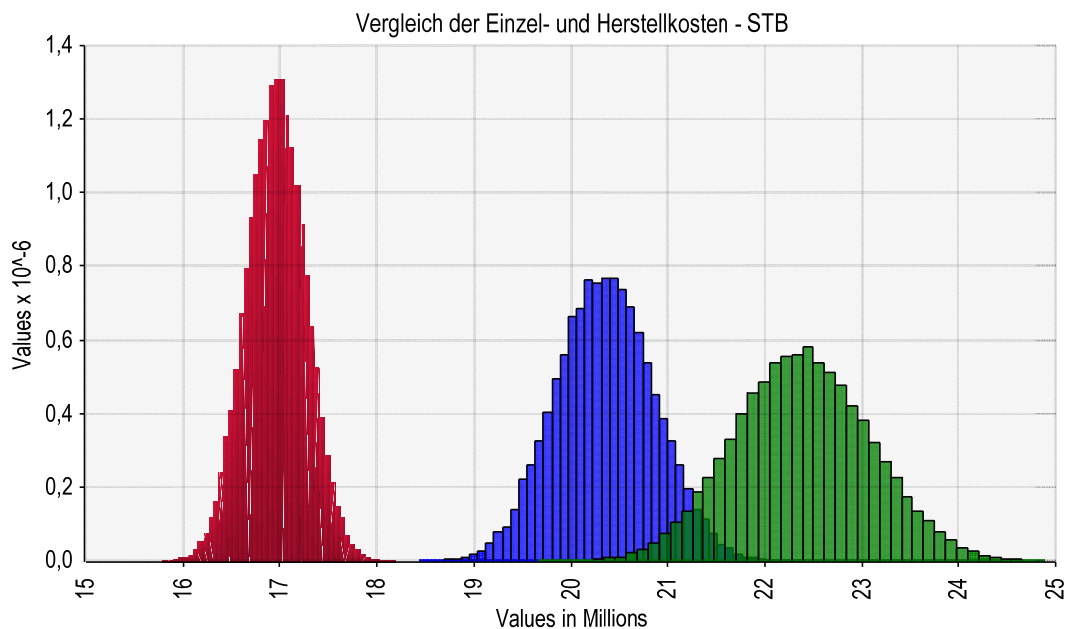
Bild 8–22 Herstellkosten der Stahlbetonarbeiten [€] – Berechnungsmodus 5

Bild 8–23 zeigt die Wahrscheinlichkeitsverteilung der Herstellkosten inkl. Kostenpuffer  $K_{STB,HK,PF}$  [€].



**Bild 8–23 Herstellkosten der Stahlbetonarbeiten inkl. Kostenpuffer [€] – Berechnungsmodus 5**

Vergleicht man Bild 8–21, Bild 8–22 und Bild 8–23 erkennt man keine große Veränderung der Verteilungsfunktionen. Man könnte annehmen, dass sich die Balken durch die Berücksichtigung der Zuschläge nur auf der Abszisse nach rechts verschoben hätten. Betrachtet man jedoch alle Verteilungsfunktionen in einer Grafik (siehe Bild 8–24) so wird deutlich, dass sich durch die Einbeziehung der Zuschläge auch die Streuung der einzelnen Histogramme ändert. Die Standardabweichung wird mit jedem Zuschlag breiter. Dies gibt einen Hinweis darauf, welchen Einfluss ein einzelner Parameter, wie etwa ein Puffer oder Zuschlag auf die gesamte Verteilung hat.



**Bild 8–24 Vergleich Einzelkosten (links), Herstellkosten (mittig) und Herstellkosten inkl. Puffer (rechts) für Stahlbetonarbeiten [€] – Berechnungsmodus 5**

Die angegebene Bandbreite für die Herstellkosten inkl. Puffer  $K_{STB, HK, PF}$  [€] weist zwischen dem Minimum und dem Maximum eine Differenz von ca. 5.070.000 € auf, dies entspricht einer Kostendifferenz von etwa 25,5 % bezogen auf den minimalen Wert. Die Differenz vom Mittelwert zum Minimalwert beträgt 11,2 % und zum Maximalwert 11,4 %. Die Differenz vom Mittelwert zum 5 % Quantil beträgt dagegen 5,09 % und zum 95 % Quantil 5,14 %.

Für diesen Berechnungsmodus weisen jene Werte, die innerhalb der zentralen 90 % Wahrscheinlichkeit liegen, eine Kostendifferenz von weniger als  $\pm 10$  % auf und entsprechen demnach der Stufe eines Kostenanschlages nach deutscher Judikatur (vgl. Bild 3–2). In Bild 8–26 sind die prozentualen Abweichungen vom erwarteten Wert grafisch dargestellt.

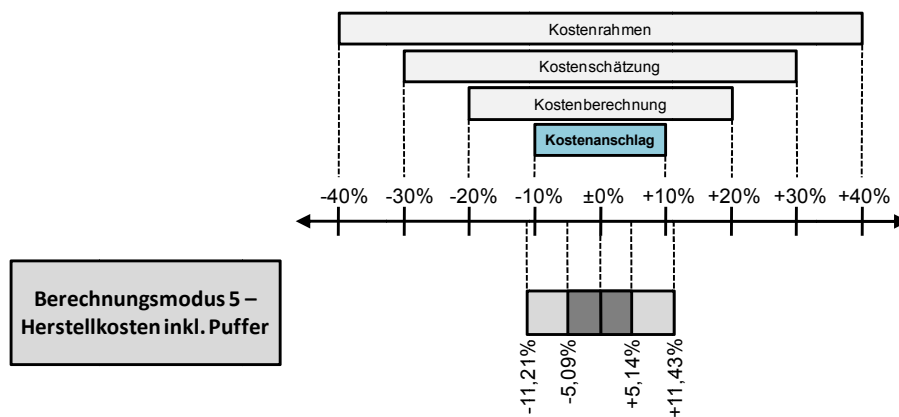


Bild 8–25 Prozentuale Bandbreite der Herstellkosten für die Stahlbetonarbeiten inkl. Kostenpuffer – Berechnungsmodus 5

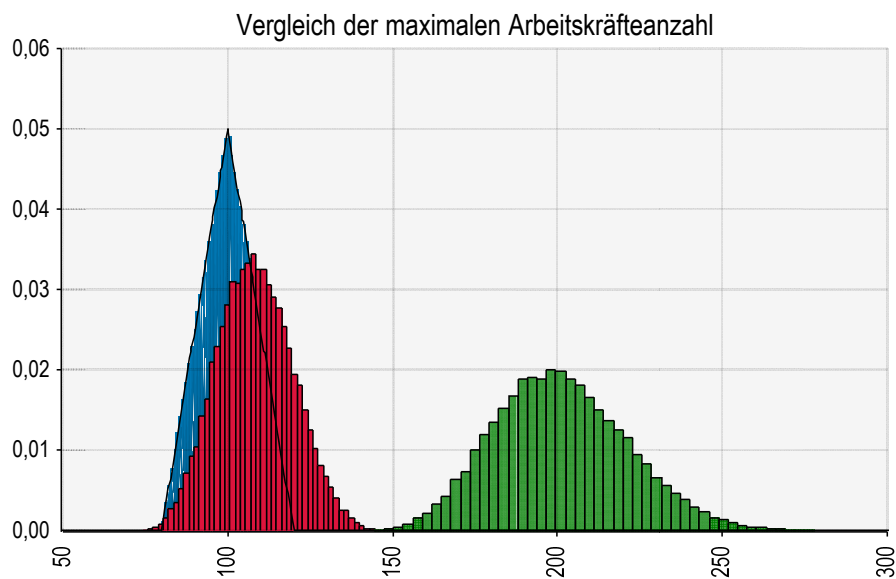
### 8.5.5 Maximale Arbeitskräfteanzahl

Die maximale Arbeitskräfteanzahl  $AK_{STB, max}$  [Std/h] kann, wie bei den Berechnungsmodi 1 bis 4, über die Anzahl der Krane  $ANZ_{K, AK}$  [Kran] und einen Proportionalitätsfaktor  $PF_{K, AK}$  [AK/Kran] oder über die bearbeitbare Arbeitsfläche  $AF_{bearbeitbar}$  [m<sup>2</sup>] und die Mindestarbeitsfläche je Arbeitskraft  $AF_{MIN}$  [m<sup>2</sup>/AK] errechnet werden. Aus diesen Werten wird dann eine Verteilung für die Anzahl der Arbeitskräfte gewählt, mit der die weiteren Berechnungen durchgeführt werden.

In Bild 8–26 sind sowohl die errechneten als auch die gewählten Werte der maximalen Arbeitskräfteanzahl wie folgt eingetragen:

- Berechnet über Krananzahl und Proportionalitätsfaktor - in roter Farbe
  - ♦ Minimum: 74,7 AK
  - ♦ Mittelwert: 108,3 AK
  - ♦ Maximum: 147,8 AK

- Berechnet über bearbeitbare Arbeitsfläche und Mindestarbeitsfläche – in grüner Farbe
  - ♦ Minimum: 142,5 AK
  - ♦ Mittelwert: 200,9 AK
  - ♦ Maximum: 276,1 AK
- Gewählte, maximale Anzahl an Arbeitskräften – in blauer Farbe
  - ♦ Minimum: 80,0 AK
  - ♦ Mittelwert: 100,0 AK
  - ♦ Maximum: 120,0 AK



**Bild 8–26 Vergleich der maximalen Arbeitskräfteanzahlen [Std/h] – Berechnungsmodus 5**

Die gewählte Dreiecksverteilung orientiert sich bewusst an der unteren Grenze der errechneten Werte, da die Anzahl der Krane bestimmend für die Arbeitskräfteanzahl ist. Mit dieser Verteilung wird in weiterer Folge die Dauer für die Stahlbetonarbeiten  $D_{STB}$  [d] ermittelt.

Das Histogramm der mittleren Arbeitskräfteanzahl  $AK_{STB,MW}$  [Std/h], welches sich aus der Verteilung der maximalen Arbeitskräfteanzahl  $AK_{STB,max}$  [Std/h] und dem Arbeitskräfteverhältnis  $f_{AK}$  [-] nach Glg. (25) errechnet, ist in Bild 8–27 ersichtlich.

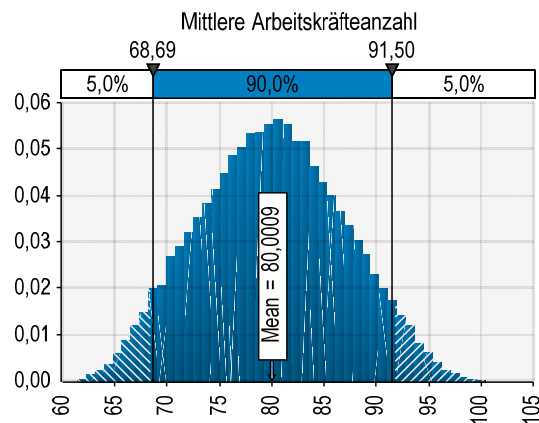


Bild 8–27 Mittlere Arbeitskräfteanzahl [Std/h] – Berechnungsmodus 5

### 8.5.6 Stahlbetonleistung

Als Berechnungsvorschrift für die Simulation der mittleren Stahlbetonleistung dient die Glg. (21). Für die tägliche Arbeitszeit wird eine Dreiecksverteilung mit einem Minimalwert von 8,00 h/d, einem erwartetem Wert von 9,00 h/d und einem Maximalwert von 10,00 h/d angesetzt.

Die Wahrscheinlichkeitsverteilung der Stahlbetonleistung  $L_{STB,MW}$  [m<sup>3</sup>/d] ist nachstehender Abbildung zu entnehmen.

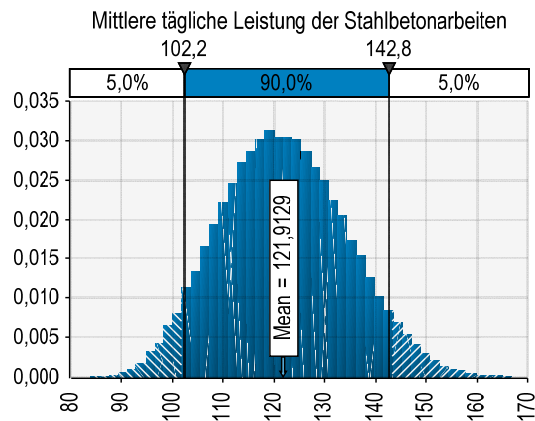
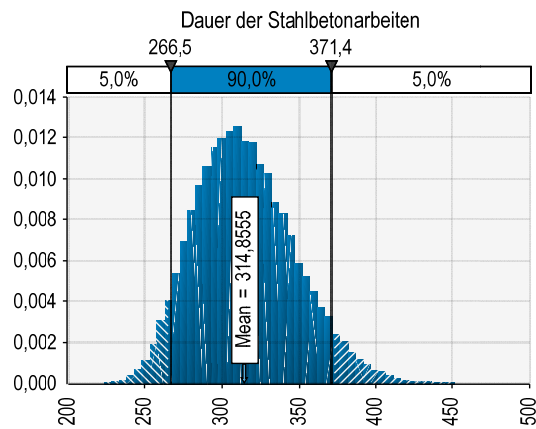


Bild 8–28 Mittlere tägliche Leistung der Stahlbetonarbeiten [m<sup>3</sup>/d] – Berechnungsmodus 5

### 8.5.7 Dauer der Stahlbetonarbeiten

Die Dauer der Stahlbetonarbeiten  $D_{STB}$  [d] errechnet sich nach Glg. (19). Die Ergebnisse sind in Bild 8–29 dargestellt.

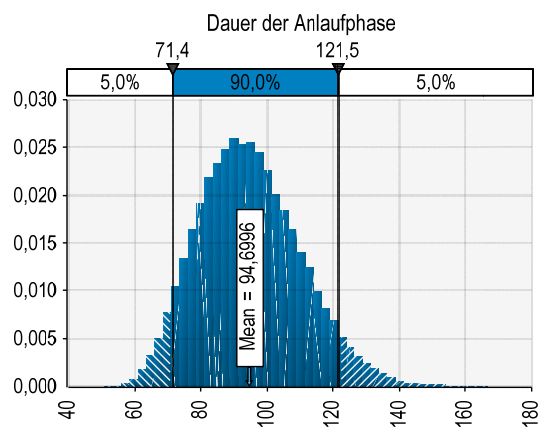




**Bild 8–29 Dauer der Stahlbetonarbeiten [d] – Berechnungsmodus 5**

Die Dauer der Stahlbetonarbeiten ohne Puffer liegt damit mit 90%iger Wahrscheinlichkeit zwischen 266,5 d und 371,4 d. Das Minimum wurde mit 223 d und das Maximum mit 451 d errechnet. Der Mittelwert liegt bei 314,9 d und die Standardabweichung kann mit 31,93 d angegeben werden. Weiters wird festgehalten, dass der Mittelwert mit einer Wahrscheinlichkeit von 47,1 % überschritten und eine Dauer der Stahlbetonarbeiten von 358,1 d mit 90%iger Wahrscheinlichkeit unterschritten wird.

Die Wahrscheinlichkeitsverteilungen für die Anlauf-, Hauptbau- und Auslaufphase werden entsprechend den Glg. (26) bis (29) mit jeweils 50.000 Iterationen errechnet. Weiters wird ein Zeitpuffer, in Form einer Dreiecksverteilung eingerechnet, der die Dauer der Stahlbetonarbeiten erhöht. Bild 8–30 bis Bild 8–33 zeigen die ermittelten Verteilungen.



**Bild 8–30 Dauer der Anlaufphase [d] – Berechnungsmodus 5**

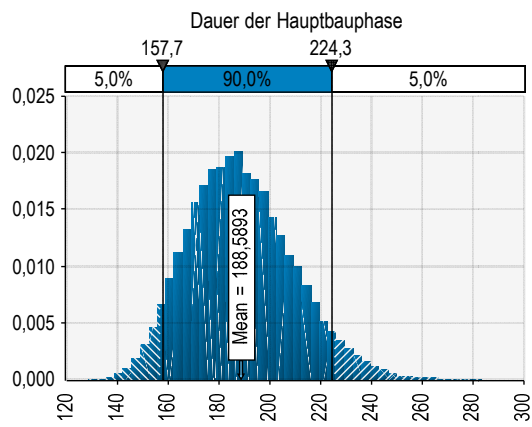


Bild 8–31 Dauer der Hauptbauphase [d] – Berechnungsmodus 5

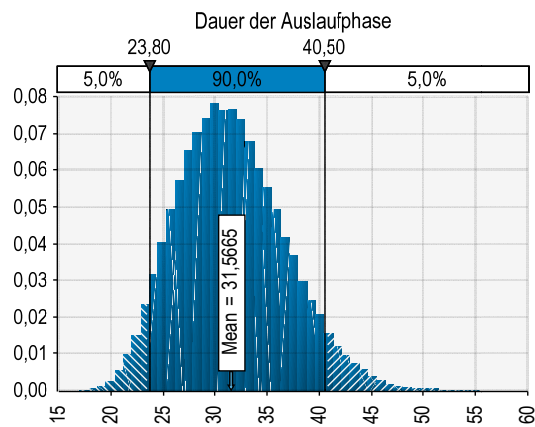


Bild 8–32 Dauer der Auslaufphase [d] – Berechnungsmodus 5

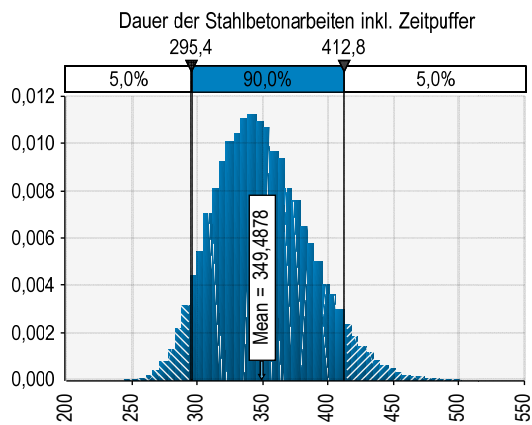


Bild 8–33 Dauer der Stahlbetonarbeiten inkl. Zeitpuffer [d] – Berechnungsmodus 5

Stellt man die Dauern mit (rot) und ohne Zeitpuffer (blau) in einem Diagramm (siehe Bild 8–34) dar, ist ersichtlich, dass sich die Streuung nach Einbeziehung des Puffers vergrößert.

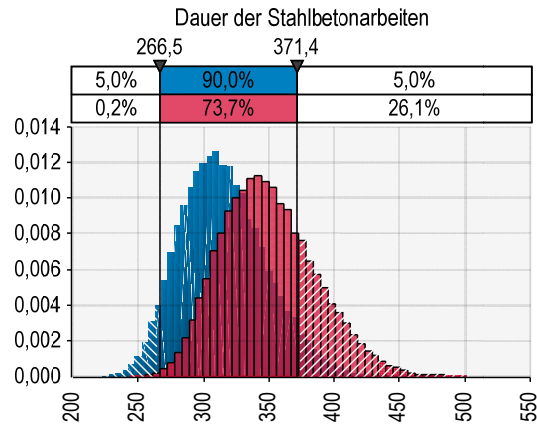


Bild 8–34 Vergleich der Dauern für Stahlbetonarbeiten [d] – Berechnungsmodus 5

### 8.5.8 Anzahl der Transporte

Die Anzahl der Transporte ist einerseits von den Mengen und andererseits von den zugehörigen Transportgraden abhängig. Die Mengen werden aus den errechneten Verteilungsfunktionen für die Schalungsfläche, Bewehrungsmenge und Betonmenge herangezogen (siehe Bild 8–5 bis Bild 8–7). Für die Transportgrade werden Dreiecksverteilungen, entsprechend der Ansätze im Berechnungsmodus 2 (siehe Tabelle 8.38), angesetzt.

Die Ergebnisse der durchgeführten 50.000 Iterationen sind in den nachstehenden Grafiken getrennt für Schalung, Bewehrung und Beton sowie für die Gesamtanzahl der Transporte ersichtlich.

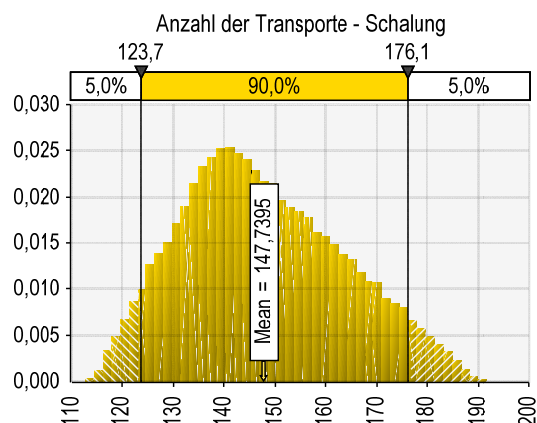


Bild 8–35 Anzahl der Transporte für Schalung [TR] – Berechnungsmodus 5

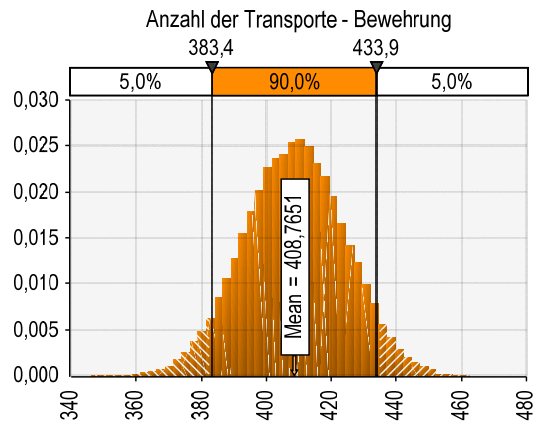


Bild 8–36 Anzahl der Transporte für Bewehrung [TR] – Berechnungsmodus 5

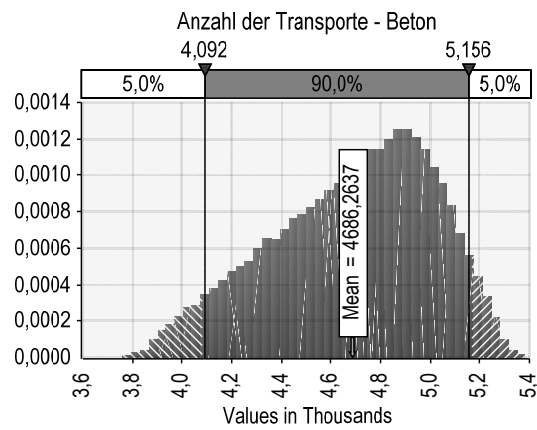


Bild 8–37 Anzahl der Transporte für Beton [TR] – Berechnungsmodus 5

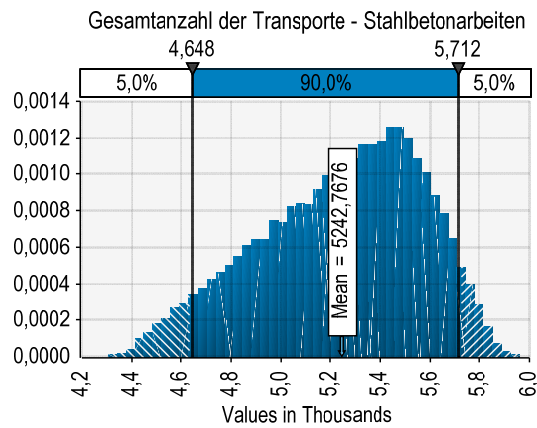
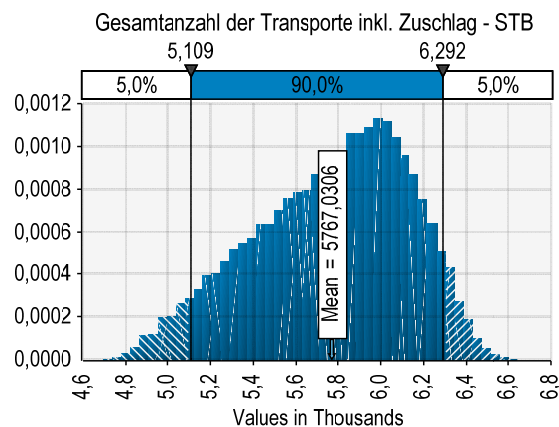


Bild 8–38 Gesamtanzahl der Transporte [TR] – Berechnungsmodus 5

Die Wahrscheinlichkeitsverteilung für die Gesamtanzahl der Transporte weist, wie die Verteilung für die Anzahl der Betontransporte, eine deutliche Linksschiefe auf. Dies deutet darauf hin, dass die Betontransporte den größten Anteil an der Gesamt-Transportanzahl haben.

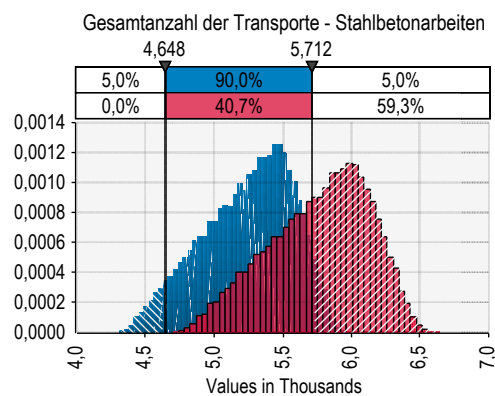
Durch die Einrechnung eines Zuschlages  $ZU_{TR,STB}$  [%] für die Gesamtanzahl der Transporte, in Form einer Dreiecksverteilung, werden unvorhergesehene Ereignisse, Fehler, Ungenauigkeiten etc. berücksichtigt. Die Wahrscheinlichkeitsverteilung für die Gesamtanzahl der Transporte inkl. Zuschlag  $ANZ_{TR,STB,ZU}$  [TR] ist in nachstehender Abbildung dargestellt.



**Bild 8–39 Gesamtanzahl der Transporte inkl. Zuschlag [TR] – Berechnungsmodus 5**

Die Anzahl der Transporte inkl. Zuschlag liegt damit mit 90%iger Wahrscheinlichkeit zwischen 5.109 TR und 6.292 TR. Das Minimum wurde mit 4.698 TR und das Maximum mit 6.641 TR errechnet. Der Mittelwert liegt bei 5.767 TR und die Standardabweichung kann mit 361,19 TR angegeben werden. Weiters wird festgehalten, dass der Mittelwert mit einer Wahrscheinlichkeit von 54,3 % überschritten und eine Gesamtanzahl der Transporte inkl. Zuschlag von 6.209 TR mit 90%iger Wahrscheinlichkeit unterschritten wird.

Ein Vergleich der Gesamtanzahl an Transporten mit (rot) und ohne Zuschlag (blau) ist in Bild 8–40 dargestellt. Auch hier ist eine Vergrößerung der Streuung durch die Einbeziehung des Zuschlages erkennbar.



**Bild 8–40 Vergleich der Anzahl an Transporten [TR] – Berechnungsmodus 5**

## 9 Gegenüberstellung der Ergebnisse aus dem Berechnungsbeispiel

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der 5 durchgeführten Berechnungsmodi einander gegenübergestellt und analysiert.

Weiters wird untersucht, welche Auswirkungen der Einsatz von PERT- im Vergleich zu Dreiecksverteilungen im Zuge der Monte-Carlo Simulation mit sich bringt.

### 9.1 Gesamt-Aufwandswert

Aufwandswerte bilden eine der wichtigsten Kenngrößen für arbeitsintensive Tätigkeiten und somit auch für die untersuchten Stahlbetonarbeiten. Die möglichst exakte Berechnung des Gesamt-Aufwandswertes für die Stahlbetonarbeiten  $AW_{STB}$  [Std/m<sup>3</sup>] ist essenziell, da dieser Wert auch in die Berechnung der Kosten und Bauzeit einfließt. In Bild 9–1 ist ein Vergleich der errechneten Aufwandswerte je Berechnungsmodus dargestellt.

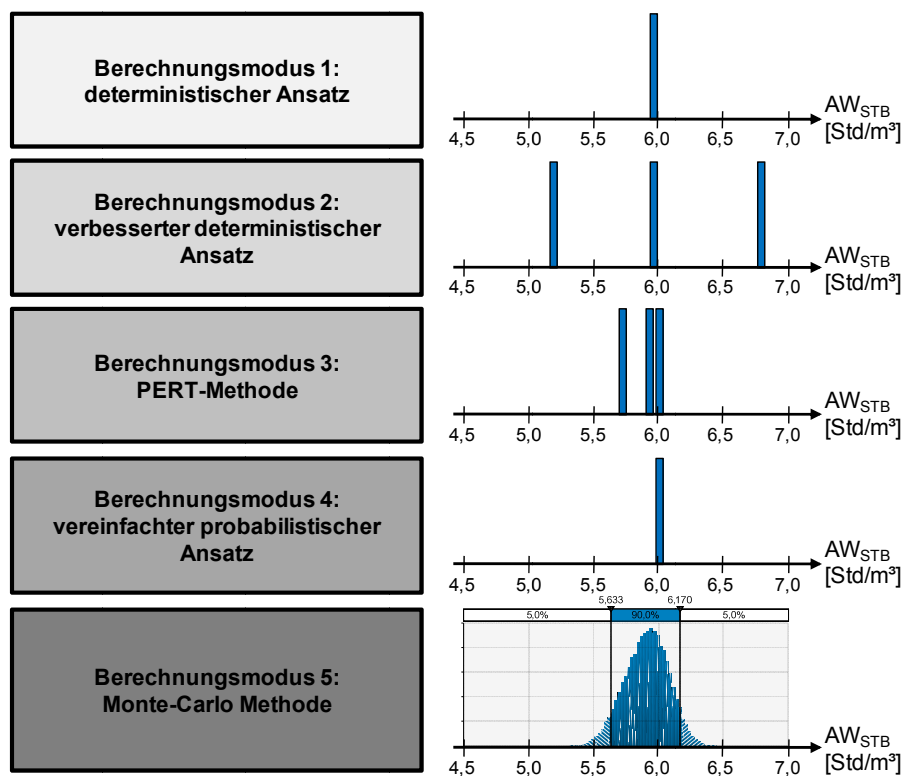


Bild 9–1 Vergleich der 5 Berechnungsmodi – Gesamt-Aufwandswert

Berechnungsmodus 1 liefert nur ein Ergebnis für den Gesamt-Aufwandswert. Es handelt sich dabei lediglich um ein mögliches Szenario, das aber innerhalb des zentralen 90 % Wahrscheinlichkeitsbereiches der Verteilungsfunktion nach Berechnungsmodus 5 liegt. Die Bandbreite nach dem verbesserten deterministischen Ansatz ist im Vergleich zu den anderen Ergebnissen größer und liefert demnach eine unrealistische Darstellung des Gesamt-Aufwandswertes. Der minimale und maximale Aufwandswert nach Berechnungsmodus 2

ergibt sich aus den Extremwerten aller Eingangswerte und ist somit extrem unwahrscheinlich. Daher treten diese Werte auch bei 50.000 Iterationen mit der MC-Methode nicht auf.

Die PERT-Methode liefert im Gegensatz dazu eine engere Bandbreite der Ergebnisse. Alle 3 Werte liegen innerhalb der zentralen 90 % der Wahrscheinlichkeitsverteilung nach Berechnungsmodus 5. Diese Methode bildet somit für dieses Beispiel eine sehr gute Annäherung an die Ergebnisse der MC-Methode. Allerdings ist zu beachten, dass bei sehr schiefen Verteilungen diese Übereinstimmung nicht zwingend zutreffen muss. Berechnungsmodus 4 liefert einen Wert, der mit 6,073 Std/m<sup>3</sup> im Vergleich zur MC-Methode oberhalb des Medians (= 5,916 Std/m<sup>3</sup>) liegt und somit eine Unterschreitungswahrscheinlichkeit > 50 % hat. Eine weitere Verbesserung des vereinfachten probabilistischen Ansatzes wäre durch die Bildung von optimistischen und pessimistischen Werten möglich. Der dadurch zusätzlich entstehende Aufwand, für die Eingabe in ein Softwareprogramm (z.B. MS-Excel) wäre dann aber so groß, dass mit ähnlichem Aufwand auch eine MC-Simulation durchgeführt werden könnte. Weiters wäre mit dieser Verbesserungsmaßnahme, wie bei Berechnungsmodus 1 bis 3, aber trotzdem keine Aussage über die Wahrscheinlichkeit, mit der ein Wert eintritt, möglich. Erst durch die Verteilungsfunktion aus der MC-Simulation kann festgestellt werden, ob die errechneten Werte aus den anderen Berechnungsmodi z.B. sehr hoch, sehr niedrig oder im Bereich des Mittelwertes liegen.

Die exakten Ergebnisse für den Gesamt-Aufwandswert sind in Tabelle 9.1 (für die MC-Methode repräsentativ das 5 % Quantil, der Mittelwert und das 95 % Quantil) gegenübergestellt.

Tabelle 9.1 Vergleich des Gesamt-Aufwandswertes für Berechnungsmodus 1 bis 5

Gesamt Aufwandswert $AW_{STB}$ [Std/m <sup>3</sup> ]	Berechnungsmodus	Bezeichnung	Anzahl der errechneten Werte	minimalster/optimistischer Wert	erwarteter/mittlerer Wert	maximalster/pessimistischer Wert
	1	deterministisch	1	-	5,996	-
	2	verbessert deterministisch	3	5,029	5,996	6,726
	3	PERT	3	5,790	5,953	6,074
	4	vereinfacht probabilistisch	1	-	6,073	-
				<b>5 % Quantil</b>	<b>Mittelwert</b>	<b>95 % Quantil</b>
5	Monte-Carlo	50.000	5,633	5,911	6,170	

## 9.2 Kosten

Bei Bauprojekten liegt, wie bei allen Wirtschaftsprozessen, das Hauptaugenmerk auf den Kosten. Für AG, Investoren etc. stellen die verursachten Kosten ein – wenn nicht das – Hauptkriterium für eine Investitionsentscheidung dar. Mit einer aussagekräftigen Kostenprognose kann das Projektbudget gesichert festgelegt werden. AN hingegen führen für die Ausführung einer geschuldeten Leistung Kalkulationen, zur Ermittlung der entstehenden Kosten durch. Sie müssen ihre Produktionsfaktoren möglichst kostensparend und ressourcenschonend einsetzen, um im Konkurrenzkampf mit anderen Marktteilnehmern bestehen zu können. Durch eine vorzeitige, verursachungsgerechte Kostenermittlung wissen die AN

welches Risiko sie, bei sehr niedrig angesetzten Angebotspreisen für den Erhalt eines Auftrages, eingehen.

Letztlich müssen die jeweiligen Entscheidungsträger auf Basis ihrer Risikopolitik die notwendigen Entschlüsse treffen. Mit Bandbreiten bzw. Zahlenwerten, die mit Wahrscheinlichkeiten belegt sind, ist dies wesentlich leichter durchzuführen als mit einem deterministisch errechneten Kostenwert. Getroffene Entscheidungen können auf Basis solcher Werte auch entsprechend besser verteidigt und begründet werden.

Die nachstehende Grafik zeigt den Vergleich der errechneten Einzelkosten für die Berechnungsmodi 1 bis 5. Es wurden bewusst die Einzelkosten, ohne Gesamtzuschlag oder Kostenpuffer, gewählt, da sich die Streuung der Ergebnisse durch die Einbeziehung dieser Werte stark erhöhen würde (siehe dazu auch Bild 8–24).

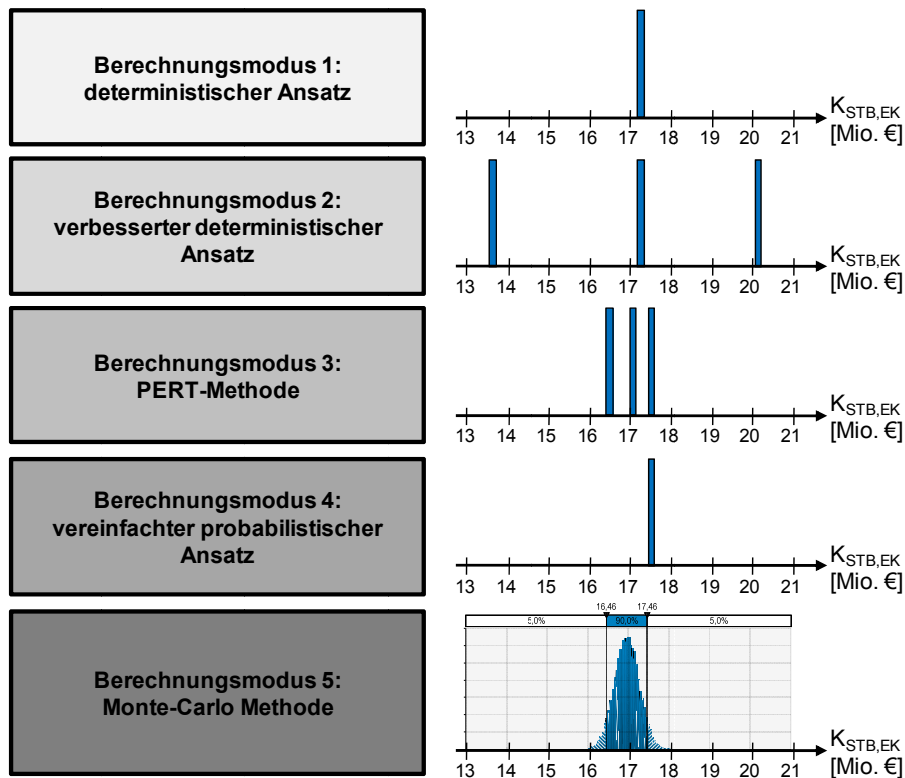


Bild 9–2 Vergleich der 5 Berechnungsmodi - Einzelkosten

Berechnungsmodus 1 liefert nur ein Ergebnis für die Einzelkosten der Stahlbetonarbeiten. Es handelt sich dabei um ein mögliches Szenario, das gerade noch innerhalb des zentralen 90 % Wahrscheinlichkeitsbereiches der Verteilungsfunktion nach Berechnungsmodus 5 liegt. Die Bandbreite nach dem verbesserten deterministischen Ansatz ist im Vergleich zu den anderen Ergebnissen größer und liefert demnach eine unrealistische Darstellung der Einzelkosten. Ein direkter Vergleich mit den Ergebnissen der MC-Methode zeigt, dass der Berechnungsmodus 2 eine, um mehr als die 3-fache größere Bandbreite liefert. Die minimalen und maximalen Einzelkosten nach Berechnungsmodus 2 ergeben sich aus den Extremwerten aller Eingangswerte und sind somit sehr unwahrscheinlich. Dies ist auch der



Grund, weswegen diese Werte auch bei 50.000 Iterationen mit der MC-Methode nicht einmal annähernd auftreten.

Die PERT-Methode liefert im Gegensatz dazu eine engere Bandbreite der Ergebnisse, die jenen der MC-Methode sehr nahe kommen. Alle 3 Werte liegen innerhalb der zentralen 90 % der Wahrscheinlichkeitsverteilung nach Berechnungsmodus 5.

Berechnungsmodus 4 liefert einen Wert, der mit rund 17,584 Mio. € im Vergleich zur MC-Methode oberhalb des 95 % Quantils liegt und somit eine Unterschreitungswahrscheinlichkeit  $> 95 \%$  hat. Damit liegt diese Kostenberechnung bereits in einem sehr sicheren Bereich. Eine weitere Verbesserung des vereinfachten probabilistischen Ansatzes wäre durch die Bildung von optimistischen und pessimistischen Werten möglich. Mit dieser Verbesserungsmaßnahme könnte jedoch noch immer keine Aussage über die Wahrscheinlichkeit, mit der ein Wert eintritt, getroffen werden. Erst durch die Verteilungsfunktion aus der MC-Simulation kann festgestellt werden, ob die errechneten Kosten aus den anderen Berechnungsmodi z.B. sehr hoch, sehr niedrig oder im Bereich des Mittelwertes liegen.

Bei der Ermittlung der Kosten wurden je nach Berechnungsmodus unterschiedlich viele Informationen in die Berechnung einbezogen. Damit hat jede Methode seine Berechtigung, entsprechend dem jeweiligen Informationsstand im Verlauf des Projekts. Allerdings sollte auch bei geringen verfügbaren Informationen zumindest auf die ‚PERT-Methode‘ zurückgegriffen werden, da damit eine realistische Bandbreite der Kosten angegeben werden kann (im Gegensatz zu Berechnungsmodus 2).

Obwohl die Eingangswerte von Berechnungsmodus 2 und 3 die gleichen sind, erhält man bei der PERT-Methode eine engere Bandbreite für die Kosten, da davon ausgegangen wird, dass die minimalen und maximalen Werte nicht eintreten werden. So fließen bei dieser Methode, auch bei der optimistischen (bzw. pessimistischen) Betrachtung, die minimalen (bzw. maximalen) Eingangsparameter nur zu einem gewissen Anteil ein (siehe Glg. (46) bis Glg. (48)).

Die vereinfachte probabilistische Methode (Berechnungsmodus 4) verfügt über die größte Anzahl an Eingangsdaten neben der Monte-Carlo Methode. Allerdings wird bei dieser Methode nur ein Ausgangswert geliefert. Dieser stellt zwar den subjektiv wahrscheinlichsten dar, gibt aber keine Auskunft darüber in welcher Bandbreite sich dieser Wert befindet.

Bei der Monte-Carlo Methode werden die gleichen Bandbreiten der Eingangsparameter wie bei den Berechnungsmodi 2, 3 und 4 verwendet. Es handelt sich dabei um minimale, erwartete und maximale Werte. Zusätzlich wird für jeden Parameter eine Verteilungsfunktion angegeben, dies entspricht vom Informationsgehalt in etwa den jeweiligen Eintrittswahrscheinlichkeiten des Berechnungsmodus 4. Bei dieser Methode können aber, da sie mit Hilfe eines Computerprogrammes (im gegenständlichen Fall @Risk) berechnet wird, per Knopfdruck eine Vielzahl an Ergebnissen berechnet werden. Somit erhält man nicht nur eine Bandbreite an Ergebnissen, sondern auch eine Verteilungsdichtefunktion dieser. Es kann in weiterer Folge angegeben werden, mit welcher Wahrscheinlichkeit ein gewisser Wert eintreten wird.

In Tabelle 9.2 sind die errechneten Einzelkosten für jeden Berechnungsmodus (für die MC-Methode repräsentativ das 5 % Quantil, der Mittelwert und das 95 % Quantil) angeführt.

Tabelle 9.2 Vergleich der Einzelkosten für Berechnungsmodus 1 bis 5

Einzelkosten der Stahlbetonarbeiten $K_{STB, EK}$ [€]	Berechnungsmodus	Bezeichnung	Anzahl der errechneten Werte	minimalster/optimistischer Wert	erwarteter/mittlerer Wert	maximalster/pessimistischer Wert
	1	deterministisch	1	-	€ 17.223.858,50	-
	2	verbessert deterministisch	3	€ 13.865.689,25	€ 17.223.858,50	€ 20.113.557,50
	3	PERT	3	€ 16.509.205,94	€ 17.092.699,47	€ 17.553.753,50
	4	vereinfacht probabilistisch	1	-	€ 17.583.926,72	-
				<b>5 % Quantil</b>	<b>Mittelwert</b>	<b>95 % Quantil</b>
5	Monte-Carlo	50.000	€ 16.458.000,00	€ 16.961.323,00	€ 17.455.000,00	

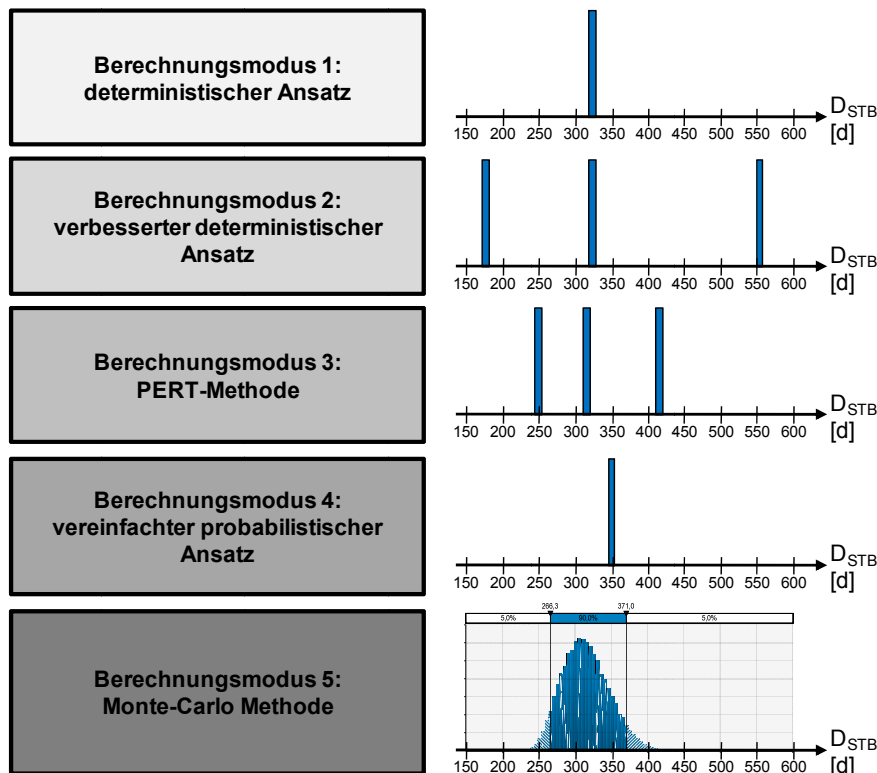
### 9.3 Dauer der Stahlbetonarbeiten

Neben den Baukosten ist auch die Kenntnis über die Bauzeit von Interesse, sowohl für den AG, für den die Bauzeit direkt mit der späteren Nutzung in Zusammenhang steht (kurze Bauzeit bedeutet, dass eine frühere Nutzung möglich ist), als auch für den AN, der an einem möglichst kontinuierlichen Einsatz seiner Arbeitskräfte und Geräte interessiert ist. Dabei sollte der AG weder zu kurze, noch zu lange Bauzeiten vorgeben. Eine zu kurze Bauzeit verursacht Produktivitätsverluste und führt so zu erhöhten Kosten und Risiken, dass die vorgegebene Zeit nicht eingehalten wird. Zu lange Bauzeiten führen u.a. zur Erhöhung der zeitgebundenen Baustellengemeinkosten und sind damit auch nicht zielführend.<sup>219</sup>

Die genauen Zusammenhänge zwischen der Bauzeit und den Baukosten sind noch nicht restlos geklärt und erfordern weitere Betrachtungen und intensive Analysen ausgeführter Projekte.

In Bild 9–3 werden die errechneten Dauern der Stahlbetonarbeiten (ohne Zeitpuffer) für die Berechnungsmodi 1 bis 5 miteinander verglichen.

<sup>219</sup> Vgl. HOFSTADLER, C.: Berechnung der Bauzeit - Systematischer Umgang mit Projektunsicherheiten. In: Netzwerk Bau Fachzeitschrift für Baumanagement und Bauwirtschaft - Wissen & Visionen - Chancen zur erfolgreichen Projektentwicklung erkennen und umsetzen - Fachsymposium 10 Jahre Netzwerk Bau - Tagungsband 11/2011. S. 49



**Bild 9–3 Vergleich der 5 Berechnungsmodi – Dauer der Stahlbetonarbeiten**

Die durch den Berechnungsmodus 1 erhaltene Dauer der Stahlbetonarbeiten liegt innerhalb der zentralen 90 % Wahrscheinlichkeit laut dem Ergebnis der MC-Simulation und um ca. 4 d über dem errechneten Mittelwert. Die Bandbreite, die im Berechnungsmodus 2 errechnet wurde, beschreibt eine sehr weite Streuung, zwischen 178 d und 554 d. Dies entspricht einer Differenz von 376 d (also über einem Jahr) oder rund 211 %. Die Aussagekraft, einer solch weiten Bandbreite ist äußerst gering und damit weder für den AG noch für den AN in irgend einer Projektphase zufriedenstellend. Zu beachten ist allerdings, dass bei dieser Betrachtung jeweils alle optimistischen bzw. pessimistischen Eingangswerte in die Berechnungen eingeflossen sind. Eine Umstand, der in der Praxis mit nahezu 100%iger Wahrscheinlichkeit nicht eintreffen wird.

Eine schmalere Bandbreite der Dauer für die Stahlbetonarbeiten liefert die PERT-Methode, obwohl dabei die gleichen Eingangswerte wie bei Berechnungsmodus 2 verwendet wurden. Die Dauern liegen aber, verglichen mit Berechnungsmodus 5, unterhalb des 5 % und oberhalb des 95 % Quantils.

Der vereinfachte probabilistische Ansatz liefert ein Ergebnis für die Dauer, das, vergleicht man es mit der Verteilungsfunktion der MC-Methode, zwischen dem errechneten Mittelwert und dem 95 % Quantil liegt. Die Unterschreitungswahrscheinlichkeit für die errechnete Dauer laut Berechnungsmodus 4 beläuft sich auf ca. 83,5 % entsprechend der Verteilungsfunktion der MC-Simulation.

Auch für die Dauer der Stahlbetonarbeiten kann festgehalten werden, dass eine Aussage über Eintrittswahrscheinlichkeiten bzw. gesicherte Bandbreiten nur mit der MC-Methode

gemacht werden kann. Alle anderen Berechnungsmodi liefern Ergebnisse, die nur für sich stehen, aber keine Einschätzung des Risikopotenzials zulassen.

In Tabelle 9.3 sind die errechneten Dauern der Stahlbetonarbeiten für jeden Berechnungsmodus (für die MC-Methode repräsentativ das 5 % Quantil, der Mittelwert und das 95 % Quantil) angeführt.

**Tabelle 9.3 Vergleich der Dauern der Stahlbetonarbeiten für Berechnungsmodus 1 bis 5**

Dauer der Stahlbetonarbeiten $D_{StB}$ [d]	Berechnungsmodus	Bezeichnung	Anzahl der errechneten Werte	minimalster/optimistischer Wert	erwarteter/mittlerer Wert	maximalster/pessimistischer Wert
	1	deterministisch	1	-	318,8	-
	2	verbessert deterministisch	3	178,3	318,8	554,2
	3	PERT	3	246,1	315,3	416,3
	4	vereinfacht probabilistisch	1	-	346,6	-
				<b>5 % Quantil</b>	<b>Mittelwert</b>	<b>95 % Quantil</b>
5	Monte-Carlo	50.000	266,5	314,9	371,4	

#### 9.4 Anzahl der Transporte

Ein wesentlicher Baustein für die Logistikplanung ist die Kenntnis über die Anzahl der Transporte, die die Baustelle mit Materialien und Geräten versorgen. Vor allem bei innerstädtischen Bauvorhaben müssen die Transporte in das vorherrschende Verkehrskonzept und die Verkehrslage eingebunden werden. Im Zuge der Stahlbetonarbeiten machen, bei Verwendung von Lieferbeton, die Betontransporte den Hauptanteil der Gesamttransportanzahl aus. Die Anzahl der Transporte kann relativ leicht durch die jeweiligen Mengen und Transportgrade abgeschätzt werden. Je genauer diese Daten vorliegen, desto näher werden die Berechnungsergebnisse bei den tatsächlichen Werten liegen.

In Bild 9–4 werden die errechneten Anzahlen der Transporte (ohne Zuschlag) für die Berechnungsmodi 1 bis 5 miteinander verglichen.

Berechnungsmodus 1 liefert nur ein Ergebnis für den Gesamt-Transportanzahl der Stahlbetonarbeiten. Es handelt sich dabei lediglich um ein mögliches Szenario, das aber innerhalb des zentralen 90 % Wahrscheinlichkeitsbereiches und über dem Modalwert (= 5.436 TR) der Verteilungsfunktion nach Berechnungsmodus 5 liegt. Die Bandbreite nach dem verbesserten deterministischen Ansatz ist im Vergleich zu den anderen Ergebnissen größer und liefert demnach eine unrealistische Darstellung der Gesamt-Transportanzahl. Die minimale und maximale Anzahl nach Berechnungsmodus 2 ergibt sich aus den Extremwerten aller Eingangswerte und ist somit äußerst unwahrscheinlich. Daher treten diese Werte auch bei 50.000 Iterationen mit der MC-Methode nicht auf.

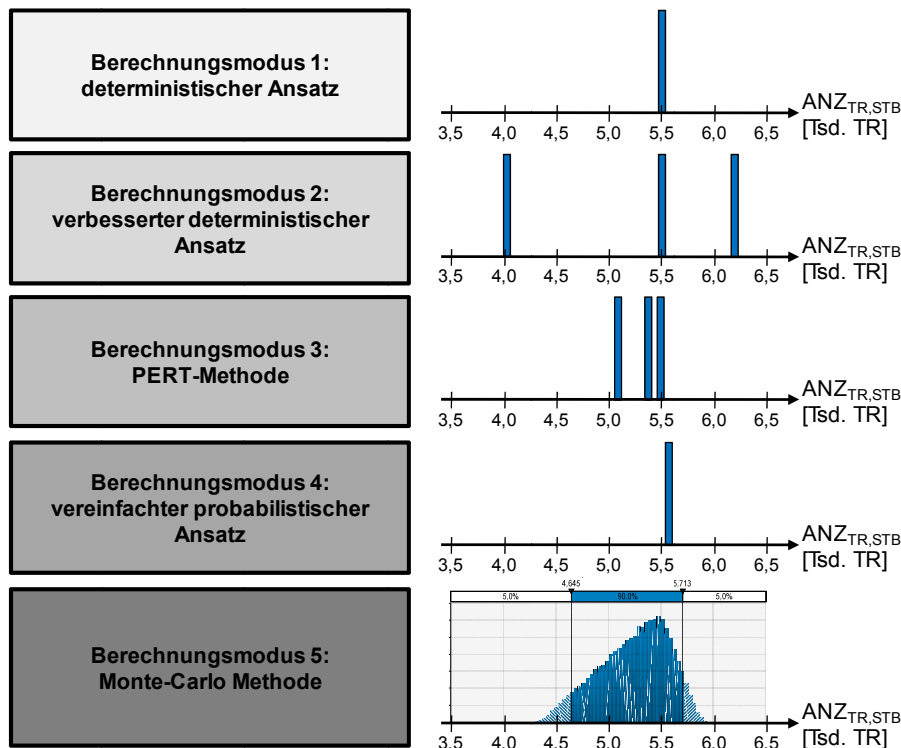


Bild 9–4 Vergleich der 5 Berechnungsmodi – Anzahl der Transporte

Die PERT-Methode liefert im Gegensatz dazu eine engere Bandbreite der Ergebnisse. Alle 3 Werte liegen innerhalb der zentralen 90 % der Wahrscheinlichkeitsverteilung nach Berechnungsmodus 5. Diese Methode bildet somit für dieses Beispiel eine sehr gute Annäherung an die Ergebnisse der MC-Methode. Berechnungsmodus 4 liefert einen Wert, der mit ca. 5.559 TR im Vergleich zur MC-Methode mit 82,4%iger Wahrscheinlichkeit unterschritten wird. Eine weitere Verbesserung des vereinfachten probabilistischen Ansatzes wäre durch die Bildung von optimistischen und pessimistischen Werten möglich. Mit dieser Verbesserungsmaßnahme wäre jedoch noch immer keine Aussage über die Eintrittswahrscheinlichkeiten bestimmter Werte möglich. Erst durch das Histogramm aus der MC-Simulation kann festgestellt werden, in welchen Bereichen der Verteilungsfunktion sich die errechneten Ergebnisse bewegen.

In Tabelle 9.4 ist die errechnete Anzahl der Transporte für jeden Berechnungsmodus (für die MC-Methode repräsentativ das 5 % Quantil, der Mittelwert und das 95 % Quantil) angeführt.

Tabelle 9.4 Vergleich der Anzahl der Transporte für Berechnungsmodus 1 bis 5

Anzahl der Transporte für Stahlbetonarbeiten ANZ <sub>TR,StB</sub> [TR]	Berechnungsmodus	Bezeichnung	Anzahl der errechneten Werte	minimalster/optimistischer Wert	erwarteter/mittlerer Wert	maximalster/pessimistischer Wert
	1	deterministisch	1	-	5.534,9	-
	2	verbessert deterministisch	3	4.056,5	5.534,9	6.216,2
	3	PERT	3	5.134,4	5.388,4	5.498,7
	4	vereinfacht probabilistisch	1	-	5.559,4	-
				<b>5 % Quantil</b>	<b>Mittelwert</b>	<b>95 % Quantil</b>
5	Monte-Carlo	50.000	4.648,0	5.242,8	5.712,0	

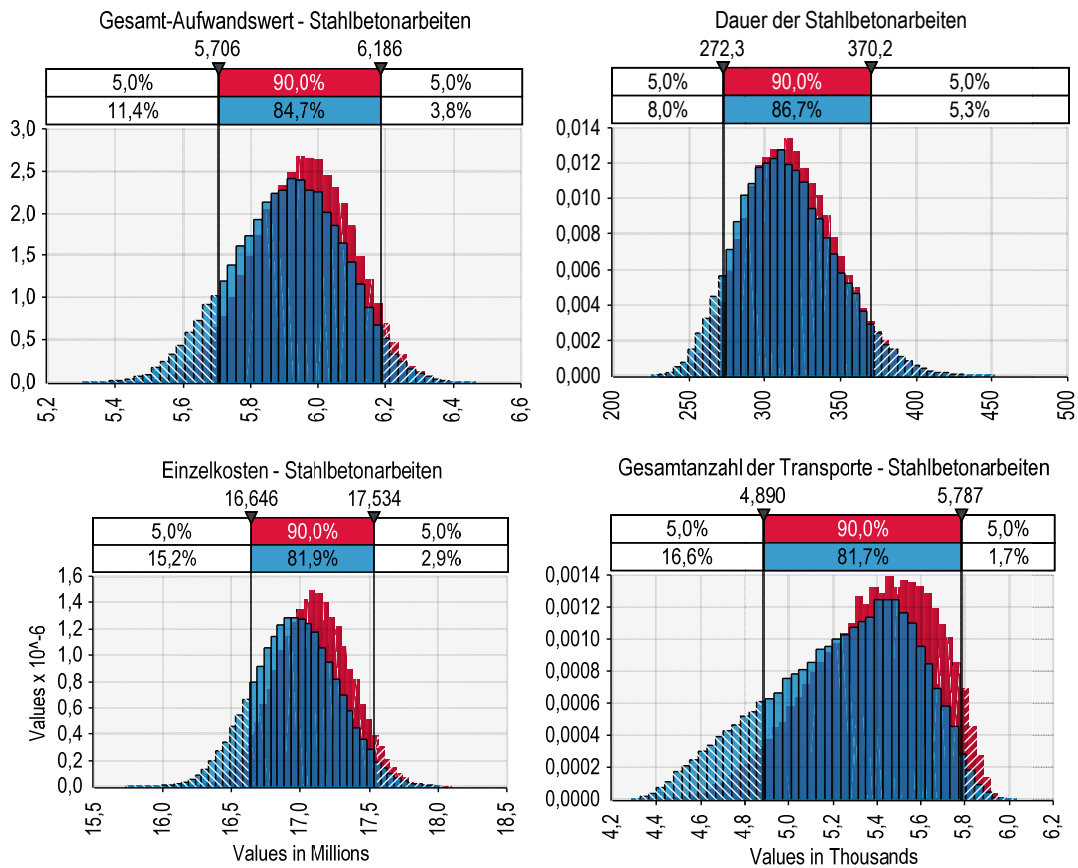
### 9.5 Vergleich – PERT- und Dreiecksverteilung

Bei einem Vergleich der Ergebnisse des Gesamt-Aufwandwertes, der Einzelkosten, Bauzeit und Gesamtanzahl an Transporten für die Stahlbetonarbeiten soll festgestellt werden, welche Auswirkungen der Einsatz von unterschiedlichen Eingangsverteilungsfunktionen hervorruft. Im gegenständlichen Fall wurden zum einen Dreiecksverteilungen und zum anderen PERT-Verteilungen, die einen Sonderfall der BETA-General-Verteilungen darstellen, eingesetzt. PERT-Verteilungen weisen im Bereich der Schiefe eine geringere Gewichtung und damit eine geringere Eintrittswahrscheinlichkeit der Werte auf.

In Bild 9–5 sind die Ergebnisse, die aus den Dreiecksverteilungen resultieren in blauer und jene, die sich aus den PERT-Verteilungen ergeben in roter Farbe dargestellt. Die verwendeten Berechnungsvorschriften bzw. -gleichungen sind dabei die gleichen. Außerdem wurde jeweils die gleiche Anzahl an Iterationen mit der selben Probenerhebungsmethode (Latin Hypercube) durchgeführt.

Durch die veränderten Eingabebedingungen zeigen sich bei den Ergebnissen teilweise erhebliche Unterschiede. In der tabellarischen Gegenüberstellung (siehe Tabelle 9.5) ist ersichtlich, dass sich die Standardabweichungen der PERT-Ergebnisse gegenüber jenen, der Dreiecksverteilungen um bis zu 15,6 % verringert haben. Die Streuung der Ergebnisse wird demnach durch den Einsatz von PERT-Verteilungen geringer. Durch diese Tatsache verringert sich auch der Abstand zwischen den 5 % und 95 % Quantilen.

Die Mittelwerte sowie die 5 % und 95 % Quantile ändern sich gegenüber den Ergebnissen der Dreiecksverteilungen hingegen um maximal 5,23 % (5 % Quantil bei der Gesamtanzahl an Transporten in Tabelle 9.5). Dies zeigt, dass die Form der Eingangsverteilungen weniger Einfluss auf die Einzelwerte (Mittelwert, Quantile, Modalwert etc.), als auf die Streuung der Wahrscheinlichkeitsverteilungen hat.



**Bild 9–5** Vergleiche der Ergebnisse des Gesamt-Aufwandwertes [Std/m³], der Einzelkosten [€], Bauzeit [d] und Gesamtanzahl der Transporte [TR] für Dreiecks- (blau) und PERT-Verteilungen (rot)

**Tabelle 9.5** Vergleich zwischen Dreiecks- und PERT-Verteilungen

		Dreiecksverteilung	PERT-Verteilung	Differenz	
				absolut	prozentual
<b>Gesamt-Aufwandwert [Std/m³]</b>	5 % Quantil	5,6320	5,7057	0,0737	1,31 %
	Mittelwert	5,9105	5,9537	0,0432	0,73 %
	95 % Quantil	6,1683	6,1857	0,0174	0,28 %
	Standardabweichung	0,1626	0,1454	-0,0172	-10,58 %
<b>Einzelkosten [€]</b>	5 % Quantil	16.458.404,01	16.645.877,67	187.473,66	1,14 %
	Mittelwert	16.961.294,99	17.092.736,13	131.441,14	0,77 %
	95 % Quantil	17.463.311,50	17.534.376,44	71.064,94	0,41 %
	Standardabweichung	303.900,21	269.540,92	-34.359,30	-11,31 %
<b>Dauer der Stahlbetonarbeiten [d]</b>	5 % Quantil	266,30	272,28	5,98	2,24 %
	Mittelwert	314,85	317,89	3,04	0,97 %
	95 % Quantil	371,14	370,24	-0,90	-0,24 %
	Standardabweichung	31,90	29,73	-2,16	-6,79 %
<b>Gesamtanzahl der Transporte [TR]</b>	5 % Quantil	4.646,89	4.889,69	242,80	5,23 %
	Mittelwert	5.242,77	5.388,40	145,63	2,78 %
	95 % Quantil	5.712,73	5.786,73	74,00	1,30 %
	Standardabweichung	326,44	275,23	-51,21	-15,69 %

Welche Verteilungsfunktionen letztendlich für die jeweiligen Eingangsparameter eingesetzt werden bzw. die in der Praxis auftretenden Werte tatsächlich am besten abbilden, ist derzeitiger Stand der Forschung. Unsicher ist weiters, wie sinnvoll es ist, ohne Kenntnis der tatsächlichen Formen der Dichtefunktionen, Monte-Carlo Simulationen durchzuführen.<sup>220</sup>

In jedem Fall kann aber festgehalten werden, dass durch die Anwendung der Monte-Carlo Methode eine erhebliche Ergebnisverbesserung erzielt wird und Resultate in Form von Wahrscheinlichkeitsverteilungen generiert werden. Die Interpretation bzw. die Durchführung von Sensitivitätsanalysen erfordern weiterhin die Fachkenntnis von baubetrieblichen und bauwirtschaftlichen Zusammenhängen.<sup>221</sup>

---

<sup>220</sup> Vgl. HOFSTADLER, C.: Verteilungsfunktion für Aufwandswerte bei Schalarbeiten - Herleitung der Verteilungsfunktion aus den Ergebnissen einer Expertenbefragung. Unveröffentlichtes Arbeitspapier. S. 2f.

<sup>221</sup> Vgl. HOFSTADLER, C.: Bauzeit und Baukosten für Stahlbetonarbeiten - Berechnungsmethoden und Anwendung. In: Beton- und Stahlbeton 104 (2009), Heft 5 05/2009. S. 281



## 10 Vorteile der Monte-Carlo Methode

Die Vorteile bei der Anwendung der Monte-Carlo Methode in Bauprojekten, gegenüber den bisher in der Praxis eingesetzten Verfahren, kann demonstrativ wie folgt zusammengefasst werden:<sup>222 223</sup>

- ◆ Erhebliche Ergebnisverbesserung
- ◆ Übersichtliche Darstellung der Ergebnisse
- ◆ Die Berechnungen weisen den Charakter einer Prognose auf
- ◆ Risiken/Chancen können abgeschätzt werden
- ◆ Erleichterung bei der Entscheidungsfindung
- ◆ Die Simulation einer sehr großen Anzahl an Projekten wird durch eine große Anzahl an Iterationen möglich
- ◆ Bei ‚richtiger‘ Modellierung werden realistische Bandbreiten errechnet
- ◆ Die Methode ist in jeder Projektphase sowohl vom AG als auch vom AN einsetzbar
- ◆ Unsicherheiten bei komplexen Zusammenhängen können untersucht werden
- ◆ Für die Anwendung der Monte-Carlo Methode müssen sich die Beteiligten bzw. der Anwender bewusst Gedanken über Risiken und mögliche Bandbreiten machen – damit steigt das Risikobewusstsein
- ◆ Sensitivitätsanalysen sind leicht durchführbar
- ◆ Die Methode ist leicht verständlich und schnell erlernbar
- ◆ Alle vorhandenen Informationen fließen in die Berechnungen mit ein
- ◆ Es geht keine Information zwischen Eingabewerten und Ergebnissen verloren
- ◆ Es erfolgt keine Darstellung einer irreführenden „exakten Zahl“

Zu beachten ist allerdings, dass den Ergebnissen der Monte-Carlo Simulation nicht blind vertraut werden darf. Die Beurteilung und Interpretation der Resultate sowie die Entscheidungsfindung müssen unter Beachtung baubetrieblicher und bauwirtschaftlicher Zusammenhänge erfolgen.<sup>224</sup>

<sup>222</sup> Vgl. HOFSTADLER, C.: Bauzeit und Baukosten für Stahlbetonarbeiten - Berechnungsmethoden und Anwendung. In: Beton- und Stahlbeton 104 (2009), Heft 5 05/2009. S. 281

<sup>223</sup> Vgl. MEDGENBERG, J.; NEMUTH, T.: Potential der Monte-Carlo-Simulation für Risikoanalyse im Projektmanagement. In: Zukunftspotential Bauwirtschaft - Baubetrieb Bauwirtschaft Baumanagement - Tagungsband - 1. Internationaler BBB-Kongress - Dresden 09/2011. S. 169f

<sup>224</sup> Vgl. HOFSTADLER, C.: Bauzeit und Baukosten für Stahlbetonarbeiten - Berechnungsmethoden und Anwendung. In: Beton- und Stahlbeton 104 (2009), Heft 5 05/2009. S. 281

## 11 Zusammenfassung

Die vorliegende Masterarbeit zeigt den Einsatz der Monte-Carlo Simulation bei der Berechnung von Baukosten, Bauzeit und der Anzahl an Transporten, mit besonderem Fokus auf die Stahlbetonarbeiten.

Einleitend wurde auf den Risikobegriff, das Risikomanagement und speziell auf Risiken bei Stahlbetonarbeiten eingegangen. Festgehalten wurde dabei, dass der Begriff des Risikos immer die Möglichkeit einer Gefahr, aber auch die einer Chance impliziert. Die Anwendung der Monte-Carlo Methode kann im Risikomanagementprozess bei der Risikobeurteilung – genauer bei der Risikoanalyse und Risikobewertung – eingesetzt werden.

In drei Kapiteln wurden die Berechnungsgleichungen für die Ermittlung von Baukosten, Bauzeit und Anzahl der Transporte für die Stahlbetonarbeiten angeführt. In Kapitel 3 (Ermittlung von Baukosten für Stahlbetonarbeiten) wurde dabei noch näher auf Kostentoleranzen und Kostenermittlungsverfahren eingegangen.

Auf die Monte-Carlo Methode, welche Zufallszahlen für die Lösung sowohl naturwissenschaftlicher als auch mathematischer Probleme (deterministischer und stochastischer Natur) heranzieht, wurde in Kapitel 6 eingegangen. Die Geschichte der Monte-Carlo Methode, die bis in das 18. Jahrhundert mit dem ‚Nadelproblem von Buffon‘ zurückverfolgt werden kann und seit 1949 ihren heutigen Namen trägt, wurde ebenso behandelt, wie die Generierung von Zufallszahlen. Weiters wurden wichtige mathematische und wahrscheinlichkeitstheoretische Begriffe erklärt und teilweise mit Bildern und Beispielen verdeutlicht. Außerdem wurde in diesem Kapitel die Wahl der Verteilungsfunktionen sowie der Umgang mit und der Einfluss von Korrelationen anhand einfacher Beispiele gezeigt. Es konnte festgestellt werden, dass für Kosten-, Aufwands- und Leistungswerte möglichst Log-Normal bzw. LogLogistic-Verteilungen den bisher häufig eingesetzten Dreiecksverteilungen vorzuziehen sind. Ist dies nicht möglich, sollten zumindest BETA- oder PERT-Verteilungen angesetzt werden. Für das Berechnungsbeispiel konnte gezeigt werden, dass durch die Verwendung von PERT- im Gegensatz zu Dreiecksverteilungen in jedem Fall eine Verringerung der Streuung der Ergebnisse zu erwarten ist. Bei der Berechnung der Anzahl an Transporten konnte die Standardabweichung um 15,69 % verringert werden.

Bei der Untersuchung der Korrelationen wurde anhand von einfachen Beispielen gezeigt, dass diese sowohl den Mittelwert als auch die Streuung der Ergebnisse beeinflussen. Allgemein gültige Korrelationskoeffizienten können jedoch nicht festgelegt werden, da diese von den gewählten Bandbreiten und Verteilungsfunktionen abhängig sind. Die subjektive Auswahl von Korrelationskoeffizienten nach festgelegten Kategorien, in Zusammenhang mit den angesetzten Eingangsparametern wird daher empfohlen.

In einer Situationsanalyse konnte die unterschiedliche Bearbeitungsbreite und –tiefe bei der Anwendung der Monte-Carlo Methode im Bauwesen festgestellt werden. Sowohl abweichende Gliederungen, verschiedenen Verteilungsfunktionen und schwankende Anzahlen an Iterationen (zwischen 5.000 und 50.000) werden von den Autoren in ihren Simulationen verwendet.

Ein eigenes Kapitel wurde dem, für diese Arbeit verwendeten, Softwareprogramm @Risk gewidmet. Darin wurden demonstrative Vor- und Nachteile des Programms abgewogen, die Modellierung der Simulation erklärt und näher auf die unterschiedlichen Probenerhe-

bungsmethoden Monte-Carlo und Latin Hypercube eingegangen. Bei Latin Hypercube handelt es sich um eine geschichtete Probenerhebungsmethode, bei der schon nach wenigen Iterationen eine deutlich bessere Annäherung an die vorgegebenen Verteilungsfunktionen zu erkennen ist, als bei gleicher Iterationsanzahl mit der Monte-Carlo Probenerhebungsmethode. Latin Hypercube sollte daher für die Durchführung der gezeigten Simulationen vorrangig verwendet werden.

Der Einsatz der Monte-Carlo Simulation wurde im Vergleich zu bisher in der Praxis eingesetzten Berechnungsverfahren, anhand eines Beispiels (Musiktheater Linz) durchgeführt. Dabei wurden die Baukosten, Bauzeit und die Anzahl der Transporte für die Stahlbetonarbeiten, durch die Anwendung von fünf Berechnungsmodi, ermittelt. Bei den Ergebnissen der Berechnungen zeigte sich, dass die Einzelergebnisse aus den Berechnungsmodi 1 (deterministischer Ansatz) und 4 (vereinfachter probabilistischer Ansatz), im Vergleich zu den Histogrammen aus der Monte-Carlo Simulation (Berechnungsmodus 5), meist innerhalb des zentralen 90%igen Wahrscheinlichkeitsbereiches lagen. Die Bandbreiten, die mit dem verbesserten deterministischen Ansatz (Berechnungsmodus 2) berechnet wurden, waren durchgehend zu breit. Die Extremwerte (Minimum und Maximum) waren dermaßen unwahrscheinlich, dass sie in der Monte-Carlo Simulation auch bei 50.000 Iterationen nicht aufgetreten sind. Die optimistischen und pessimistischen Resultate der PERT-Methode (Berechnungsmodus 3) lagen für dieses Beispiel häufig in der Nähe des 5 bzw. 95 % Quantils nach Berechnungsmodus 5.

Es muss jedoch festgehalten werden, dass erst durch die Ergebnisse der Monte-Carlo Simulation eingeschätzt werden konnte, in welchem Bereich die Resultate der anderen Berechnungsverfahren überhaupt lagen und mit welcher Wahrscheinlichkeit diese auftreten würden. In der folgenden Tabelle werden die wichtigsten Ergebnisse aus der Monte-Carlo Simulation (errechnet mit Dreiecksverteilungen) wiedergegeben.

**Tabelle 11.1 Zusammenfassung der Ergebnisse aus der Monte-Carlo Simulation für das Berechnungsbeispiel**

Zusammenfassung der Ergebnisse aus der Monte-Carlo Simulation (Dreiecksverteilungen und 50.000 Iterationen)					
Berechnungsmodus	Bezeichnung	Einheit	5 % Quantil	Mittelwert	95 % Quantil
5	Gesamt-Aufwandswert	[Std/m³]	5,63	5,91	6,17
5	Herstellkosten inkl. Kostenpuffer	[Mio. €]	21,25	22,39	23,54
5	Gesamtdauer inkl. Zeitpuffer	[d]	295	349	413
5	Anzahl der Transporte inkl. Zuschlag	[TR]	5.109	5.767	6.292

Für das durchgeführte Beispiel konnte bei Berechnungsmodus 2 eine relativ große prozentuale Bandbreite, die der Stufe einer Kostenschätzung entsprechen würde, für die Herstellkosten der Stahlbetonarbeiten inkl. Kostenpuffer ermittelt werden. Mit den gleichen Eingangswerten wurde jedoch mit der PERT-Methode lediglich eine Abweichung vom erwarteten

ten Kostenwert von weniger als  $\pm 5\%$  errechnet. Dies begründet sich dadurch, dass bei der PERT-Methode extrem unwahrscheinliche Szenarien, wie das Eintreten aller minimalen bzw. aller maximalen Werte, gänzlich ausgeschlossen wird. Die Angabe einer engeren Bandbreite wird dadurch möglich, ohne zusätzlich große Unsicherheiten in die Berechnungen zu bringen. In Bild 11–1 sind die prozentualen Bandbreiten für die Herstellkosten inkl. Puffer der Berechnungsmodi 2, 3 und 5 grafisch dargestellt. Wobei bei der Monte-Carlo Methode sowohl die Minimal- und Maximalwerte als auch das 5 % und das 95 % Quantil eingetragen sind.

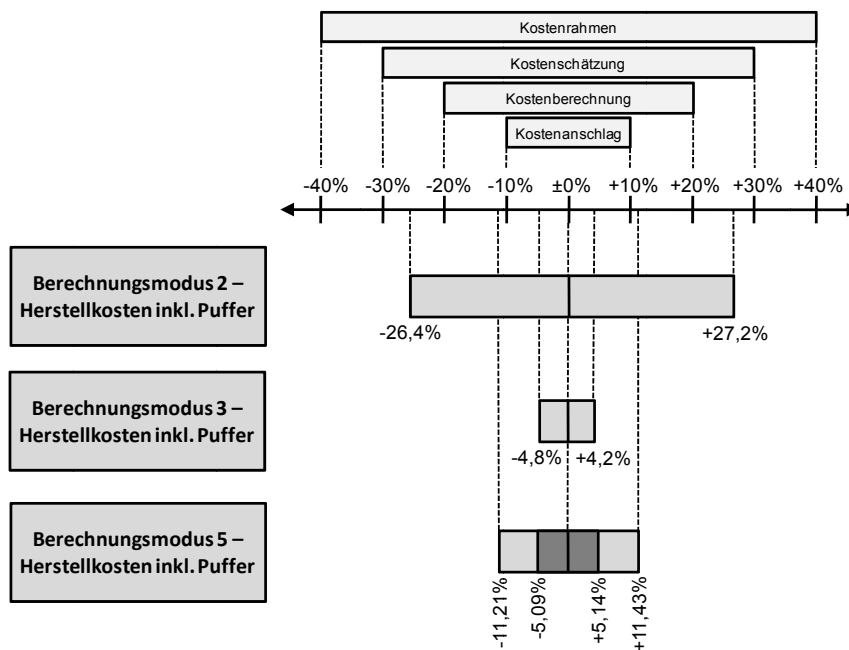


Bild 11–1 Vergleich der prozentualen Bandbreiten der Herstellkosten für die Stahlbetonarbeiten inkl. Kostenpuffer - Berechnungsmodi 2, 3 und 5

Obwohl die Monte-Carlo Simulation erhebliche Ergebnisverbesserungen mit sich bringt, dürfen die Resultate nicht unreflektiert übernommen werden und müssen in Bezug zu den jeweils vorherrschenden Betriebs-, Bauwerks-, Bauverfahrens- und Baustellenbedingungen betrachtet werden. Wie auch bei der Finite-Elemente Methode in der Statik müssen die Eingangsparameter und die Modellierung überprüft werden sowie die Ergebnisse mit überschlägigen Berechnungen auf Plausibilität kontrolliert werden. Die Simulation ersetzt damit in keinem Fall die Fachkenntnis und das baubetriebliche und bauwirtschaftliche Verständnis eines Experten, kann aber die Entscheidungsfindung erleichtern.

## 12 Ausblick

Die Vorteile der Monte-Carlo Methode wurden gezeigt, allerdings ist die Frage, wie sinnvoll eine Monte-Carlo Simulation ohne die genaue Kenntnis über die Verteilungsfunktionen der Eingangsparameter ist, noch unbeantwortet. Es werden von verschiedenen Autoren unterschiedlichste Funktionen vorgeschlagen. Teilweise konnten diese Annahmen durch Expertenbefragungen<sup>225 226</sup> verifiziert werden. Weiterführende Untersuchungen sind aber in jedem Fall noch erforderlich. Eine Integrierung von neuronalen Netzen, bei denen ein Softwareprogramm durch den Aufbau einer Datenbank, mit Kennzahlen ausgeführter Projekte stetig ‚dazulernt‘, wäre denkbar.

Korrelationen wurden in dieser Arbeit zwar behandelt aber im Zuge des gezeigten Berechnungsbeispiels nicht berücksichtigt, da sich die Festlegung von Korrelationen als äußerst schwierig erwiesen hat. Dies begründet sich dadurch, dass die Korrelationen von den gewählten (oft nur geschätzten) Eingangswerten abhängen (wie auch im Beispiel in Kap. 6.9.1 und 6.9.2 gezeigt werden konnte). Der systematische Umgang mit und die Berücksichtigung von Korrelationen sollte das Ziel zukünftiger Untersuchungen sein.

In diesem Zusammenhang ist auch die gegenseitige Abhängigkeit von Baukosten und Bauzeit zu behandeln. Dass bei sehr kurzen Bauzeiten die Produktivität und dadurch auch die Kosten ansteigen, ist bekannt. Darüber, in welchem Maße hier ein Zusammenhang besteht, kann nach derzeitigem Wissensstand aber keine gesicherte Aussage getroffen werden.

Die Weiterentwicklung dieser oder ähnlicher Methoden sollte durchaus angestrebt werden, da die Beurteilung und Bewertung von Unsicherheiten aktueller denn je ist. Dem zusätzlichen Aufwand für die Berechnungen mit der Monte-Carlo Methode, kann durch die Entwicklung von optimierten und anwenderfreundlichen Benutzeroberflächen begegnet werden.

<sup>225</sup> Vgl. CHAU, K. W.: The validity of the triangular distribution assumption in Monte Carlo simulation of construction costs: empirical evidence from Hong Kong. In: Construction Management and Economics 01/1995. S. 15ff

<sup>226</sup> Vgl. HOFSTADLER, C.: Verteilungsfunktion für Aufwandswerte bei Schalarbeiten - Herleitung der Verteilungsfunktion aus den Ergebnissen einer Expertenbefragung. Unveröffentlichtes Arbeitspapier. S. 7ff

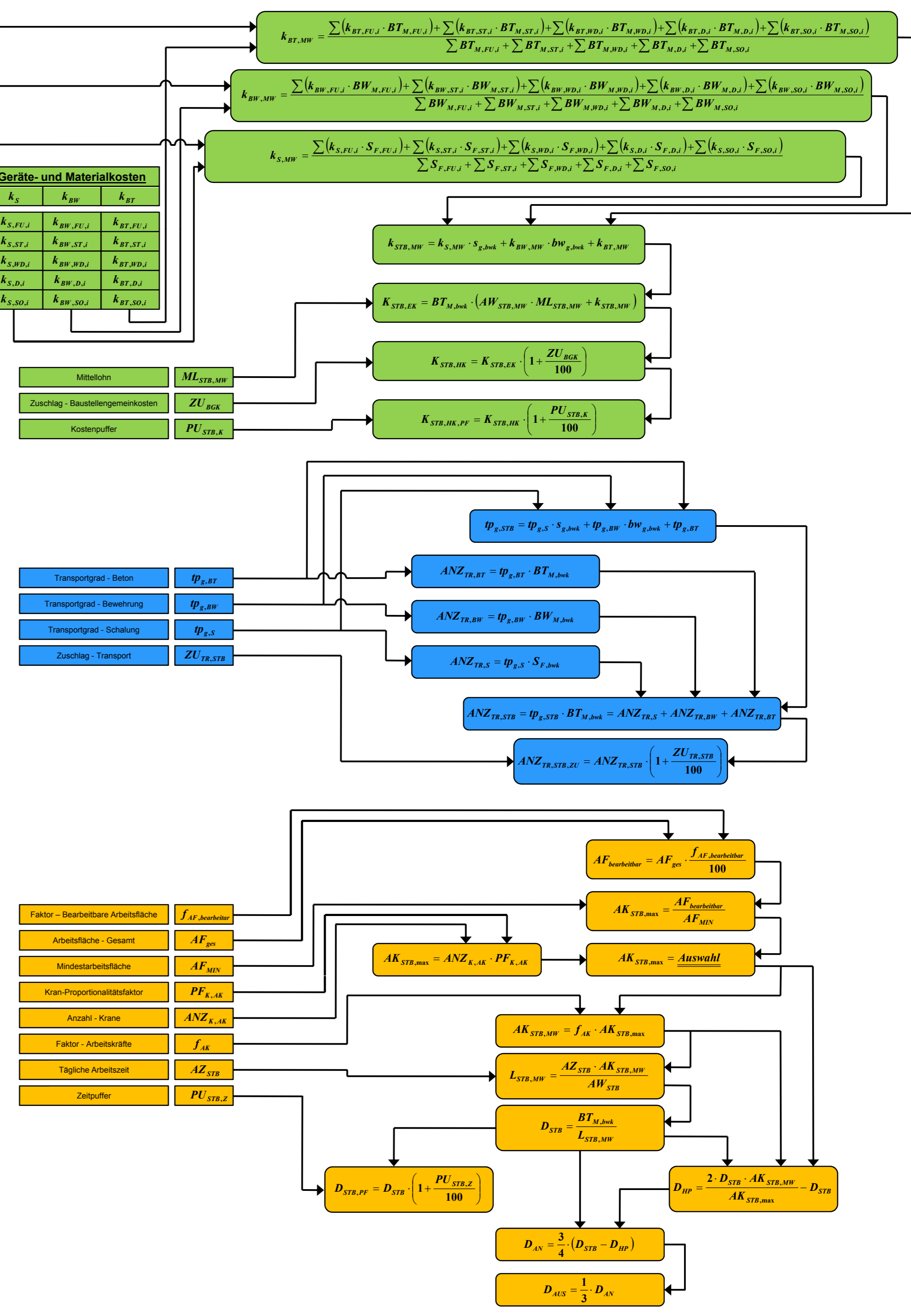
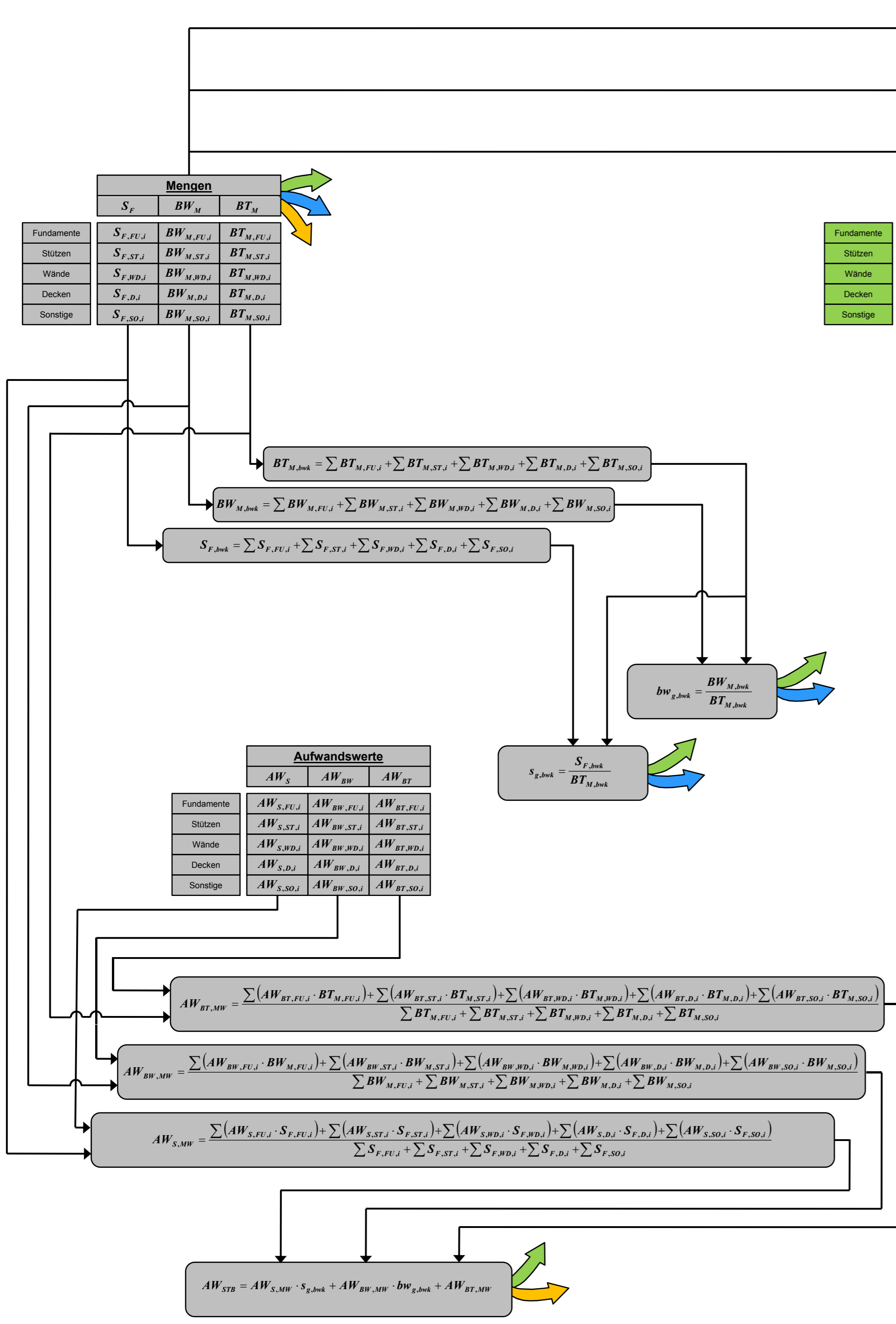
## 13 Anhang

Die Gleichungsübersicht zeigt die drei Bereiche, für die die Monte-Carlo Simulation durchgeführt wird (Kosten, Dauer und Anzahl an Transporten).

In grün sind alle Gleichungen und Eingabewerte angeführt, die für die Berechnung der Kosten notwendig sind. Die Berechnungsansätze für die Ermittlung der Anzahl an Transporten ist in blau und jene für die Berechnung der Dauer in orange dargestellt.

Grau hinterlegt sind jene Eingangswerte und Gleichungen, die in mehreren Kategorien für eine Berechnung erforderlich sind. Weitere Bauteilgruppen sind nach dem vorgegebenen Schema in die Berechnungen einzufügen.

Die Gleichungsübersicht wurde mit dem Programm „Edraw Mind Map“, eine Freeware der Firma EdrawSoft, erstellt.



Kosten

Transporte

Dauer

Vgl. HOFSTADLER, C.: Bauablaufplanung und Logistik im Baubetrieb. S. 59ff, 108ff  
 Vgl. HOFSTADLER, C.: Schalarbeiten - Technologische Grundlagen, Sichtbeton, Systemauswahl, Ablaufplanung, Logistik und Kalkulation. S. 303ff, 464f  
 Vgl. HOFSTADLER, C.; FRANZL, G.: Bewehrungsarbeiten im Baubetrieb. S. 115ff, 153ff, 207f  
 Vgl. HOFSTADLER, C.: Beschaffungslogistik für die Phase Bauwerk-Rohbau - Berechnung der Anzahl der Transporte für Stahlbetonarbeiten unter Anwendung der Monte-Carlo-Simulation. In: Festschrift anlässlich des 30-jährigen Bestehens des Instituts für Baubetrieb der Technischen Universität Darmstadt - Baubetriebliche Aufgaben 2009. S. 149ff



## 14 Abkürzungsverzeichnis

### A

AF .....	Arbeitsfläche [m <sup>2</sup> ]
AF <sub>bearbeitbar</sub> .....	Bearbeitbare Arbeitsfläche [m <sup>2</sup> ]
AF <sub>ges</sub> .....	Gesamte Arbeitsfläche [m <sup>2</sup> ]
AF <sub>MIN</sub> .....	Arbeitsraum je Arbeitskraft [m <sup>2</sup> /AK]
AG .....	Auftraggeber
AK .....	Arbeitskraft
AK <sub>STB</sub> .....	Arbeitskräfte für die Stahlbetonarbeiten [Std/h]
AK <sub>STB,max</sub> .....	Maximale Anzahl an Arbeitskräften für die Stahlbetonarbeiten [Std/h]
AK <sub>STB,max,gew</sub> .....	Gewählte maximale Anzahl an Arbeitskräften für die Stahlbetonarbeiten [Std/h]
AK <sub>STB,MW</sub> .....	Mittlere Anzahl an Arbeitskräften für die Stahlbetonarbeiten [Std/h]
AN .....	Auftragnehmer
ANZ <sub>K,AK</sub> .....	Anzahl der Krane, bezogen auf die Arbeitskräfteanzahl [Kran]
ANZ <sub>TR,BT</sub> .....	Anzahl der Transporte für den Beton [TR]
ANZ <sub>TR,BW</sub> .....	Anzahl der Transporte für die Bewehrung [TR]
ANZ <sub>TR,S</sub> .....	Anzahl der Transporte für die Schalung [TR]
ANZ <sub>TR,STB</sub> .....	Anzahl der Transporte für den gesamten Stahlbeton [TR]
ANZ <sub>TR,STB,ZU</sub> .....	Anzahl der Transporte für den gesamten Stahlbeton inklusive Zuschlag [TR]
AW .....	Aufwandswert [Std/EH]
AW <sub>BT,bwk</sub> .....	Aufwandswert – Betonierarbeiten, für das gesamte Bauwerk [Std/m <sup>3</sup> ]
AW <sub>BT,D,i</sub> .....	Aufwandswert – Betonierarbeiten für Decken [Std/m <sup>3</sup> ]
AW <sub>BT,FU,i</sub> .....	Aufwandswert – Betonierarbeiten für Fundamente [Std/m <sup>3</sup> ]
AW <sub>BT,i</sub> .....	Aufwandswert – Betonierarbeiten, bezogen auf eine Bauteilgruppe [Std/m <sup>3</sup> ]
AW <sub>BT,MW</sub> .....	Mittlerer Aufwandswert – Betonierarbeiten [Std/m <sup>3</sup> ]
AW <sub>BT,SO,i</sub> .....	Aufwandswert – Betonierarbeiten für sonstige Bauteile [Std/m <sup>3</sup> ]
AW <sub>BT,ST,i</sub> .....	Aufwandswert – Betonierarbeiten für Stützen [Std/m <sup>3</sup> ]
AW <sub>BT,WD,i</sub> .....	Aufwandswert – Betonierarbeiten für Wände [Std/m <sup>3</sup> ]
AW <sub>BW,bwk</sub> .....	Aufwandswert – Bewehrungsarbeiten, für das gesamte Bauwerk [Std/t]
AW <sub>BW,D,i</sub> .....	Aufwandswert – Bewehrungsarbeiten für Decken [Std/t]
AW <sub>BW,FU,i</sub> .....	Aufwandswert – Bewehrungsarbeiten für Fundamente [Std/t]
AW <sub>BW,i</sub> .....	Aufwandswert – Bewehrungsarbeiten, bezogen auf eine Bauteilgruppe [Std/t]
AW <sub>BW,MW</sub> .....	Mittlerer Aufwandswert – Bewehrungsarbeiten [Std/t]



$AW_{BW,SO,i}$ .....	Aufandswert – Bewehrungsarbeiten für sonstige Bauteile [Std/t]
$AW_{BW,ST,i}$ .....	Aufandswert – Bewehrungsarbeiten für Stützen [Std/t]
$AW_{BW,WD,i}$ .....	Aufandswert – Bewehrungsarbeiten für Wände [Std/t]
$AW_{S,bwk}$ .....	Aufandswert – Schalarbeiten, für das gesamte Bauwerk [Std/m <sup>2</sup> ]
$AW_{S,D,i}$ .....	Aufandswert – Schalarbeiten für Decken [Std/m <sup>2</sup> ]
$AW_{S,FU,i}$ .....	Aufandswert – Schalarbeiten für Fundamente [Std/m <sup>2</sup> ]
$AW_{S,i}$ .....	Aufandswert – Schalarbeiten, bezogen auf eine Bauteilgruppe [Std/m <sup>2</sup> ]
$AW_{S,MW}$ .....	Mittlerer Aufandswert – Schalarbeiten [Std/m <sup>2</sup> ]
$AW_{S,SO,i}$ .....	Aufandswert – Schalarbeiten für sonstige Bauteile [Std/m <sup>2</sup> ]
$AW_{S,ST,i}$ .....	Aufandswert – Schalarbeiten für Stützen [Std/m <sup>2</sup> ]
$AW_{S,WD,i}$ .....	Aufandswert – Schalarbeiten für Wände [Std/m <sup>2</sup> ]
$AW_{STB}$ .....	Aufandswert der Stahlbetonarbeiten [Std/m <sup>3</sup> ]
$AW_{STB,bwk}$ .....	Aufandswert – Stahlbetonarbeiten, für das gesamte Bauwerk [Std/m <sup>3</sup> ]
$AW_{STB,MW}$ .....	Mittlere Aufandswert der Stahlbetonarbeiten [Std/m <sup>3</sup> ]
$AZ_{STB}$ .....	Tägliche Arbeitszeit für Stahlbetonarbeiten [h/d]

**B**

BAS .....	Bauarbeitsschlüssel
BGF .....	Brutto-Grundfläche
BGK .....	Baustellengemeinkosten
BKI .....	Baukosteninformationszentrum Deutscher Architektenkammern
BRI .....	Brutto-Rauminhalt
BT .....	Beton
$BT_{M,bwk}$ .....	Betonmenge für das gesamte Bauwerk (Gesamt-Betonmenge) [m <sup>3</sup> ]
$BT_{M,D,i}$ .....	Betonmenge – Decken [m <sup>3</sup> ]
$BT_{M,FU,i}$ .....	Betonmenge – Fundamente [m <sup>3</sup> ]
$BT_{M,SO,i}$ .....	Betonmenge – sonstige Bauteile [m <sup>3</sup> ]
$BT_{M,ST,i}$ .....	Betonmenge – Stützen [m <sup>3</sup> ]
$BT_{M,TR}$ .....	Betonmenge die je Transport geliefert wird [m <sup>3</sup> ]
$BT_{M,WD,i}$ .....	Betonmenge – Wände [m <sup>3</sup> ]
BW .....	Bewehrung
$bw_{g,bwk}$ .....	Bewehrungsgrad für das gesamte Bauwerk (Gesamt-Bewehrungsgrad) [kg/m <sup>3</sup> ], [t/m <sup>3</sup> ]
$BW_{M,bwk}$ .....	Bewehrungsmenge für das gesamte Bauwerk (Gesamt-Bewehrungsmenge) [t]
$BW_{M,D,i}$ .....	Bewehrungsmenge – Decken [t]
$BW_{M,FU,i}$ .....	Bewehrungsmenge – Fundamente [t]

$BW_{M,SO,i}$ .....	Bewehrungsmenge – sonstige Bauteile [t]
$BW_{M,ST,i}$ .....	Bewehrungsmenge – Stützen [t]
$BW_{M,TR}$ .....	Bewehrungsmenge die je Transport geliefert wird [t]
$BW_{M,WD,i}$ .....	Bewehrungsmenge – Wände [t]
bwk.....	Bauwerk

**D**

d.....	Arbeitstag [d]
$D_A$ .....	Ausschalfrist für die Schalung [d]
$D_{AN}$ .....	Dauer – Anlaufphase [d]
$D_{AUS}$ .....	Dauer – Auslaufphase [d]
$D_{BT}$ .....	Dauer für das Betonieren [d]
$D_{BW}$ .....	Dauer für das Bewehren [d]
$D_{DS,E}$ .....	Dauer für das Einschalen einer Decke [d]
$D_{HP}$ .....	Dauer – Hauptbauphase [d]
$D_{STB}$ .....	Dauer – Stahlbetonarbeiten [d]
$D_{STB,PF}$ .....	Dauer – Stahlbetonarbeiten inklusive Zeitpuffer [d]
DIN.....	Deutsches Institut für Normung
Dm.....	Doppelmeter

**E**

€.....	Euro [€]
eCGM.....	elektronisches Chancen- und Gefahrenmanagement
EH.....	Einheit
ERW.....	Erwarteter Wert

**F**

$f_{AF,bearbeitbar}$ .....	Faktor der bearbeitbaren Arbeitsfläche [%]
$f_{AK}$ .....	Arbeitskräfteverhältnis [-]

**G**

Ges. ....	Gesamt
gew. ....	Gewählt
Glg. ....	Gleichung

**H**

h ..... Zeitstunde  
 HVAC ..... Heating, Ventilating and Air Conditioning

**K**

k.A. .... keine Angabe  
 Kap. .... Kapitel  
 kg ..... Kilogramm  
 $k_{BT,i}$  ..... Geräte- und/oder Materialkosten für Beton bezogen auf eine Bauteilgruppe [€/m<sup>3</sup>]  
 $k_{BT,MW}$  ..... Mittlere Geräte- und/oder Materialkosten für Beton [€/m<sup>3</sup>]  
 $k_{BW,i}$  ..... Geräte- und/oder Materialkosten für Bewehrung bezogen auf eine Bauteilgruppe [€/t]  
 $k_{BW,MW}$  ..... Mittlere Geräte- und/oder Materialkosten für Bewehrung [€/t]  
 $k_{S,i}$  ..... Geräte- und/oder Materialkosten für Schalung bezogen auf eine Bauteilgruppe [€/t]  
 $k_{S,MW}$  ..... Mittlere Geräte- und/oder Materialkosten für Schalung [€/t]  
 $K_{STB,EK}$  ..... Einzelkosten der Stahlbetonarbeiten [€]  
 $K_{STB,HK}$  ..... Herstellkosten der Stahlbetonarbeiten [€]  
 $K_{STB,HK,PF}$  ..... Herstellkosten der Stahlbetonarbeiten inklusive Kostenpuffer [€]  
 $k_{STB,MW}$  ..... Mittlere Geräte- und/oder Materialkosten für Stahlbeton [€/m<sup>3</sup>]

**L**

LG ..... Leistungsgruppe  
 $LS_{BT}$  ..... Lohnstunden – Betonierarbeiten [Std]  
 $LS_{BW}$  ..... Lohnstunden – Bewehrungsarbeiten [Std]  
 $LS_S$  ..... Lohnstunden – Schalarbeiten [Std]  
 $L_{STB}$  ..... Leistung der Stahlbetonarbeiten [m<sup>3</sup>/d]  
 $L_{STB,MW}$  ..... Mittlere Leistung der Stahlbetonarbeiten [m<sup>3</sup>/d]

**M**

$\mu$  ..... Erwartungswert  
 m<sup>2</sup> ..... Quadratmeter [m<sup>2</sup>]  
 m<sup>3</sup> ..... Kubikmeter [m<sup>3</sup>]  
 MAX ..... Maximum  
 MC ..... Monte-Carlo  
 MIN ..... Minimum

min .....	Minute
ML <sub>BT</sub> .....	Mittelohn – Betonarbeiten [€/Std]
ML <sub>BW</sub> .....	Mittelohn – Bewehrungsarbeiten [€/Std]
ML <sub>S</sub> .....	Mittelohn – Scharbeiten [€/Std]
ML <sub>STB,MW</sub> .....	Mittelwert der Mittelohnkosten für Stahlbetonarbeiten [€/Std]
Mrd. ....	Milliarde
MW.....	Mittelwert

**O**

ÖNORM .....	Österreichisches Normungsinstitut
opt. ....	Optimistisch

**P**

p <sub>i</sub> .....	Einzelwahrscheinlichkeit
PERT .....	Program Evaluation and Review Task
pes. ....	Pessimistisch
p <sub>EW,i</sub> .....	Eintrittswahrscheinlichkeit bezogen auf einen Wert einer Bauteilgruppe [-]
PF <sub>K,AK</sub> .....	Kran-Proportionalitätsfaktor zur Ermittlung der Arbeitskräfteanzahl [AK/Kran]
PU .....	Puffer
PU <sub>STB,K</sub> .....	Kostenpuffer der Stahlbetonarbeiten [%]
PU <sub>STB,Z</sub> .....	Zeitpuffer der Stahlbetonarbeiten [%]

**Q**

Q <sub>p</sub> .....	Quantilwert
----------------------	-------------

**R**

REFA .....	Verband für Arbeitsgestaltung, Betriebsorganisation und Unternehmensentwicklung
RIAAT .....	Risk Administration & Analyse Tool basierend auf Visual Basic
RM .....	Risikomanagement

**S**

σ .....	Standardabweichung
S.....	Schalung

$S_{F,bwk}$ .....	Schalungsfläche für das gesamte Bauwerk (Gesamt-Schalungsfläche) [m <sup>2</sup> ]
$S_{F,i}$ .....	Schalungsfläche, bezogen auf ein Bauteil bzw. eine Bauteilgruppe [m <sup>2</sup> ]
$S_{F,D,i}$ .....	Schalungsfläche – Decken [m <sup>2</sup> ]
$S_{F,FU,i}$ .....	Schalungsfläche – Fundamente [m <sup>2</sup> ]
$S_{F,SO,i}$ .....	Schalungsfläche – sonstige Bauteile [m <sup>2</sup> ]
$S_{F,ST,i}$ .....	Schalungsfläche – Stützen [m <sup>2</sup> ]
$S_{F,TR}$ .....	Schalungsfläche die je Transport geliefert wird [m <sup>2</sup> ]
$S_{F,TR,i}$ .....	Schalungsfläche die je Transport geliefert wird, bezogen auf ein Bauteil bzw. eine Bauteilgruppe [m <sup>2</sup> ]
$S_{F,WD,i}$ .....	Schalungsfläche – Wände [m <sup>2</sup> ]
$s_{g,bwk}$ .....	Schalungsgrad für das gesamte Bauwerk (Gesamt-Schalungsgrad) [m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup> ]
STB .....	Stahlbeton
Std.....	Stunden, Einheit für Lohnstunde(n) [Std]
Stk.....	Stück [Stk]

## T

t .....	Tonne
$tp_{g,BT}$ .....	Transportgrad – Beton [1/m <sup>3</sup> ]
$tp_{g,BW}$ .....	Transportgrad – Bewehrung [1/t]
$tp_{g,S}$ .....	Transportgrad – Schalung [1/m <sup>2</sup> ]
$tp_{g,S,i}$ .....	Transportgrad – Schalung, bezogen auf ein Bauteil bzw. eine Bauteilgruppe [1/m <sup>2</sup> ]
$tp_{g,STB}$ .....	Transportgrad – Stahlbeton [1/m <sup>3</sup> ]
TR .....	Transport [-]

## U

ULG.....	Unterleistungsgruppe
----------	----------------------

## V

Var .....	Varianz
$V_S$ .....	Vorhaltemenge – Schalung [m <sup>2</sup> ]
$V_{S,i}$ .....	Vorhaltemenge – Schalung, bezogen auf ein Bauteil bzw. eine Bauteilgruppe [m <sup>2</sup> ]

## Z

ZU<sub>BGK</sub> ..... Zuschlag – Baustellengemeinkosten [%]

ZU<sub>TR</sub> ..... Zuschlag – Transporte [%]

## 15 Literaturverzeichnis

- [www.musiktheater-linz.at](http://www.musiktheater-linz.at). Datum des Zugriffs: 15.09.2011.
- [www.strabag.at](http://www.strabag.at). Datum des Zugriffs: 15.09.2011.
- <http://www.gefilde.de/ashome/vorlesungen/anwendungen/modellbildung/v07/Erwartungswert.pdf>. Datum des Zugriffs: 05.10.2011.
- [http://de.wikipedia.org/wiki/Varianz\\_%28Stochastik%29](http://de.wikipedia.org/wiki/Varianz_%28Stochastik%29). Datum des Zugriffs: 05.10.2011.
- [http://de.wikipedia.org/wiki/Schiefe\\_%28Statistik%29](http://de.wikipedia.org/wiki/Schiefe_%28Statistik%29). Datum des Zugriffs: 06.10.2011.
- [http://www.musiktheater.at/blumau/frameset\\_harand.htm](http://www.musiktheater.at/blumau/frameset_harand.htm). Datum des Zugriffs: 17.10.2011.
- <http://www.faes.de/Basis/Basis-Lexikon/Basis-Lexikon-Multivariate/Basis-Lexikon-Faktorenanalyse/basis-lexikon-faktorenanalyse.html>. Datum des Zugriffs: 10.12.2011.
- <http://www.palisade.com/>. Datum des Zugriffs: 20.09.2011.
- AUSTRIAN STANDARDS INSTITUTE: ÖNORM B 1801-1: Bauprojekt- und Objektmanagement - Teil 1: Objekterrichtung. Wien. 2009.
- AUSTRIAN STANDARDS INSTITUTE: ONR 49001: Risikomanagement für Organisationen und Systeme - Risikomanagement - Umsetzung von ISO 31000 in die Praxis. Wien. 2010.
- AUSTRIAN STANDARDS INSTITUTE: ÖNORM ISO 31000: Risikomanagement - Grundsätze und Richtlinien. Wien. 2010.
- BARTSCH, H.: Taschenbuch Mathematischer Formeln - 20. Auflage. Leipzig, München, Wien. Carl Hanser Verlag, 2004.
- BLECKEN, U. et al.: Kosten im Hochbau - Praxis-Handbuch und Kommentar zur DIN 276 - Baukostenplanung, Projektentwicklung, Nutzungskosten, Recht. Köln. Verlagsgesellschaft Rudolf Müller GmbH & Co. KG, 2007.
- CHAPMAN, C.; WARD, S.: Project Risk Management - Processes, Techniques and Insights. Chichester . John Wiley & Sons Ltd., 2003.
- CHAU, K. W.: The validity of the triangular distribution assumption in Monte Carlo simulation of construction costs: empirical evidence from Hong Kong. In: Construction Management and Economics, 01/1995.
- CHAU, K. W.: Monte Carlo simulation of construction costs using subjective data. In: Construction Management and Economics, 09/1995.
- EICHLER, A.; VOGEL, M.: Leitfaden Stochastik - Für Studierende und Ausübende des Lehramts. Wiesbaden. Vieweg+Teubner Verlag / Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, 2011.
- ERMAKOW, S. M.: Die Monte-Carlo-Methode und verwandte Fragen. München; Wien. R. Oldenbourg Verlag GmbH, 1975.
- F.A. BROCKHAUS GMBH: Brockhaus in fünfzehn Bänden. Oldenburg. Bibliographisches Institut & F.A. Brockhaus AG (PageOne Siemens Nixdorf) und Mannheimer Morgen Großdruckerei und Verlag GmbH, 1999.

- FEIK, R.: Elektronisch gestütztes Risikomanagement im Bauwesen - Ein Konzept eines elektronischen Chancen- und Gefahrenmanagementsystems für Auftraggeber. Dissertation. Innsbruck. Eigendruck, 2006.
- FLEMMING, C.; NETZKER, M.; SCHÖTTLE, A.: Probabilistische Berücksichtigung von Kosten- und Mengenrisiken in der Angebotskalkulation. In: Bautechnik 88 - Heft 2, 02/2011.
- FRITSCH, G.; BLASY, R.: Bewehrungs-Atlas - Eurocode; ÖNORM EN 1992-1-1; ÖNORM B 1992-1-1. St. Margarethen/Lungau. Eigenverlag der Verfasser; Medieninhaber: Blasy Holding- und Verwaltungsges.m.b.H., Rum, 2009.
- FRÜHWITH, R.; REGLER, M.: Monte-Carlo-Methoden - Eine Einführung. Mannheim; Wien; Zürich. B.I. Wissenschaftsverlag - Bibliographisches Institut, 1983.
- GIRMSCHIED, G.; BUSCH, T.: Risikomanagement in Bauunternehmen - Projektrisikomanagement in der Angebotsphase. In: Bauingenieur, 12/2003.
- GIRMSCHIED, G.; BUSCH, T.: Konzept eines ganzheitlichen, quantitativen Risikomanagementmodells für Life-Cycle orientierte Gesamtleistungsanbieter. In: Baubetrieb und Bauwirtschaft - Festschrift Prof. Gert Stadler. Hrsg.: LECHNER, H.; HOFSTADLER, C.; NÖSTLHALLER, R., Graz. Verlag der Technischen Universität Graz, 2004.
- HENGARTNER, W.; THEODORESCU, R.: Einführung in die Monte-Carlo-Methode. München; Wien. Carl Hanser Verlag, 1978.
- HENZE, N.: Stochastik für Einsteiger - Eine Einführung in die faszinierende Welt des Zufalls. Wiesbaden. Vieweg+Teubner Verlag / Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, 2011.
- Hock, N. C.; Harun, Z.; Abdul-Rahman, H. (2000). Cost analysis and formulation of cost models for two-storey buildings construction in Malaysia. In *Proceedings of the 17th ISARC. Taipei, Taiwan: International Symposium on Automation and Robotics in Construction - ISARC.*
- HOFSTADLER, C.: Bauzeit und Baukosten für Stahlbetonarbeiten - Berechnungsmethoden und Anwendung. In: Beton- und Stahlbeton 104 (2009), Heft 5, 05/2009.
- HOFSTADLER, C.: Schalarbeiten - Technologische Grundlagen, Sichtbeton, Systemauswahl, Ablaufplanung, Logistik und Kalkulation. Berlin Heidelberg. Springer-Verlag, 2008.
- HOFSTADLER, C.: Bauablaufplanung und Logistik im Baubetrieb. Berlin Heidelberg New York. Springer Verlag, 2007.
- HOFSTADLER, C.: Beschaffungslogistik für die Phase Bauwerk-Rohbau - Berechnung der Anzahl der Transporte für Stahlbetonarbeiten unter Anwendung der Monte-Carlo-Simulation. In: Festschrift anlässlich des 30-jährigen Bestehens des Instituts für Baubetrieb der Technischen Universität Darmstadt - Baubetriebliche Aufgaben, 2009.
- HOFSTADLER, C.: Verteilungsfunktion für Aufwandswerte bei Schalarbeiten - Herleitung der Verteilungsfunktion aus den Ergebnissen einer Expertenbefragung. Unveröffentlichtes Arbeitspapier. Graz. 2011.



HOFSTADLER, C.: Nachweis von Produktivitätsverlusten am Beispiel der Stahlbetonarbeiten - Literaturansätze im Vergleich zu aktuellen Untersuchungsergebnissen. Tagungsband - 9. Grazer Baubetriebs- und Bauwirtschaftssymposium - Bauablaufstörungen-Baubetriebliche, bauwirtschaftliche und rechtliche Aspekte. Graz. Verlag der Technischen Universität Graz, 2011.

HOFSTADLER, C.: Berechnung der Bauzeit - Systematischer Umgang mit Projektunsicherheiten. In: Netzwerk Bau Fachzeitschrift für Baumanagement und Bauwirtschaft - Wissen & Visionen - Chancen zur erfolgreichen Projektentwicklung erkennen und umsetzen - Fachsymposium 10 Jahre Netzwerk Bau - Tagungsband, 11/2011.

HOFSTADLER, C.: Calculation of Construction Time for Building Projects – Application of the Monte Carlo Method to Determine the Period Required for Shell Construction Works. Konferenzbeitrag - CIB 2010 World Congress. Manchester. CIB, Int. Council for Research and Innovation in Building and Construction, 2010.

HOFSTADLER, C.; FRANZL, G.: Bewehrungsarbeiten im Baubetrieb. Ratschendorf. VÖBV-Verband österreichischer Biege- und Verlegetechnik, 2011.

HOFSTADLER, C.: Monte-Carlo Simulation in der Arbeits-/Projektvorbereitung - Anwendung bei der Berechnung der Bauzeit. In: Tagungsband - 8. Grazer Baubetriebs- und Bauwirtschaftssymposium - Arbeitsvorbereitung für Bauprojekte - Nutzen der Arbeitsvorbereitung für den Projekterfolg, 2010.

HULETT, D. T.: Project Cost Risk Analysis. [http://www.projectrisk.com/White\\_Papers/Project\\_Cost\\_Risk\\_Analysis.pdf](http://www.projectrisk.com/White_Papers/Project_Cost_Risk_Analysis.pdf). Datum des Zugriffs: 14.09.2011.

LECHNER, H.; LIEBENAU, S.: PM Teil 7a - Kostenplanung. Graz. Verlag der Technischen Universität Graz, 2010.

LINK, D.; STEMPKOWSKI, R.: Grundlagen, praktische Anwendungen und Nutzen des Risikomanagements im Bauwesen. In: Risikomanagement in der Bauwirtschaft - Baubetriebs- und Bauwirtschaftssymposium 02. April 2004 - Tagungsband. Hrsg.: NÖSTLTHALLER, R.; FÜRST, A., Graz. Verlag der Technischen Universität Graz, 2004.

MARKOWITZ, J.: Kommunikation über Risiken. In: Schweizerische Zeitschrift für Soziologie, 1990.

MEDGENBERG, J.; NEMUTH, T.: Potential der Monte-Carlo-Simulation für Risikoanalyse im Projektmanagement. In: Zukunftspotential Bauwirtschaft - Baubetrieb Bauwirtschaft Baumanagement - Tagungsband - 1. Internationaler BBB-Kongress - Dresden, 09/2011.

PALISADE CORPORATION: Benutzerhandbuch für @Risk - Risikoanalyse- und Simulations Add-In für Microsoft Excel. Ithaca, NY USA. 2010.

RAABER, N.: Schriftenreihe des Instituts für Baubetrieb und Bauwirtschaft - Heft 15: Beitrag zu Ausschreibung und Vergabe von Bauleistungen. Graz. Eigenverlag der Technischen Universität Graz, 2003.

SANDER, P.; SPIEGL, M.; SCHNEIDER, E.: Die exakte Zahl - Gedanken im Umgang mit Unschärfen. In: Die Wirtschaftliche Seite des Bauens - Festschrift zum 60. Geburtstag von Rainer Wanninger. Hrsg.: Braunschweig. Institut für Bauwirtschaft und Baubetrieb der Technischen Universität Braunschweig, 2010.

SCHACH, R.: Stochastische Investitionskostenberechnung für Verkehrsinfrastrukturprojekte. Fachvortrag auf der 5. Dresdner Fachtagung Transrapid am 29. September 2005. Dresden. 2005.

SCHACH, R.; OTTO, J.: Baustelleneinrichtung - Grundlagen – Planung – Praxishinweise – Vorschriften und Regeln. Wiesbaden. Vieweg+Teubner Verlag/Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, 2011.

SOBOL, I. M.: Die Monte-Carlo-Methode. Berlin. VEB Deutscher Verlag der Wissenschaften, 1971.

TAUTSCHNIG, A.; FRÖCH, G.; SANDER, P.: Erfahrungen mit probabilistischen Kostenermittlungen im Hochbau. In: bauaktuell - Baurecht - Baubetriebswirtschaft - Baumanagement, September/2010.

TOURAN, A.; WISER, E. P.: Monte Carlo Technique with Correlated Random Variables. In: Journal of Construction Engineering and Management, 05-06/1992.

WERNER, A.: Datenbankgestützte Risikoanalyse von Bauprojekten - Eine Methode zur rechnergestützten Monte-Carlo-Simulation des Bauablaufes für die Risikoanalyse im Bauunternehmen. Dissertation an der Universität Rostock. Rostock. 2002.

WIGGERT, M.: Risikomanagement von Betreiber- und Konzessionsmodellen. Dissertation. Graz. 2009.