

Diploma Thesis

# **Distinctions of JCSS Probabilistic Model Code and EN 1990**

Submitted in satisfaction of the requirements for the degree of  
Diplom-Ingenieur  
of the TU Wien, Faculty of Civil Engineering

---

DIPLOMARBEIT

## **Unterschiede JCSS probabilistischer Model Code und EN 1990**

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines  
Diplom-Ingenieurs  
eingereicht an der Technischen Universität Wien, Fakultät für Bauingenieurwesen

von

**Resat Can Üstündag**

Matr.Nr.: 01328595

unter der Anleitung von

Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. **Andreas Kolbitsch**

Institut für Hochbau, Baudynamik und Gebäudetechnik  
Forschungsbereich Hochbaukonstruktionen und Bauwerkserhaltung  
Technische Universität Wien,  
Karlsplatz 13/208, A-1040 Wien

# Kurzfassung

Diese Arbeit vergleicht qualitativ und quantitativ zwei Regelwerke der Tragwerksplanung. Diese Regelwerke sind der Eurocode EN 1990, Grundlagen der Tragwerksplanung und der JCSS probabilistic Model Code (PMC). Im Allgemeinen können EN 1990 mit semi-probabilistischen Verfahren und der PMC mit voll probabilistischen Verfahren assoziiert werden.

Der PMC bietet eine innovative Lösung mit den voll probabilistischen Ansätzen und stochastischen Daten der Einwirkungen und Materialeigenschaften. In dieser Arbeit wird untersucht, ob der PMC entweder zu Materialeinsparungen oder zu günstigerem statischem Systemverhalten bei besserem oder gleichbleibendem Sicherheitsniveau führen kann.

Im ersten Teil dieser Arbeit werden die Inhalte der Regelwerke gegenübergestellt. Damit werden die Ansätze und die wesentlichen Elemente beider Regelwerke in den Mittelpunkt gerückt. Besonders die Festlegung der Basisvariablen, Nachweisverfahren und Zuverlässigkeitsmethoden werden berücksichtigt.

Im zweiten Teil der Arbeit werden zwei numerische Beispiele ausgeführt, um die möglichen Vorteile bzw. Nachteile zwischen den Regelwerken zu veranschaulichen. Für die Berechnungen nach EN 1990 kommt die Software „DLUBAL Rstab“ zum Einsatz. Bei den voll probabilistischen Berechnungen werden die drei üblichen Zuverlässigkeitsmethoden (First Order Reliability Method, Second Order Reliability Method und direkte bzw. crude Monte Carlo Simulation) mithilfe der Software „STUREL Comrel“ berücksichtigt. Im ersten Beispiel wird der Bewehrungsgrad der Längsbewehrung eines Einfeldträgers aus Stahlbeton untersucht, um die Materialersparnis zu analysieren. Im zweiten Beispiel wird anhand eines Stahlkragarms eine etwaige Steigerung der Auskrugung in Abhängigkeit des zugrunde gelegten Regelwerks ermittelt.

Die Ergebnisse der Arbeit zeigen, dass der PMC zuverlässiger, aber aufwendiger ist. In den numerischen Beispielen konnte mit dem PMC keine Materialreduktion und kein günstigeres statisches Systemverhalten erzielt werden.

## Abstract

This study is a qualitative and quantitative comparison of two regulations in terms of structural design. These regulations are the Eurocode EN 1990, Basics of Structural Design and the JCSS Probabilistic Model Code (PMC). Generally, EN 1990 is associated with semi-probabilistic method and PMC with fully probabilistic method.

The PMC offers an innovative solution with the fully probabilistic approaches and stochastic data of the load effects and material properties. This work examines whether the PMC can lead to material reductions or more convenient static system behavior at a better or constant reliability level.

In this study, both regulations' content are compared in order to highlight their respective approaches and essential elements. In particular, the determination of the basic variables, the verification and reliability methods are taken into consideration.

In the final section of the study, two numerical examples were carried out to illustrate the possible advantages and/or disadvantages between the two regulations. The software "DLUBAL Rstab" is used for the calculations according to EN 1990. In the fully probabilistic calculations, three common reliability methods (first order reliability method, second order reliability method and direct or crude Monte Carlo simulation) are taken into account using the "STUREL Comrel" software. In the first example, a single span beam made of reinforced concrete is examined as a function of the area of the longitudinal reinforcement and then a steel cantilever beam is examined for its cantilever length.

The results of the study show that the PMC is a more reliable method yet more challenging. In the numerical examples, no material reduction and no additional convenient static system behavior could be achieved with the PMC.

# Inhalt

Inhalt.....	1
Abkürzungsverzeichnis.....	5
1 Einleitung.....	7
1.1 Motivation.....	7
1.2 Ziel der Arbeit.....	7
2 Grundlagen.....	9
2.1 Europäische Normen und Regelwerke.....	9
2.1.1 Historie und Entwicklung.....	9
2.1.1.1 Die frühe Historie der europäischen Normen und Regelwerke.....	9
2.1.1.2 Beginn des Eurocodes.....	9
2.1.1.3 Entstehung des Eurocodes 0 und Überarbeitung der Reihenfolge.....	10
2.1.1.4 Die europäischen Vornormen bzw. ENVs.....	10
2.1.1.5 Die Umwandlung der ENVs in Eurocodes.....	10
2.1.2 Aufbau bzw. Konzept der Eurocodes.....	11
2.1.2.1 Anwendung der europäischen Regelwerke im nationalen Rahmen.....	12
2.1.3 Ziel der Eurocodes.....	13
2.2 JCSS Organisation.....	14
2.2.1 Historie.....	14
2.2.2 Aufbau des JCSS.....	14
2.2.2.1 Working Parties and Task Groups des JCSS.....	14
2.2.3 Ziel des JCSS.....	15
3 Stochastische Grundlagen.....	16
3.1 Wahrscheinlichkeitsrechnung.....	16
3.2 Zufallsvariable.....	16
3.2.1 Verteilungsfunktion und Wahrscheinlichkeitsdichte einer Zufallsvariable.....	16
4 Grundsätze der Tragwerksplanung.....	20
4.1 Anforderungen.....	21
4.1.1 Grenzzustände.....	22
4.1.1.1 Grenzzustand der Tragfähigkeit.....	22
4.1.1.2 Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit.....	24
4.1.1.3 Grenzzustand der Dauerhaftigkeit.....	24
4.1.2 Robustheit.....	25
4.1.3 Nachhaltigkeit.....	25
4.2 Ansätze der Tragwerksplanung bzw. Sicherheitskonzepte.....	26

4.2.1	Die traditionellen Sicherheitskonzepte .....	26
4.2.1.1	Empirische Bemessung.....	26
4.2.1.2	Das deterministische Sicherheitskonzept.....	27
4.2.2	Die modernen Sicherheitskonzepte .....	28
4.2.2.1	Das semi-probabilistische Sicherheitskonzept.....	28
4.2.2.2	Das voll probabilistische Sicherheitskonzept.....	32
5	Grundlagen der Zuverlässigkeit .....	33
5.1	Näherungsverfahren.....	33
5.2	Monte-Carlo Simulation .....	35
6	Vergleich von EC 0 und JCSS probabilistischer Model Code.....	36
6.1	EN Eurocode 1990, Grundlagen der Tragwerksplanung .....	36
6.2	JCSS probabilistischer Model Code.....	36
6.3	Anforderungen.....	37
6.3.1	Die Anforderungen in EN 1990 .....	37
6.3.1.1	Die grundlegenden Anforderungen .....	37
6.3.1.2	Behandlung der Zuverlässigkeit.....	37
6.3.1.3	Geplante Nutzungsdauer.....	38
6.3.1.4	Dauerhaftigkeitsanforderung.....	38
6.3.1.5	Qualitätsmanagement.....	38
6.3.2	Die Anforderungen im PMC .....	39
6.3.2.1	Die grundlegenden Anforderungen .....	39
6.3.2.2	Behandlung der Zuverlässigkeit.....	39
6.3.2.3	Dauerhaftigkeitsanforderungen.....	39
6.3.3	Die Anforderungen im Vergleich .....	40
6.4	Maßgebende Grenzzustände.....	40
6.4.1	Maßgebende Grenzzustände in EN 1990 .....	40
6.4.1.1	Bemessungssituationen in EN 1990.....	41
6.4.1.2	Bemessung nach Grenzzustände in EN 1990.....	41
6.4.2	Maßgebende Grenzzustände im PMC .....	41
6.4.2.1	Bemessungssituationen im PMC.....	41
6.4.2.2	Bemessung nach Grenzzustände im PMC.....	41
6.4.3	Maßgebende Grenzzustände im Vergleich .....	42
6.5	Basisvariable.....	42
6.5.1	Basisvariablen in EN 1990 .....	44
6.5.1.1	Einwirkungen und Umwelteinflüsse .....	44

6.5.1.2	Eigenschaften von Baustoffen, Bauprodukten und Bauteilen .....	48
6.5.1.3	Geometrische Angaben .....	49
6.5.2	Basisvariablen im PMC.....	49
6.5.2.1	Einwirkungsmodelle .....	50
6.5.2.2	Material und geometrische Modelle.....	53
6.5.3	Basisvariablen im Vergleich .....	53
6.6	Nachweisverfahren .....	53
6.6.1	Nachweisverfahren in EN 1990 .....	53
6.6.1.1	Einwirkungsseite.....	54
6.6.1.2	Widerstandsseite.....	56
6.6.1.3	Nachweisverfahren für den GZT .....	58
6.6.1.4	Nachweisverfahren für den GZG .....	61
6.6.2	Nachweisverfahren im PMC.....	63
6.6.2.1	Nachweisverfahren für den GZT .....	65
6.6.2.2	Nachweisverfahren für den GZG .....	66
6.6.3	Nachweisverfahren im Vergleich.....	66
6.7	Zuverlässigkeitsmethoden.....	67
6.7.1	Zuverlässigkeitsmethoden in EN 1990 .....	67
6.7.2	Zuverlässigkeitsmethoden im PMC .....	68
6.7.3	Zuverlässigkeitsmethoden im Vergleich .....	68
7	Vergleiche mithilfe numerischer Beispiele.....	69
7.1	Einfeldträger unter Gleichlast.....	69
7.1.1.1	Lösung nach EN 1990 .....	70
7.1.1.2	Lösung nach dem PMC.....	71
7.2	Kragträger unter Gleichlast .....	72
7.2.1	Lösung nach EN 0.....	73
7.2.2	Lösung nach dem PMC .....	74
7.3	Interpretation der Ergebnisse .....	75
8	Zusammenfassung und Schlussfolgerung .....	77
	Abbildungsverzeichnis .....	80
	Tabellenverzeichnis .....	81
	Literaturverzeichnis .....	82
	ANHANG A: Ausdrucksprotokoll von Rstab für Beispiel 1 .....	84
	ANHANG B: Ausdrucksprotokolle von Comrel für Beispiel 1.....	89
	ANHANG C: Ausdrucksprotokoll von Rstab für Beispiel 2.....	103

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.  
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.



## Abkürzungsverzeichnis

bzw	<i>beziehungsweise</i>
CEB	<i>Euro-International Committee for Concrete</i>
CEN	<i>Europäisches Komitee für Normung</i>
DLS	<i>Grezzustand der Dauerhaftigkeit</i>
EC	<i>Eurocode</i>
ECCS	<i>European Convention for Constructional Steelwork</i>
EN	<i>Europäische Norm</i>
ENV	<i>Europäische Vornorm</i>
EU	<i>Europäische Union</i>
FIB	<i>International Federation for Prestressing</i>
FORM	<i>First Order Reliability Method</i>
GZG	<i>Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit</i>
GZT	<i>Grenzzustand der Tragfähigkeit</i>
i.d.R.	<i>in der Regel, in der Regel</i>
IABSE	<i>International Association for Bridge and Structural Engineering</i>
MCS	<i>Monte-Carlos Simulation</i>
NAD	<i>National Applications Documents</i>
NDP	<i>Nationally Determined Parameter</i>
PMC	<i>JCSS probabilistischer Model Code</i>
SORM	<i>Second Order Reliability Method</i>
TG	<i>Task Group</i>
TWP	<i>Tragwerksplanung</i>
v. Chr.	<i>vor Christus</i>
WP	<i>Working Party</i>
z.B.	<i>zum Beispiel</i>



## Genderhinweis

Zur besseren Lesbarkeit werden auf dieser Website personenbezogene Bezeichnungen, die sich zugleich auf Frauen und Männer beziehen, generell nur in der im Deutschen üblichen männlichen Form angeführt.

Dies soll jedoch keinesfalls eine Geschlechterdiskriminierung oder eine Verletzung des Gleichheitsgrundsatzes zum Ausdruck bringen.

# 1 Einleitung

## 1.1 Motivation

Die Baubranche ist im Sinne der Wertschöpfung einer der wichtigsten Sektoren. Ihre Wertschöpfung beträgt in Österreich 6,9 % und durchschnittlich in den Mitgliedsstaaten der europäischen Union (EU 27) 5,6 % [1]. Das bedeutet, Innovationen im Bauwesen sind aus wirtschaftlicher Sicht äußerst wesentlich.

In Europa gelten die Eurocodes als Standard im Bauwesen und jeder Mitgliedsstaat muss sie während der Planungs- und Errichtungsphase einhalten. Wie in vielen Bereichen des Bauwesens ist es aus Innovationsgründen nötig, dass neue Ansätze und Überarbeitungen für diesen Regelwerken entstehen. Der erste Teil der Eurocodes ist EN 1990. Er behandelt die Grundlagen der Tragwerksplanung mit dem Ansatz des semi-probabilistischen Nachweisverfahrens, das Teilsicherheitsbeiwerte und Kombinationsbeiwerte für die Kalibration der probabilistischen Methoden verwendet. Auf der anderen Seite bietet der JCSS probabilistic Model Code (PMC) einen neuen probabilistischen Code für das probabilistische Nachweisverfahren. Der PMC kann sowohl als Regeln und Erklärungen für den voll probabilistischen Ansatz der TWP auch als Hintergrund für die nicht-probabilistischen Regelwerke zum Einsatz kommen.

Wegen fehlenden stochastischen Daten und der aufwendigen Anwendung sind die voll probabilistischen Methoden heutzutage nicht sehr populär werden und nur in schwierigeren Bauvorhaben aufgrund ihrer höheren Zuverlässigkeit eingesetzt.

Der PMC ist von großer Bedeutung für die probabilistischen Ansätze, da er viele wesentliche Informationen für die probabilistischen Berechnungen zusammenbringt. Unter diesen Umständen gewinnt der PMC an Bedeutung. Mit fortschreitenden Innovationen im Bauwesen wird immer interessanter, was er inhaltlich im Vergleich zu EN 1990 bietet und ob eine bessere Wirtschaftlichkeit erzielt werden kann.

## 1.2 Ziel der Arbeit

Die Zuverlässigkeitsbewertungen und Sicherheitsphilosophie der Tragwerke gewinnen zunehmend an Bedeutung. Die Geschichte des Bauens mit empirischen Methoden reicht vom deterministischen und semi-probabilistischen Verfahren bis zum voll-probabilistischen Verfahren. Joint Committee on Structural Safety beschäftigt sich seit seiner Gründung im Jahr 1971 mit der konstruktiven Sicherheit und der letzte Entwurf des probabilistischen Models Code wurde im Jahr 2000 publiziert. Außerdem ist der Eurocode „EN 1990 Eurocode, Grundlagen der Tragwerksplanung“ bzw. als EC 0 in Fachkreisen bekannt.

Mit der folgenden Arbeit wird versucht, diese zwei Codes einander gegenüberzustellen. Damit soll aufgezeigt werden, was mit dem JCSS Model Code möglich ist, zu zeigen. Hier gilt es zu untersuchen, ob der JCSS Model Code im Bausektor zu höherer Wirtschaftlichkeit und geringerem Materialeinsatz führen kann.

Darüber hinaus ist das Ziel der Arbeit, bei besserem oder gleichbleibendem Sicherheitsniveau, mögliche Materialeinsparungen zu überprüfen.

Nachdem der Literaturvergleich zwischen JCSS Model Code und Eurocode 0 durchgeführt wurde, werden numerische Beispiele durchgerechnet. Die Ergebnisse der numerischen Beispiele

werden verglichen und interpretiert, um die Wirtschaftlichkeit und Materialeinsparung besser hervorheben zu können.

## 2 Grundlagen

### 2.1 Europäische Normen und Regelwerke

#### 2.1.1 Historie und Entwicklung

##### 2.1.1.1 Die frühe Historie der europäischen Normen und Regelwerke

Die Erstellung der Eurocodes hat einen Entstehungsgrund, welcher uns ins Jahr 1957 und zu den Römischen Verträgen (The Treaty of Rome, 1957) führt. Laut Artikel 95 der Römischen Verträge wurden Verwaltungsmaßnahmen in den Mitgliedstaaten für das Funktionieren des europäischen Binnenmarktes erlassen und mithilfe der Einheitlichen Europäischen Akte (EEA) verstärkt [2]. Diese zwei Akte repräsentieren den Hauptgrund für die Erstellung der europäischen Normen und Regelwerke.

Seit den 1950er Jahren haben sich die Organisationen International Federation for Prestressing (FIB), Comité européen du béton - European Committee for Concrete (später: Comité européen du béton) (CEB), International Association for Bridge and Structural Engineering (IABSE), European Convention for Constructional Steelwork (ECCS) an der Entwicklung europäischer Codes im Bauwesen beteiligt. Diese Organisationen waren Mitglieder des Liaison Committee for International Associations for Civil Engineering und haben 1971 das Joint Committee on Composite Structures (JCSS) gegründet [3]. Diese Bemühungen können als erste seriöse Versuche für eine gemeinsame europäische Norm bewertet werden.

##### 2.1.1.2 Beginn des Eurocodes

Das Jahr 1975 wird als Beginn des Eurocodes betrachtet. In diesem Jahr wurde in Artikel 95 der Römischen Verträge die Beseitigung technischer Handelshemmnisse und Harmonisierung technischer Normen festgelegt.[4, 5].

1981 gab es zunächst 4 Eurocodes: Eurocode 1: Grundlagen der Tragwerksplanung, Eurocode 2: Entwurf, Berechnung, und Bemessung von Stahlbetonbauten, Eurocode 3: Entwurf, Berechnung und Bemessung von Stahlbauten und Eurocode 4: Entwurf, Berechnung und Bemessung von Stahl-Beton-Verbundbauten. Jeder Entwurf wurde von unterschiedlichen Mitgliedern des Liaison Committee for International Associations for Civil Engineering entworfen. CEB und FIB waren verantwortlich für Eurocode 2. ECCS hat Eurocode 3 und JCSS Eurocode 4 geleitet. Wegen dauerhaft notwendiger Überarbeitung und unzureichendem Inhalt der Codes scheiterte allerdings der erste Erstellungsversuch [3].

Schlussendlich wurden die Eurocodes 1 bis 4 im Jahr 1984 von der Commission of the European Communities mit Hilfe des Steering Committee for Eurocodes publiziert. Die Vorlagen waren auf Deutsch, Französisch und Englisch verfasst. Außerdem hatte die Studie für Eurocode 8: Auslegung von Bauwerken gegen Erdbeben im Jahr 1984 begonnen. Jedoch war laut Steering Committee for Eurocodes die Studie für fünf Eurocodes nicht ausreichend. Das Komitee hat eigentlich im Jahr 1983 auch Konzepte für Eurocode 5: Entwurf, Berechnung und Bemessung von Holzbauten, Eurocode 6: Entwurf, Berechnung und Bemessung von Mauerwerksbauten und Eurocode 7: Entwurf, Berechnung und Bemessung in der Geotechnik verlangt. Der Eurocode für Einwirkungen war bis 1988 nicht vorgesehen und wurde erst im Jahr 1990 begonnen [3]. Deswegen wurde die Reihenfolge der Eurocodes später überarbeitet.

### 2.1.1.3 Entstehung des Eurocodes 0 und Überarbeitung der Reihenfolge

Bevor es den Eurocode 0 gab, waren die Bestimmungen über Grundlagen der Tragwerksplanung in den ENV 1991 bis 1996 aufgeteilt. Die Versuche, diese Bestimmungen zusammenzuführen, haben im Jahr 1997 die Entstehung des Eurocodes 0 begründet.

Der Eurocode 1 behandelte das Thema Einwirkungen. Aber auch dieser Teil sollte überarbeitet werden. Denn er musste auch unterschiedliche Belastungsfälle berücksichtigen, welche z.B. während Erdbeben oder Bränden auftauchen können. Seitdem ist der Eurocode 1 mit „Einwirkungen auf Tragwerke“ betitelt [3].

### 2.1.1.4 Die europäischen Vornormen bzw. ENVs

Besonders wichtig für die Entwicklung der Eurocodes ist die Construction Products Directive (CPD), die im Jahr 1989 erlassen wurde. Die Richtlinie hatte das sehr wichtige Ziel, technische Barrieren im Handel mit Bauprodukten zwischen Mitgliedstaaten zu beseitigen.

In den 1990er Jahren gab es zahlreiche Fortschritte in der Entwicklung der gemeinsamen europäischen Normen im Bauwesen. Eine der Wichtigsten war, dass die Erstellung der Eurocodes vom europäischen Komitee für Normung (CEN) übernommen wurde [5]. CEN trägt die Verantwortung für die Festlegung und die Entwicklung der Europäischen Regelwerke. Das Komitee wurde offiziell von der Europäischen Union (EU) und der Europäischen Freihandelsassoziation (EFTA) anerkannt. Das Ziel des Komitees ist eigentlich, die nationalen Regelwerke der 34 Mitglieder der EU zu vereinigen [6]. CEN hat anschließend ein Führungskomitee beauftragt, welches Technical Committee (TC) 250 heißt, und das CEN/TC 250 richtete ein Subkomitee für jeden Eurocode ein und erstellte den Eurocode 0 selbst. Die Organisation von CEN/TC 250 ist in Abbildung 1 dargestellt. Das Komitee hat im Jahr 1991 die Europäische Vornorm (ENV) für Eurocode 2, im Jahr 1992 für Eurocode 3 und einen Entwurf für Eurocode 4 erstellt bzw. publiziert. Von 1992 bis 1998 wurde eine Vielzahl von ENVs herausgegeben. Es gab am Ende insgesamt 62 Vornormen. In diesen ENVs wurden Wertebereiche in Klammern angegeben, damit die Mitgliedstaaten die Werte z.B. Windlasten, Schneelasten, Erdbebenlasten usw. abhängig von regionalen Unterschieden frei wählen konnten [3].

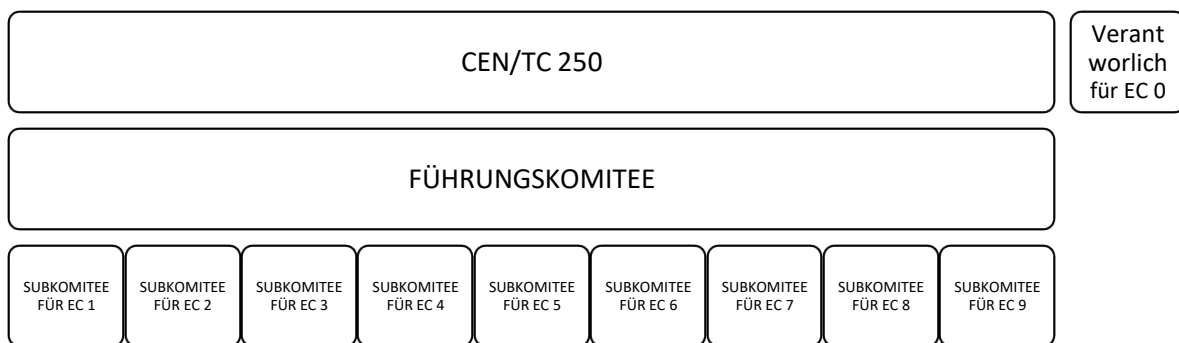


Abbildung 1: Organisation von CEN/TC 250 [5]

### 2.1.1.5 Die Umwandlung der ENVs in Eurocodes

Nach der Publikation der ENVs erwartete das CEN/TC 250 eine schwierige Phase, da die Europäische Union das Vertrauen in den Prozess verlor und die Kosten höher als erwartet waren. Deswegen wollte die EU die Umwandlung nicht mehr finanziell unterstützen. Trotzdem gab das

CEN/TC 250 im Jahr 1994 mit einer Absichtserklärung bekannt, dass -unter Voraussetzung einer ausreichenden Finanzierung - das Komitee die Eurocodes für Bauten bis Ende 1998 und den Eurocode für Brücken bis Dezember 2001 fertigstellen könnte. Das Komitee konnte letzten Endes die Erstellungsfrist aber nicht einhalten und die Eurocodes für Bauten konnten erst im Jahr 2004, der Eurocode für Brücken erst im Jahr 2005, veröffentlicht werden [3]. Im Jahr 2008 standen bereits alle 58 Teile der Eurocodes zur Verfügung und in den kommenden Jahren mussten die Mitgliedstaaten alle anderen Normen, die den Eurocodes inhaltlich nicht entsprachen, entweder überarbeiten oder zurückziehen. In Österreich wurden die Eurocodes zuerst als ÖNORM EN herausgegeben und Ende Juni 2009 endete die Frist für den Übergang von den alten nationalen Normen zu den Eurocodes [2].

## 2.1.2 Aufbau bzw. Konzept der Eurocodes

Nach der Fertigstellung der Europäischen Normen gibt es 10 Hauptgruppen für die Tragwerksplanung. In Tabelle 1 werden die Eurocodes für Tragwerksplanung dargestellt.

Tabelle 1: Aufbau der Eurocodes

EN Nummer	EC	Bezeichnung
EN 1990	EC 0	Grundlagen der Tragwerksplanung
EN 1991	EC 1	Einwirkungen auf Tragwerke
EN 1992	EC 2	Entwurf, Berechnung und Bemessung von Stahlbetonbauten
EN 1993	EC 3	Entwurf, Berechnung und Bemessung von Stahlbauten
EN 1994	EC 4	Entwurf, Berechnung und Bemessung von Stahl-Beton-Verbundbauten
EN 1995	EC 5	Entwurf, Berechnung und Bemessung von Holzbauten
EN 1996	EC 6	Entwurf, Berechnung und Bemessung von Mauerwerksbauten
EN 1997	EC 7	Entwurf, Berechnung und Bemessung in der Geotechnik
EN 1998	EC 8	Auslegung von Bauwerken gegen Erdbeben
EN 1999	EC 9	Entwurf, Berechnung und Bemessung von Aluminiumkonstruktionen

Die Eurocodes bestehen insgesamt aus 58 Teilen. Die Eurocodes 2 bis 6 und der Eurocode 9 sind auch bekannt als die konstruktiven Codes für Entwurf, Berechnung und Bemessung. Für die konstruktiven Codes gibt es eine strukturelle Ordnung. Die ersten Teile EN 199X-1-1 inkludieren die allgemeinen Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau. Die folgenden Teile beziehen sich auf Tragwerksbemessung für den Brandfall, Bemessungs- und Konstruktionsregeln für Brücken und spezifische Themen [7]. Die Struktur ist in Tabelle 2 abgebildet.

Tabelle 2: Struktur der konstruktiven Eurocodes [7]

Teil	Inhalt
EN 199X-1-1	Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau
EN 199X-1-2	Allgemeine Regel – Tragwerksbemessung für den Brandfall
EN 199X-2	Brücken – Bemessungs- und Konstruktionsregeln
EN 199X-3xx	Spezifische Themen

Die Eurocodes sind das Ergebnis einer langjährigen Arbeit. Die Zusammenstellung ihrer Inhalte ist dementsprechend ausführlich und durchdacht. Die Regelwerke sind in unterschiedlicher Form aufeinander bezogen [8]. Die Verbindungen zwischen den Eurocodes finden sich in Abbildung 2.

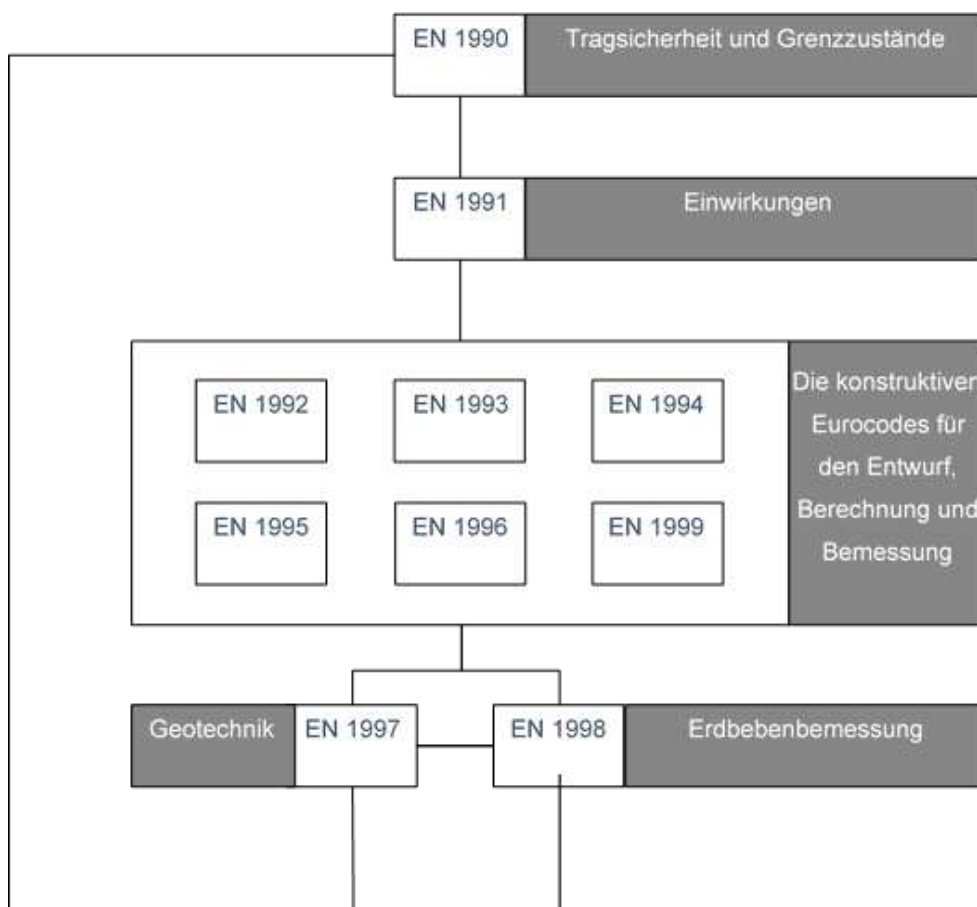


Abbildung 2: Links zwischen den Eurocodes [9]

### 2.1.2.1 Anwendung der europäischen Regelwerke im nationalen Rahmen

Die ENVs waren mit National Applications Documents (NAD) verknüpft. Diese Verknüpfung ermöglichte die Umsetzung der Vornormen in den Mitgliedstaaten. Die NADs berücksichtigen die nationalen Werte der einzelnen Staaten.

Nach der Erstellung der ECs wurde NADs durch National Annexes ersetzt. Die Normen im nationalen Kontext bestehen aus einem ursprünglichen Teil des ECs, einer nationalen Titelseite, einem nationalen Vorwort und einem nationalen Anhang (National Annex). Die Umsetzung wurde in Abbildung 3 dargestellt. In jedem Mitgliedstaat wurde ein National Standard Body (NSB) von

der European Commission mit der Umsetzung des nationalen Anhangs betraut, was z.B. in Österreich das Austrian Standards Institute (ASI) ist [10].

Die Eurocodes wurden in den Mitgliedstaaten mit nationalen Festlegungen publiziert. Würden wir Österreich als Musterbeispiel nehmen, werden die Festlegungen in 2 Teile aufgeteilt. Sie werden ÖNORM EN 199x-x-x und ÖNORM B 199x-x-x genannt. ÖNORM EN 199x-x-x enthält den Eurocode und zusätzlich die nationale Titelseite und das nationale Vorwort (Abbildung 3). Der nationale Anhang wird als ÖNORM B 199x-x-x bezeichnet. Hier ist der nationale Anhang besonders wichtig, da er die Nationally Determined Parameter (NDP) beinhaltet. Die NDPs sind länderspezifische Zahlenwert z.B. Windlasten und nur dort gültig, wo sie erlassen wurden. Im Folgenden wird der Inhalt des nationalen Anhangs aufgelistet:

- NDPs,
- Erläuterungen,
- Weitere Anwendungsregeln. [7]

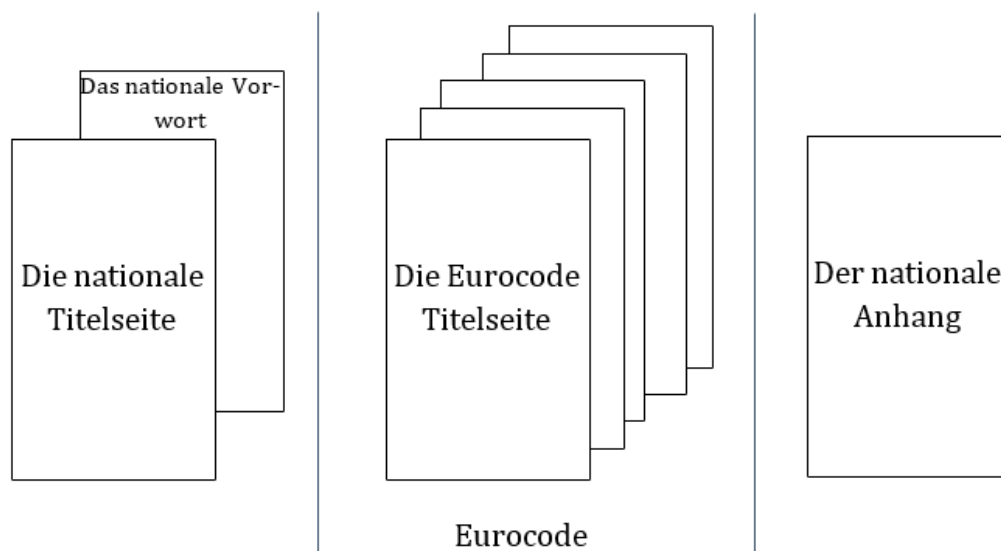


Abbildung 3: Nationale Fassung eines Eurocodes

### 2.1.3 Ziel der Eurocodes

Der Bausektor ist wegen seiner wirtschaftlichen Bedeutung besonders wichtig für die EU-Strategien, wie den Binnenmarkt. Fast 20 Millionen Menschen sind im Sektor angestellt und er erwirtschaftet mehr als 10% des Bruttoinlandsprodukts (BIP) der EU [8, 11].

Am 3. März 2010 wurde von der Europäischen Union eine neue Wirtschaftsstrategie von der Europäischen Union erlassen. Mit der Strategie, *Europa 2020*, wurde auf ein „intelligentes, nachhaltiges und integratives Wachstum“ [12] bis ins Jahr 2020 abgezielt. Die gemeinsamen Normen in Europa sind eine entscheidende Unterstützung für die Umsetzung dieser Strategie. Die wesentlichen Punkte, die dazu über Europäische Normen im Bausektor zur Anwendung kommen, sind:

- Vollendung des europäischen Binnenmarktes für Bauprodukte,
- Schaffung eines transparenten Systems für Wettbewerbsfähigkeit,
- Garantieren der Gesundheit und Sicherheit der EU-Bürger,



- Wertschöpfung durch Reduktion der Produktions- und Verkaufskosten,
- Weitergabe und Verbreitung der Technologie zwischen Mitgliedstaaten,
- Ermöglichen der freien Bewegung der Ingenieurleistungen. [8]

Darüber hinaus steht folgende Zielformulierung in der EN 1990:

*„Das Ziel des Programms war die Beseitigung technischer Handelshemmnisse und die Harmonisierung technischer Normen“ [13].*

## 2.2 JCSS Organisation

### 2.2.1 Historie

JCSS ist ein im Jahr 1971 gegründetes Liaison Komitee für Sicherheit im Bauwesen. Das Komitee ist eine gemeinsame Einrichtung von 6 internationalen Organisationen:

- **IABSE**, International Association for Bridge and Structural Engineering,
- **CIB**, International Council for Research and Innovation in Building and Construction,
- **ECCS**, The European Convention for Constructional Steelwork,
- **FIB**, The International Federation for Structural Concrete,
- **RILEM**, Reunion Internationale des Laboratoires et Experts des Materiaux,
- **IASS**, The International Association for Shell and Spatial Structures. [14]

Das Komitee war in früheren Jahren im Bereich der gemeinsamen europäischen Regelwerke sehr aktiv. Der Zweck des Komitees war von Anfang an die Verbesserung des Grundlagenwissens über Sicherheit und Zuverlässigkeit im Bauwesen. Das JCSS führt seit 1971 jährlich 2 Versammlungen durch. Die Ziele dieser Versammlungen sind, wissenschaftliche Artikel über das Thema „Sicherheit im Bauwesen“ zu bewerten bzw. zu diskutieren und eigene Unterlagen vorzubereiten bzw. zu veröffentlichen [15].

### 2.2.2 Aufbau des JCSS

Das JCSS hat einen Vorstand, dem der Präsident vorsteht. Jede oben genannte Organisation hat einen Vertreter im Vorstand. Die Organisationen wählen die Vertreter unabhängig. Die verbleibenden Mitglieder des Vorstands sind die „Reporter“, die die Working Parties (WPs) und Task Groups (TGs) vertreten. Die Arbeitsgruppen werden in Kapitel 2.2.2.1 dargestellt. Die Amtsdauer aller Mitglieder ist 5 Jahre. Sie dürfen aber wiedergewählt werden. Der Vorstand trifft sich jährlich einmal, um sich mit den Entscheidungen des Liaison Komitees auseinanderzusetzen.

#### 2.2.2.1 Working Parties and Task Groups des JCSS

Laut eigenen Angaben des JCSS [15] gibt es zurzeit 3 WPs und 1 TG in der JCSS Organisation. Diese sind WP1 – The probabilistic Model Code, WP2 - Risk-Informed Decision Support for Systems Involving Structures, WP3 - The JCSS Continuing Education and Advanced School und TG1 - The JCSS Special Task Force on Resilience and Sustainability in the Built Environment (Tabelle 3). Der Vertreter einer WP bzw. TG informiert den Vorstand, was angestrebt wird und geplant ist.

Tabelle 3: WPs und TG der JCSS [15]

<b>Nummer</b>	<b>Bezeichnung</b>
WP1 – Working Party 1	The probabilistic Model Code PMC
WP2 – Working Party 2	- Risk-Informed Decision Support for Systems Involving Structures
WP3 – Working Party 3	The JCSS Continuing Education and Advanced School
TG1 – Task Group 1	The JCSS Special Task Force on Resilience and Sustainability in the Built Environment

### 2.2.3 Ziel des JCSS

Die JCSS Organisation setzt sich seit ihrer Gründung mit der konstruktiven Zuverlässigkeit und Risikobewertung im Bausektor auseinander. Für diese Themen versucht die Organisation die allgemeinen und vornormativen Studien zu vereinheitlichen, zu koordinieren und fertigzustellen.

Das Komitee ist der Ansicht, dass die rein-probabilistischen Methoden für den konstruktiven Entwurf und die konstruktive Bewertung der einzige Entscheidungsprozess sein müssen [14].

Das JCSS [15] beschreibt seine Ziele wie folgt:

- Koordination zwischen vornormativen Studien der Organisationen und Normungsforschungen in ISO, CEN usw. anzubieten,
- Unterstützung und Koordination zwischen den Mitgliedorganisationen anzubieten,
- Vornormative Forschungen im Bereich der Risikobewertung und Zuverlässigkeit zu betreiben,
- Verbesserung des Grundwissens und Verständnisses in der konstruktiven Zuverlässigkeit, Sicherheit, Risikobewertung und Qualitätssicherung des Bauingenieurwesens,
- bessere Aufsicht beim praktischen Anwenden.

## 3 Stochastische Grundlagen

### 3.1 Wahrscheinlichkeitsrechnung

Die Wahrscheinlichkeitsrechnung gibt uns die Wiederholungsmöglichkeit der einzelnen Ergebnisse. Die Wahrscheinlichkeit kann mit der folgenden Formel (1) ausgedrückt werden [16]:

$$p(\{\omega\}) = \frac{1}{n} \quad \forall \omega \in \Omega \quad (1)$$

Dabei bedeutet:

p ... Wahrscheinlichkeit (p vom Englischen „Probability“)

n ... Anzahl der möglichen Ergebnisse

$\omega$  ... Elementarereignis

$\Omega$  ... Ergebnisraum

### 3.2 Zufallsvariable

Gemäß L. Papula [17] lässt sich der Begriff „Zufallsvariable“ wie folgt definiert:

*„Unter einer Zufallsgröße oder Zufallsvariablen X verstehen wir eine Funktion, die jedem Elementarereignis  $\omega$  aus der Ergebnismenge  $\Omega$  eines Zufallsexperiments genau eine reelle Zahl  $X(\omega)$  zuordnet.“*

Die Zufallsvariablen sind folgendermaßen zu unterscheiden:

- Diskrete Zufallsvariable: Die Werte der Zufallsvariable sind entweder endlich viele oder abzählbar unendlich viele reelle Werte.
- Stetige Zufallsvariable: Die Werte der Zufallsvariable stammen aus einem entweder endlichen oder unendlichen Intervall. [17]

#### 3.2.1 Verteilungsfunktion und Wahrscheinlichkeitsdichte einer Zufallsvariable

Die Verteilungsfunktion und Verteilungsdichte sind die stochastischen Darstellungen der Ergebnisse der Stichproben. Mithilfe der Histogramme kann die im Hintergrund stehende Grundgesamtheit festgelegt werden. Die Funktion dieser Grundgesamtheit wird „Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion“ genannt und mit „ $f_X(x)$ “ bezeichnet. Mithilfe der Summenhäufigkeiten kann die im Hintergrund stehende Grundgesamtheit festgelegt werden. Die Funktion dieser Grundgesamtheit wird „Verteilungsfunktion“ genannt und mit „ $F_X(x)$ “ bezeichnet [18-20]. Die beiden Funktionen sind in Abbildung 4 und Abbildung 5 dargestellt.

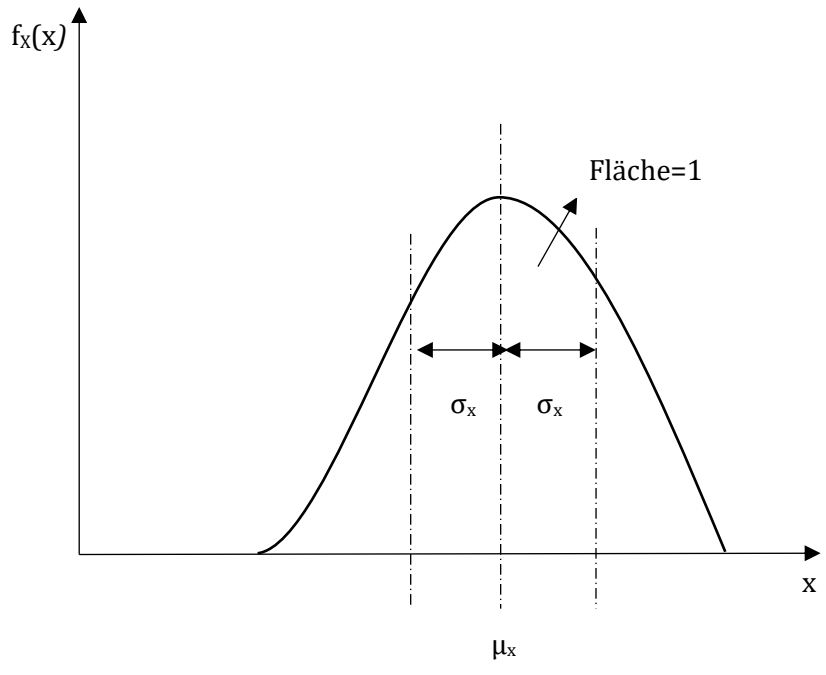


Abbildung 4: Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion der Zufallsvariable  $X$

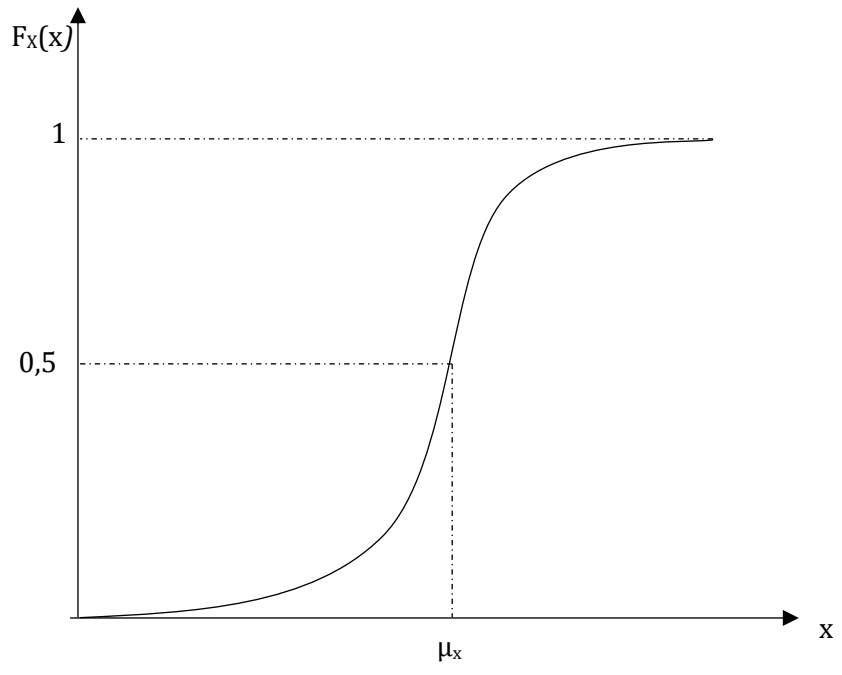


Abbildung 5: Verteilungsfunktion der Zufallsvariable  $X$

Die Verteilungsfunktion kann im Allgemeinen folgendermaßen ausgedrückt werden:

$$F_X(x) = p(X \leq x) \tag{2}$$

Die Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion kann von der Verteilungsfunktion abgeleitet werden [17] :

$$F'_X(x) = f_X(x) \quad (3)$$

Beide Seiten werden von minus unendlich bis unendlich integriert:

$$p(-\infty < X \leq x) = \int_{-\infty}^x f_x(x) dx \quad (4)$$

Für die stochastischen Berechnungen sind Parameter wie  $\mu_x$  (Mittelwert) und  $\sigma_x$  (Standardabweichung) bzw.  $\sigma_x^2$  (Varianz) von großer Bedeutung. Diese Parameter sind in Formel (5) und (6) definiert:

$$\mu_X = \int_{-\infty}^{\infty} x \cdot f_x(x) dx \quad (5)$$

$$\sigma_X^2 = \int_{-\infty}^{\infty} (x_i - \mu_X)^2 \cdot f_x(x) dx \quad (6)$$

Die üblichen Verteilungstypen im Bauwesen sind:

- Normalverteilung,
- Lognormalverteilung,
- Exponentialverteilung,
- Gumbelverteilungen,
- Weibullverteilung.

Um die Wahrscheinlichkeit eines Intervalls zu erhalten, werden die Fläche der Wahrscheinlichkeitsdichtenfunktion berechnet. Die Wahrscheinlichkeitsberechnung des in Abbildung 6 dargestellten Abstands ist:

$$p(x_1 < X \leq x_2) = \int_{x_1}^{x_2} f_x(x) dx \quad (7)$$

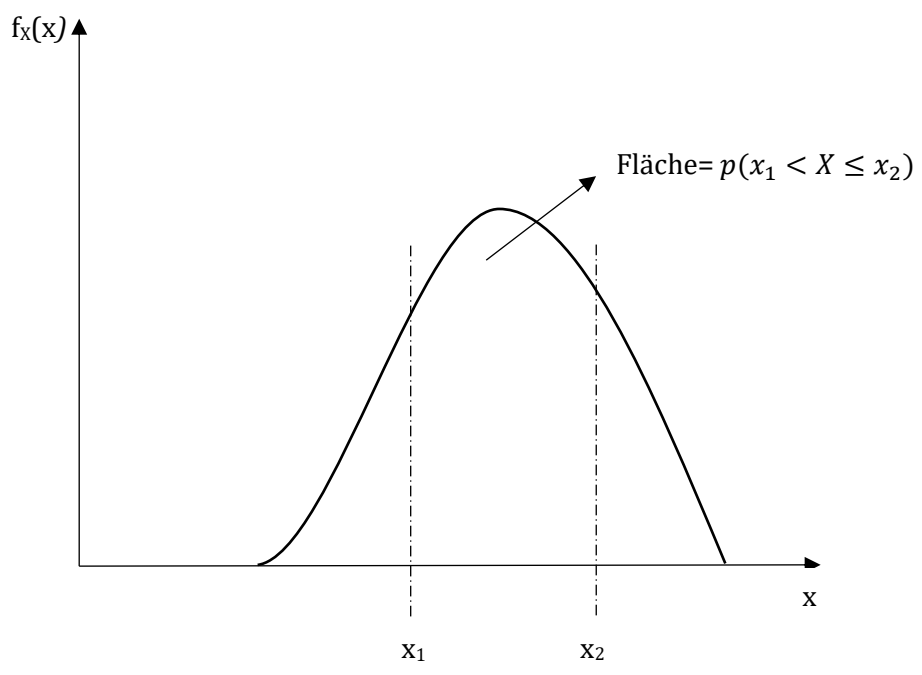


Abbildung 6: Wahrscheinlichkeitsberechnung des Intervalls  $x_1 < X \leq x_2$

## 4 Grundsätze der Tragwerksplanung

Gemäß N. Anwar [21] lässt sich Tragwerksplanung wie folgt beschreiben:

*„Structural design is the process of proportioning the structure to safely resist the applied forces and load effects in the most resource-effective and friendly manner. The term “friendly” refers to the aspect of design dealing with environmental friendliness, sustainability, ease of construction, and usability that are not explicit part of the strength consideration. Resources refer to the use of material, labor, time, and other consumables that are used to construct and maintain the structure.“*

Tragwerksplanung (TWP) beschreibt einen Prozess, der aus 3 Schritten besteht. Diese sind Entwurfs-, Tragwerksanalysen- und Bemessungsphase. In der Entwurfsphase werden die Anforderungen an das Bauwerk bzw. Tragwerk bestimmt und das Tragwerkskonzept entworfen. Danach kommt die nächste Phase „Tragwerksanalyse“, in der die Einwirkungen und Auswirkungen festgelegt und das Tragwerk modelliert werden. Die letzte Phase heißt „Bemessung“. Während der Bemessungsphase werden die Bemessungssituationen, Grenzzustände festgelegt und die konstruktive Durchbildung verrichtet. Der oben dargestellte Prozess findet sich in Abbildung 7 [22]. Eine entsprechende TWP hat die folgenden Anforderungen laut A. Kolbitsch [7] und V. Sigrist [22] :

- Grenzzustand der Tragfähigkeit,
- Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit,
- Grenzzustand der Dauerhaftigkeit,
- Nachhaltigkeit,
- Robustheit,
- Wirtschaftlichkeit.

Seit dem Anfang der Baugeschichte ist sicheres und effizientes Bauen das Hauptziel. Im 20. Jahrhundert wurden zahlreiche analytische Methode in der TWP entwickelt, um dieses Hauptziel zu verwirklichen [21]. Das sichere und effiziente Bauen erfordert die Berücksichtigung der Anforderungen an das Bauwerk. Sie werden in Kapitel 4.1 näher beschrieben.

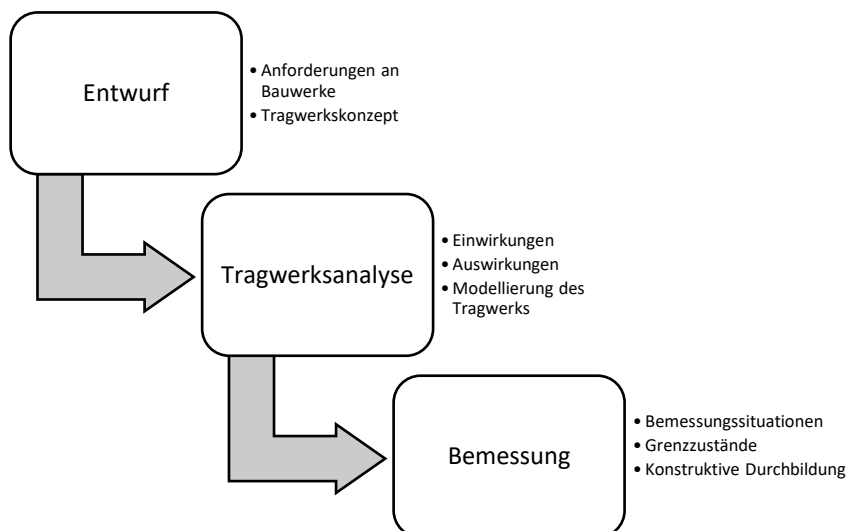


Abbildung 7: TWP-Phasen [22]

## 4.1 Anforderungen

In diesem Teil finden sich die Grenzzustände und die anderen wichtigen mit der Arbeit relevanten Anforderungen an Bauwerke. Diese Anforderungen sind für beide Codes („EN Eurocode 1990, Grundlagen der Tragwerksplanung“ und „JCSS probabilistischer Model Code (PMC)“) gültig und Grundlage für Nachweise in den Sicherheitskonzepten. Die Anforderungen stellen sicher, dass die Bauten unter Berücksichtigung der geplanten Nutzungsdauer (Tabelle 4) und Bedeutung der baulichen Anlage bzw. Schadensfolgeklasse (Tabelle 5) auskömmlich tragfähig bleiben und daneben die restlichen Anforderungen wie Wirtschaftlichkeit, Nachhaltigkeit usw. (siehe Kapitel 4) auch erfüllt sind [23].

Tabelle 4: Klassifizierung der Nutzungsdauer gemäß EC 0 [13]

Klasse der Nutzungsdauer	Planungsgröße der Nutzungsdauer (In Jahren)	Beispiele
1	10	Tragwerke mit befristeter Standzeit
2	10-25	Austauschbare Tragwerkstelle
3	15-30	Landwirtschaftlich genutzte und ähnliche Tragwerke
4	50	Gebäude und andere gewöhnliche Tragwerke
5	100	Monumentale Gebäude, Brücken und ander Ingenieurbauwerke

Tabelle 5: Schadensfolgeklassen gemäß EC 0 [13]

Schadensfolgeklassen	Merkmale	Beispiele
CC1	Niedrige Folgen für Menschenleben und kleine oder vernachlässigbare wirtschaftliche, soziale oder umweltbeeinträchtigende Folgen	Landwirtschaftliche Gebäude ohne regelmäßigen Personenverkehr (z. B. Scheunen, Gewächshäuser)
CC2	Mittlere Folgen für Menschenleben, beträchtliche wirtschaftliche, soziale oder umweltbeeinträchtigende Folgen	Wohn- und Bürogebäude, öffentliche Gebäude mit mittleren Versagensfolgen (z. B. ein Bürogebäude)
CC3	Hohe Folgen für Menschenleben oder sehr große wirtschaftliche, soziale oder umweltbeeinträchtigende Folgen	Tribünen, öffentliche Gebäude mit hohen Versagensfolgen (z. B. eine Konzerthalle)



Gemäß K. Zilch [23] sollen die oben dargestellten Anforderungen an bauliche Anlagen durch die folgenden Punkte erbracht werden:

- Durchgedachte TWP,
- Zuverlässige Bemessung,
- Passende Auswahl der Baustoffe,
- Geeignete konstruktive Durchbildung,
- Zuverlässige Bauaufsicht, Baustoffproduktion und Nutzung der baulichen Anlage.

#### 4.1.1 Grenzzustände

Grundsätzlich sind 3 Grenzzustände zu unterscheiden: Diese sind der Grenzzustand der Tragfähigkeit (ULS bzw. GZT), die Gebrauchstauglichkeit (SLS bzw. GZG) und die Dauerhaftigkeit (DLS). Alle wurden in Tabelle 6 abgebildet. Bei der Überschreitung einer der oben genannten Grenzzustände scheitern die Entwurfsanforderungen, weshalb bei der TWP Nachweise für alle 3 Grenzzustände benötigt werden. Werden die Grenzzustände überschritten, gibt es bedenkliche Konsequenzen im Sinne der Sicherheit und Gebrauchsfunktion der baulichen Anlagen. Die auf Sicherheit bezogenen Konsequenzen lassen sich mit dem GZT und die funktionellen Folgen mit dem GZG koppeln. Die betroffenen Folgen sind:

- Gefährdung der Sicherheit von Menschen,
- Gefährdung der Sicherheit des Tragwerks bzw. seiner Einrichtungen,
- Einschränkung der Funktion des Bauwerks oder seiner Teile,
- Einschränkung des Wohlbefindens von Personen,
- Beeinträchtigung des optischen Erscheinungsbildes.

Um die Funktionstüchtigkeit des Tragwerks hinsichtlich der Grenzzustände zu überprüfen, müssen unterschiedliche Bemessungssituationen betrachtet werden. Die Bemessungssituationen sind folgendermaßen bestimmt:

- Ständige Bemessungssituation,
- Vorübergehende Bemessungssituation,
- Außergewöhnliche Bemessungssituation,
- Bemessungssituationen mit Erdbeben.

Tabelle 6: Grenzzustände

Grenzzustand	Abkürzung	Limit State	Abbreviation
Grenzzustand der Tragfähigkeit	GZT	Ultimate Limit State	ULS
Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit	GZG	Serviceability Limit State	SLS
Grenzzustand der Dauerhaftigkeit	-	Durability Limit State	DLS

##### 4.1.1.1 Grenzzustand der Tragfähigkeit

GZT bezeichnet den Zustand, in dem die maximale Belastbarkeit des Tragwerks vor dem Versagen erreicht wird. Die Überschreitung des Zustandes bedeutet ein unmittelbares Versagen des Tragwerks. Es gibt zwei mögliche Versagenszustände: Die des inneren Versagenszustands und die des äußeren Versagenszustands. Die Zustände sind in Abbildung 8 dargestellt [24].

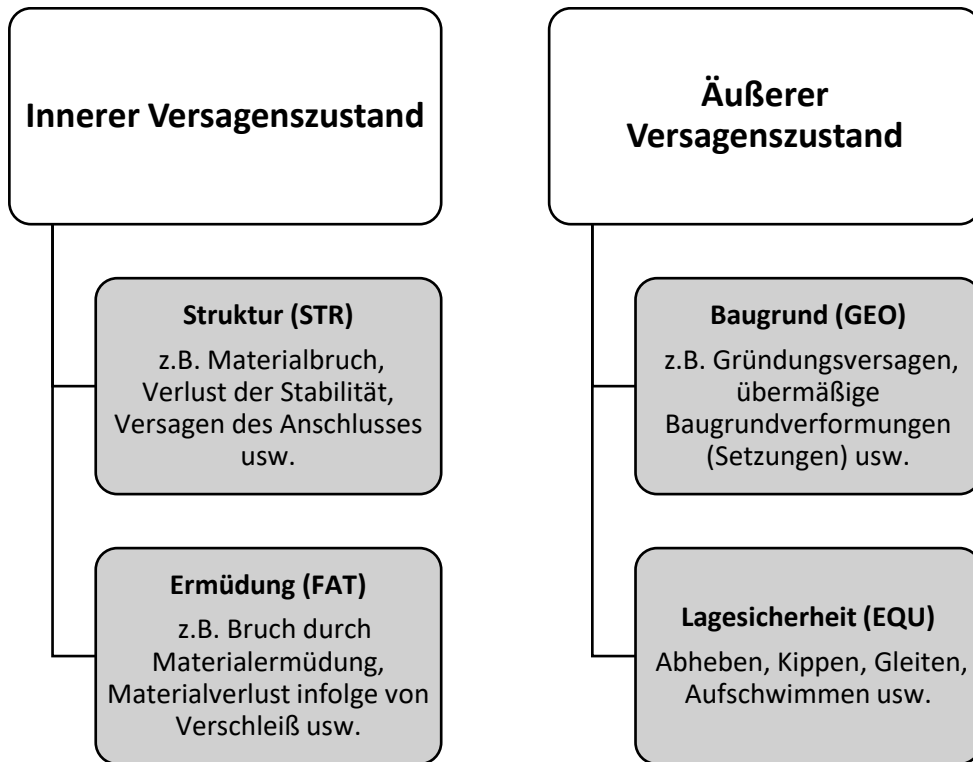


Abbildung 8: Versagenszustände der GZT [24]

Die Bedingung der GZT findet sich in der Formel (8):

$$E \leq R \quad (8)$$

Dabei bedeutet:

$E$  ... Beanspruchung z.B. Schnittgröße (Normalkraft, Biegemoment usw.) oder Spannung (Normalspannung, Schubspannung usw.)

$R$  ... Widerstand z.B. Festigkeit des Materials

Die Anforderung des GZT hat das höchste Sicherheitsniveau unter den Grenzzuständen. Die Überschreitung des GZT kann zur Gefährdung der Sicherheit von Menschen führen. Deshalb erhält dieser Zustand die höchste Aufmerksamkeit und hat Vorrang. GZT schließt die untenstehenden (sowie die in Abbildung 8 dargestellten) Situationen ein:

- Versagen oder übertriebene Verformungen des Tragwerks bzw. der Tragwerksteile (Innerer Versagenszustand - STR),
- Versagen aufgrund der Ermüdung des Tragwerks bzw. der Tragwerksteile (Innerer Versagenszustand - FAT),
- Versagen oder übertriebene Verformungen des Baugrundes (Äußerer Versagenszustand - GEO),
- Versagen aufgrund des Verlusts der Lagesicherheit (Äußerer Versagenszustand - EQU). [24, 25]

#### 4.1.1.2 Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit

GZG bezeichnet den Zustand, mit dem die Fähigkeit des Tragwerks bzw. der Tragwerksteile während der geplanten Nutzungsdauer abgedeckt wird. Hierbei wird unter Fähigkeit das Wohlbefinden der Nutzer, das Erscheinungsbild und die Funktion des Bauwerks verstanden. Um diese Fähigkeiten gewährleisten zu können, wurden die Gebrauchstauglichkeitskriterien formuliert. In Tabelle 7 werden die Kriterien und die Konsequenzen, falls sie nicht abgedeckt sind, dargestellt.

Die Bedingung des GZG findet sich in der Formel (9) :

$$E \leq C \tag{9}$$

Dabei bedeutet:

*E* ... Beanspruchung z.B. Durchbiegung, Eigenfrequenz

*C* ... Grenzwert des Gebrauchstauglichkeitskriteriums z.B. maximale Durchbiegung, Erregerfrequenz [7, 24, 25]

Tabelle 7: Gebrauchstauglichkeitsbegrenzungen und deren Konsequenzen [7, 24, 25]

Gebrauchstauglichkeitsbegrenzungen	Konsequenzen
Verformung bzw. Verschiebung	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Beeinträchtigung des Wohlbefindens der Nutzer</li> <li>• Beeinträchtigung der Funktion des Bauwerks bzw. Bauwerksteile</li> <li>• Schäden an Aufbauten oder nicht tragenden Bauteilen</li> </ul>
Schwingung	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Beeinträchtigung der Nutzbarkeit</li> <li>• Verursachen des körperlichen Unbehagens der Nutzer</li> </ul>
Rissbildung	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Beeinträchtigung des optischen Erscheinungsbilds</li> <li>• Beeinträchtigung der Funktion des Bauwerks bzw. der Bauwerksteile</li> </ul>
Beständigkeit	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Undicht Werden wie z.B. bei Silos</li> </ul>

#### 4.1.1.3 Grenzzustand der Dauerhaftigkeit

Jedes Bauwerk hat eine geplante Nutzungsdauer (siehe Tabelle 4). Im Verlauf der Nutzungsdauer muss es die Anforderungen im Sinne des GZT und GZG beibehalten. Um diese Anforderungen beizubehalten, muss das Tragwerk dauerhaft vor zeitabhängigen Eigenschaftsveränderungen ausreichend gesichert werden. Diese Eigenschaftsveränderungen werden durch zeitabhängige Einflüsse, wie Korrosion, Abnutzung, Zersetzung, Materialermüdung, Kriechen,

Schwinden und Relaxation verursacht. Diese Einflüsse können zum Versagen des Tragwerks führen (siehe Abbildung 9) [24].

Das heißt, dass der Grenzzustand der Dauerhaftigkeit das Sicherstellen des GZT und GZG während der gesamten Nutzungsdauer umfasst.

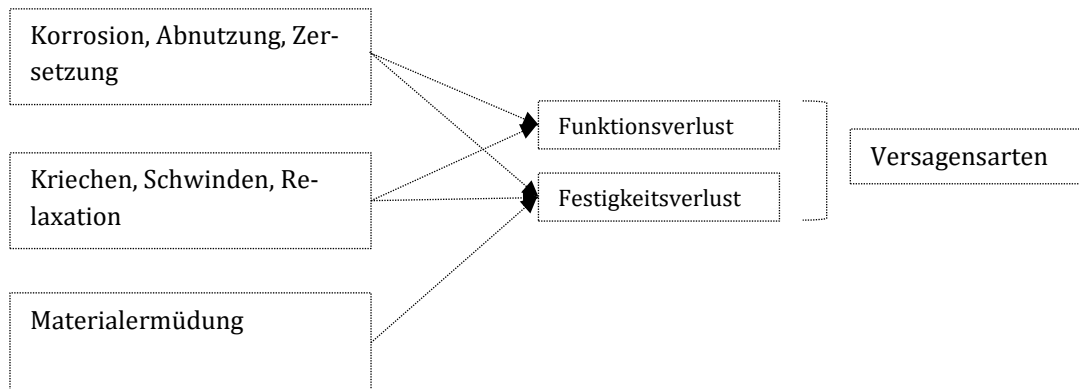


Abbildung 9: Zeitabhängige Einflüsse und der Versagensarten [24]

#### 4.1.2 Robustheit

Tauchen unvorhergesehene außergewöhnliche Situationen auf, bedingt die Robustheit die Überlebensfähigkeit des Tragwerks. Ein Tragwerk wird für dominierende Situationen entworfen. Das bedeutet nicht, dass die Maßnahmen für temporäre und außergewöhnliche Situationen vergessen werden dürfen. Einige dieser Situationen sind:

- Anprall,
- Explosionen,
- Seismische Ereignisse,
- Menschliche Fehler usw. [26]

Die drei folgenden Entwurfsstrategien sind für ein robustes Tragwerk bekannt:

- Verhinderung des progressiven Kollapses: In einer außergewöhnlichen Situation könnten Schäden am Tragwerk entstehen. Falls Schäden entstehen, jedoch eine Gliederung vorhanden ist, wird eine Versagenskette vermieden.
- Maßnahmen für die außergewöhnlichen Situationen in der Entwurfsphase: Die Tragwerksteile, die für das Tragwerk eine wesentliche Rolle übernehmen, müssen auch für außergewöhnliche Einwirkungen dimensioniert werden.
- Alternative Lastverteilung: Im Falle des Schadens kann ein Tragwerksteil seine Funktion verlieren. Hier muss ein anderes Teil des Tragwerks die zusätzliche Belastung aufnehmen. [24]

#### 4.1.3 Nachhaltigkeit

Das Konzept der Nachhaltigkeit kommt aus der Forstwirtschaftslehre und bis in die 1970er Jahre benutzte nur die Fischerei- und Forstwirtschaft den Begriff „Nachhaltigkeit“. Die Bedeutung des Begriffs wird zum ersten Mal in dem Buch „Sylvicultura oeconomica“ von Hans Carl von Carlowitz [27] behandelt. Laut Carlowitz [28]:

*„Wird derhalben die größte Kunst/Wissenschaft/Fleiß und Einrichtung hiesiger Lande darinnen beruhen / wie eine sothane Conservation und Anbau des Holtzes anzustellen / daß es eine kontinuierliche be und nachhaltige Nutzung gebe / weiln es eine unentberliche Sache ist / ohne welche das Land in seinem Esse (im Sinne von Wesen, Dasein, d. Verf.) nicht bleiben mag.“*

Das Zitat besagt, dass man nicht mehr Bäume fällen soll, als nachwachsen. Heutzutage benutzt man den Begriff in vielen Bereichen, die mit gesellschaftlichen, wirtschaftlichen und technischen Aspekten zu tun haben. Die Nachhaltigkeitsanforderungen streben danach, den kommenden Generationen keine verschlechterten Lebenschancen zu hinterlassen [24].

Die Nachhaltigkeit hat drei Dimensionen. Beim Konzept „Nachhaltigkeit“ muss man alle diese Dimensionen berücksichtigen. Sie werden als die „Drei-Säulen der Nachhaltigkeit“ bezeichnet. Diese Säulen sind: ökologische, ökonomische und soziale Nachhaltigkeit (siehe Abbildung 10). Im Bausektor sind die daraus abgeleiteten Anforderungen sehr bedeutend, da der Sektor einen sehr großen Anteil an der Weltwirtschaft hat und eine große Menge an Güterverkehr verlangt [27]. Deswegen können die folgenden Lösungen vorgeschlagen werden:

- Verbesserung des Lebenszyklus der Bauwerke,
- Ausnutzung der Wiederverwendung und Recycling des Baustoffes,
- Verwendung alternativer Baustoffe. [29]

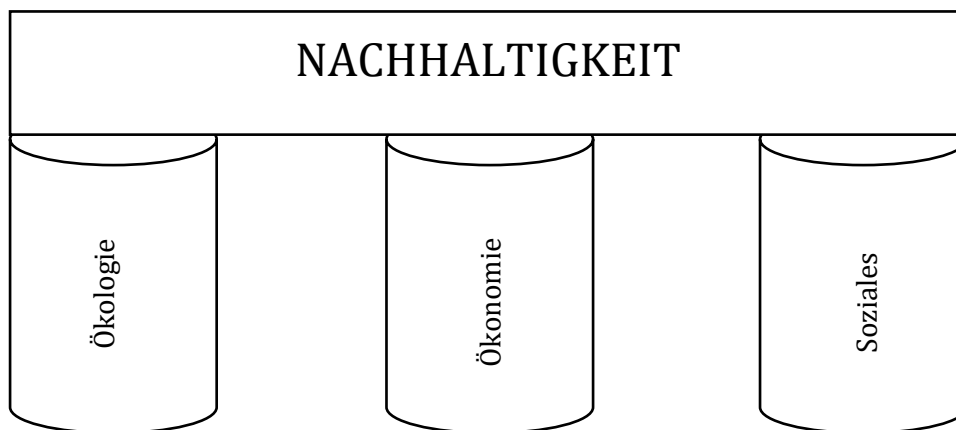


Abbildung 10: Drei-Säule der Nachhaltigkeit

## 4.2 Ansätze der Tragwerksplanung bzw. Sicherheitskonzepte

### 4.2.1 Die traditionellen Sicherheitskonzepte

#### 4.2.1.1 Empirische Bemessung

Hier spricht man von der Methode „Versuch und Irrtum“ und die Methode ist empirisch. Der Begriff „empirisch“ stammt aus dem Griechischen (siehe ἐμπειρία *empeiría*) und bedeutet, dass Erkenntnisse aus Erfahrungen gewonnen werden.

Die Geschichte des Bauens ist Jahrtausende alt und die Menschheit hat im Großteil der Baugeschichte ohne genau definierte Sicherheitsbetrachtungen gebaut. Trotz Mängel aus der Sicht der

heute genau definierten Sicherheitsbetrachtungen haben viele Bauten dieser Phase die Zeit überdauert, obwohl die Grundlage der Bemessung nur die empirische Bemessung war [30].

Mit der Akkumulation von Erfahrung und Wissen wurden unterschiedliche Sicherheitsfaktoren für unterschiedliche Baumaterialien bestimmt. Am Anfang dieser Betrachtungen waren die Faktoren größer als die in späteren Zeiten der empirischen Bemessung, weshalb die Faktoren mit steigender Erfahrung verkleinert wurden [31].

Die Veränderung der Faktoren funktioniert im Sinne der empirischen Bemessung wie folgt: Ist die Dauer bis zum Auftreten von Versagensfällen während der Ausführungs- oder Nutzungsphase kürzer als die geplante Nutzungsdauer, erhöht sich der Faktor. treten Versagensfälle erst nach Ablauf der geplanten Nutzungsdauer auf, sind die Sicherheitsreserven nicht voll ausgenutzt und der Faktor wird reduziert. Dieser Mechanismus der Erfahrungssammlung wird in Abbildung 11 dargestellt [32].

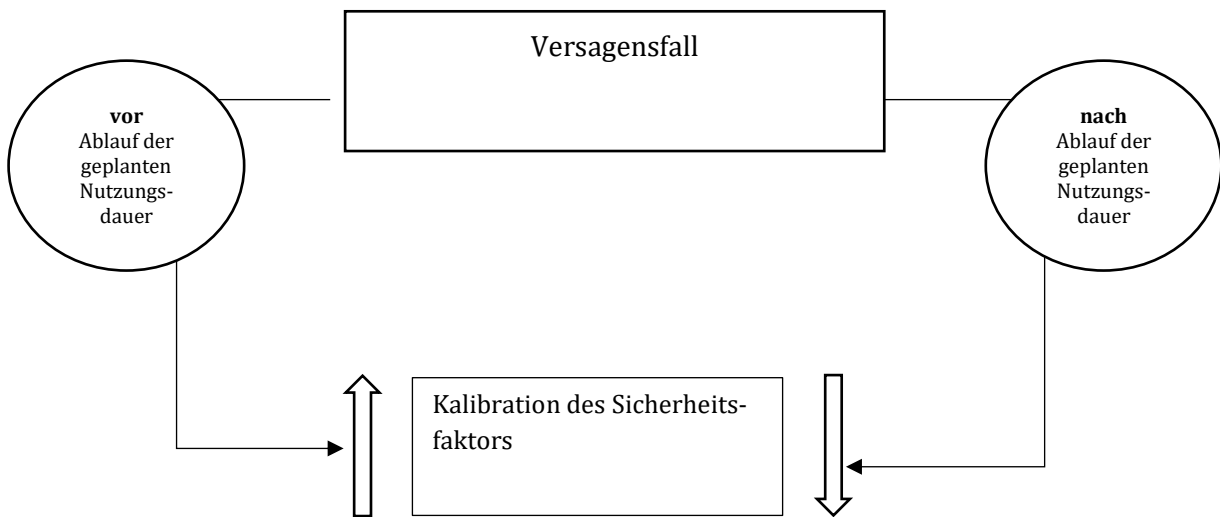


Abbildung 11: Der Mechanismus der Erfahrungssammlung und Kalibration des Sicherheitsfaktors [32]

#### 4.2.1.2 Das deterministische Sicherheitskonzept

Philon von Byzanz (Φίλων ὁ Βυζάντιος *Phílōn ho Byzántios*; \* im 3. Jahrhundert v. Chr.; † im 2. Jahrhundert v. Chr.) war ein griechischer Erfinder, Konstrukteur und Autor (auch als Philo Mechanicus bezeichnet) er stellte die erste mathematische Formel (10) für die Sicherheit von Tragwerken auf [31]:

$$\gamma = \text{Tragfähigkeit} / \text{Belastung} = 1 \quad (10)$$

Im deterministischen Sicherheitskonzept werden die zulässigen Spannungen den aus den Beanspruchungen ermittelten Spannungen gegenübergestellt. Die Entwicklung des Sicherheitskonzept lässt sich stark mit den vermehrten Baustoffuntersuchungen koppeln. Die Streuungen auf der Widerstandsseite werden hier erstmalig berücksichtigt. Die Mittelwerte der Streuungen werden in diesem Konzept benutzt und der Gesamtsicherheitsfaktor der Widerstandsseite gewährleistet die ausreichende Sicherheit. Der Übergang zwischen empirischer Bemessung und

deterministischem Sicherheitskonzept erfolgt durch normativ festgelegten Sicherheitsabstand bzw. eine zentrale Sicherheitszone (siehe Abbildung 14) [30]. Der allgemeine Nachweis ist in Formel (11) enthalten:

$$\sigma_{vorh} \leq \sigma_{zul} = \frac{\mu_R}{\gamma} \quad (11)$$

Dabei bedeutet:

$\sigma_{vorh}$  ... vorhandene Spannung

$\sigma_{zul}$  ... zulässige Spannung

$\mu_R$  ... Mittelwert des Widerstandes

$\gamma$  ... Sicherheitsfaktor

Sicherheitsfaktoren sind hier normativ festgelegte Werte, die ähnlich der empirischen Bemessung mit steigender Erfahrung überarbeitet wurden.

Die Nachteile, die den Übergang zu den probabilistischen Methoden verursacht haben, können folgendermaßen zusammengefasst werden:

- Die Nutzlasten sind durch Erfahrung bestimmt.
- Die auf empirische Überarbeitungen und Fortsetzungen basierenden Regelwerke verursachten Inkonsequenz bei den Regeln.
- Wegen der baustoffspezifischen Nachweisformate gab es unterschiedliche Sicherheitsniveaus. [7]

## 4.2.2 Die modernen Sicherheitskonzepte

### 4.2.2.1 Das semi-probabilistische Sicherheitskonzept

Hier geht es um eine Anpassung bzw. Weiterentwicklung des deterministischen Sicherheitskonzepts. Damit lassen sich Ungenauigkeiten in den Ergebnissen der Sicherheitsberechnungen kompensieren und sie nähern sich den Ergebnissen der Zuverlässigkeitsmethoden an. In vielen Fällen wird das semi-probabilistische Sicherheitskonzept bevorzugt, da die zuverlässigkeitsbezogenen Methoden i.d.R. komplizierter und aufwendiger als dieses Sicherheitskonzept sind [32].

Statt zulässigen und vorhandenen Werten werden hier die Bemessungswerte der Beanspruchungen und Widerstände gegenübergestellt. Die Beanspruchungs- und Widerstandsarten sind im Folgenden aufgelistet:

- Schnittgrößen,
- Spannungen,
- Verformungen. [33]

Die Hauptformel (12) des semi-probabilistischen Konzept lautet:

$$E_d \leq R_d \quad (12)$$

Dabei bedeutet:

$E_d$  ... Bemessungswert der Einwirkungsseite

$R_d$  ... Bemessungswert der Widerstandsseite

Die Bemessungswerte sind in Formel (13) und (14) dargestellt:

$$E_d = E_k \times \gamma_E \quad (13)$$

$E_k$  ... charakteristischer Wert der Einwirkungsseite

$\gamma_E$  ... Sicherheitsfaktor für die Einwirkungsseite

$$R_d = R_k / \gamma_R \quad (14)$$

$R_k$  ... charakteristischer Wert der Widerstandsseite

$\gamma_R$  ... Sicherheitsfaktor für die Widerstandsseite

Der charakteristische Wert des Widerstandes „ $R_k$ “ entspricht, wie in Abbildung 12 dargestellt wurde, dem 5 % Fraktilwert und der charakteristische Wert der Beanspruchung, wie in Abbildung 13 dargestellt, dem 95 % Fraktilwert. Der Abstand zwischen diesen Werten ergibt die Nennsicherheitszone (Abbildung 14).

Die charakteristischen Werte der Widerstandsseite mit dem 5 % Fraktilwert bedeuten, dass diese Werte mit der 95 % Wahrscheinlichkeit den Fraktilwert nicht unterschreiten können.

Die charakteristischen Werte der Einwirkungsseite mit dem 95 % Fraktilwert bedeuten, dass diese Werte mit der 5 % Wahrscheinlichkeit den Fraktilwert überschreiten können.



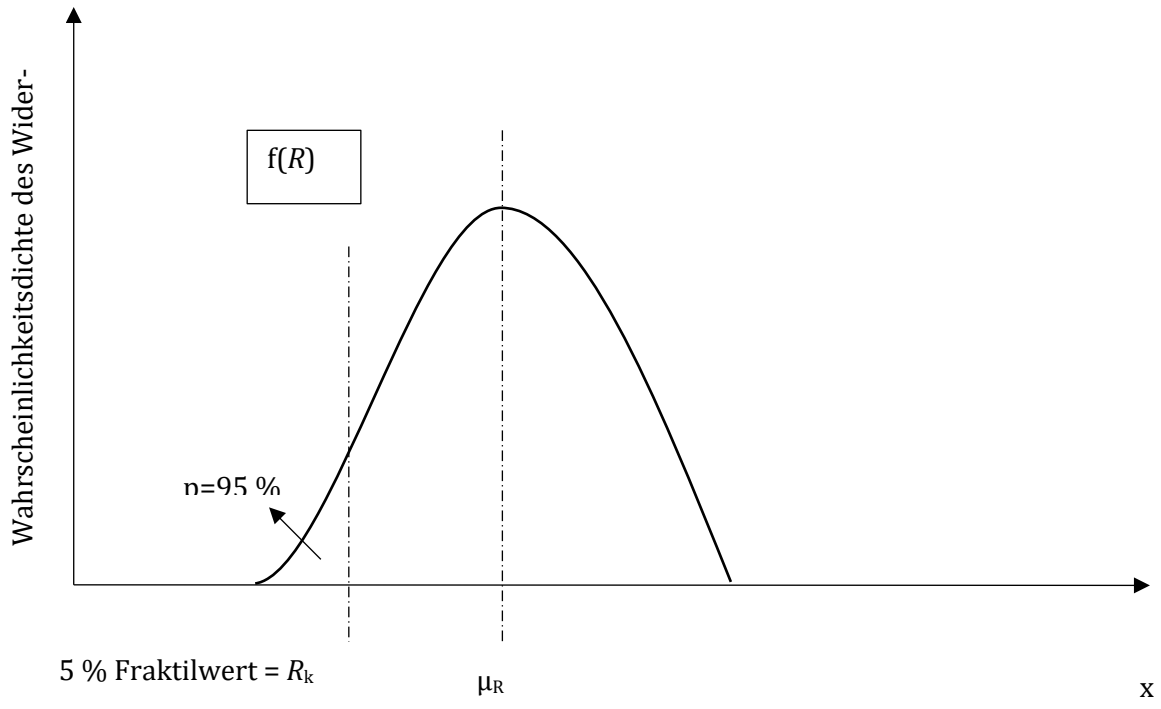


Abbildung 12: Charakteristischer Wert des Widerstandes

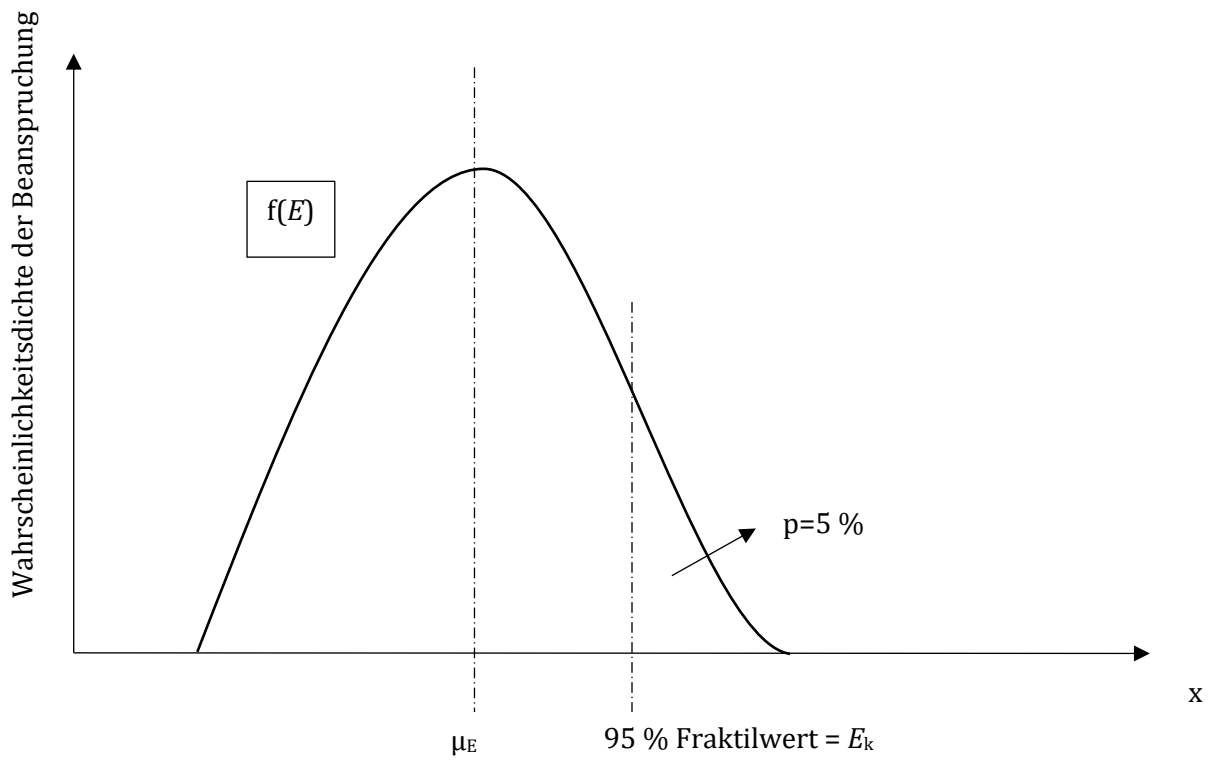


Abbildung 13: Charakteristischer Wert der Beanspruchung

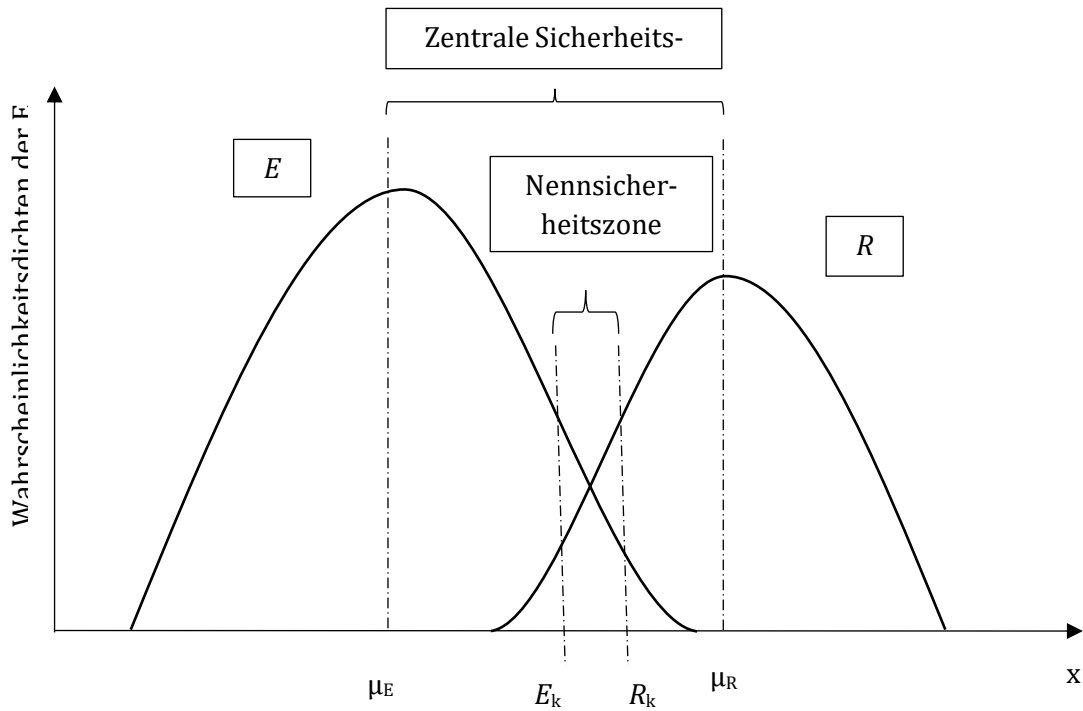


Abbildung 14: Sicherheitszonen im deterministischen Sicherheitskonzept und semi-probabilistischen Sicherheitskonzept

Bei diesem Sicherheitskonzept haben die Teilsicherheitsbeiwerte große Bedeutung. Sie gewährleisten die Kalibration des Nachweisformates. Die Anforderung der Teilsicherheitsbeiwerte dient der Berücksichtigung von Unsicherheiten. Unsicherheiten sind:

- Unsicherheiten in der Verteilung der Einwirkungen,
- Unsicherheiten in der Verteilung der Widerstände,
- Abweichungen der Querschnittsgeometrie,
- Unterschiede im Materialverhalten von Probekörper und Bauwerk
- Modellunsicherheiten,
- Vereinfachungen bei den Berechnungen bzw. Annahmen, um die Berechnungen zu vereinfachen,
- Unterschiedliche Bedeutungsklassen der Bauwerke. [32]

Gemäß Schmidt [33] lässt sich die Funktion der Beanspruchungs- und Widerstandsfunktion folgendermaßen in Formel (15) beschreiben:

$$E_d = E(F_{d1}, F_{d2}, \dots, a_{d1}, a_{d2}, \dots, \theta_{d1}, \theta_{d2}) \quad (15)$$

$$R_d = R(X_{d1}, X_{d2}, \dots, a_{d1}, a_{d2}, \dots, \theta_{d1}, \theta_{d2})$$

Die Funktionen sind abhängig von zugrundeliegenden:

- Bemessungswerte der Einwirkungen „ $F_d$ “,
- Geometrischen Größen „ $a_d$ “,
- Baustoffeigenschaften „ $X_d$ “,
- Modellungenauigkeiten „ $\theta_d$ “.

#### 4.2.2.2 Das voll probabilistische Sicherheitskonzept

In manchen Fällen stößt das semi-probabilistische Sicherheitskonzept an seine Grenzen und eine direkte Versagenswahrscheinlichkeitsberechnung ist anzustreben. In diesen Situationen erfolgt die direkte Ermittlung der Versagenswahrscheinlichkeit; diese Methode wird als vollprobabilistisches Sicherheitskonzept bezeichnet[31].

Im voll-probabilistischen Sicherheitskonzept wird die Versagenswahrscheinlichkeit „ $p_f$ “ statt Sicherheitsfaktoren und Bemessungswerte benutzt. Der Vergleich geschieht zwischen der vorhandenen Versagenswahrscheinlichkeit und der einzuhaltenden Wahrscheinlichkeit. Die Versagenswahrscheinlichkeit ist jener Fall, wenn die Beanspruchung größer als der Widerstand ist (Formel (16)) [34].

$$p_f = p(R \leq S) \quad (16)$$

Der Nachweis muss durch die Versagenswahrscheinlichkeit wie in Formel (17) erfolgen:

$$p_{f, \text{vorh}} \leq p_{f, \text{erf}} \quad (17)$$

Hier bedeutet:

$p_{f, \text{vorh}}$  ... operative Versagenswahrscheinlichkeit

$p_{f, \text{erf}}$  ... erforderliche operative Versagenswahrscheinlichkeit [30]

## 5 Grundlagen der Zuverlässigkeit

In diesem Kapitel werden nur die Zuverlässigkeitsmethoden, die entweder für EN 1990 oder für den PMC wesentlich sind, berücksichtigt. Die Gliederung dieser Methoden ist in Abbildung 15 dargestellt.

Die Zuverlässigkeitsmethoden teilen sich dabei in zwei Hauptgruppen [35]:

- Die Methoden bezogen auf die Taylorentwicklung im Bemessungspunkt bzw. Näherungsverfahren,
- Monte-Carlo Methoden.

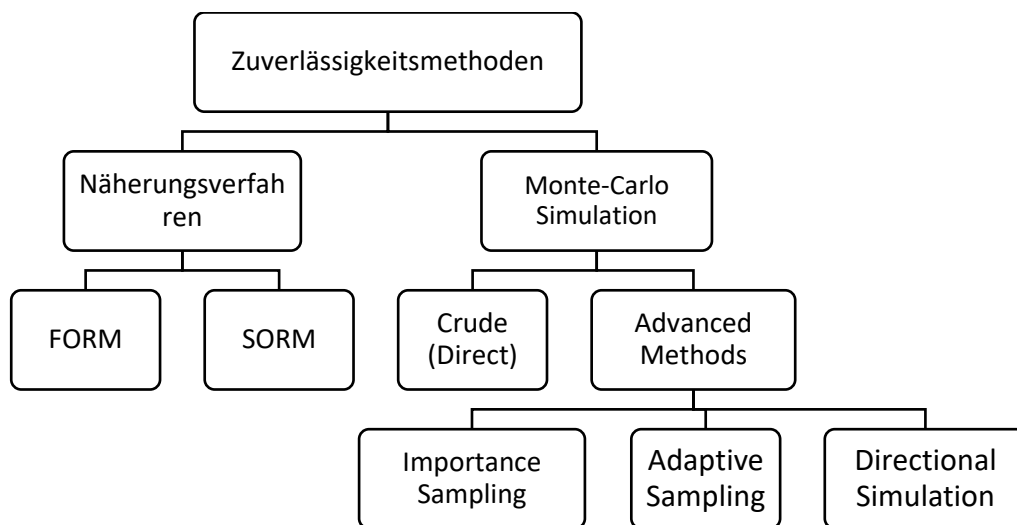


Abbildung 15: Gliederung der Zuverlässigkeitsmethoden

### 5.1 Näherungsverfahren

Hier werden die Approximationsverfahren mit den Momentmethoden erläutert. In dieser Arbeit sind die folgenden zwei Näherungsverfahren von großer Bedeutung:

- First Order Reliability Method (FORM),
- Second Order Reliability Method (SORM).

Die Verfahren erfolgen in den folgenden Schritten:

- Die Grenzzustandsfunktion wird mithilfe der ersten und zweiten Taylorentwicklung linearisiert.
- Die Zufallsvariablen werden in standard-normalverteilte Zufallsvariablen umgewandelt.
- Um den Bemessungspunkt festzulegen, wird das Iterationsverfahren angewendet.
- Berechnung des Zuverlässigkeitsindex. [32, 36-38]

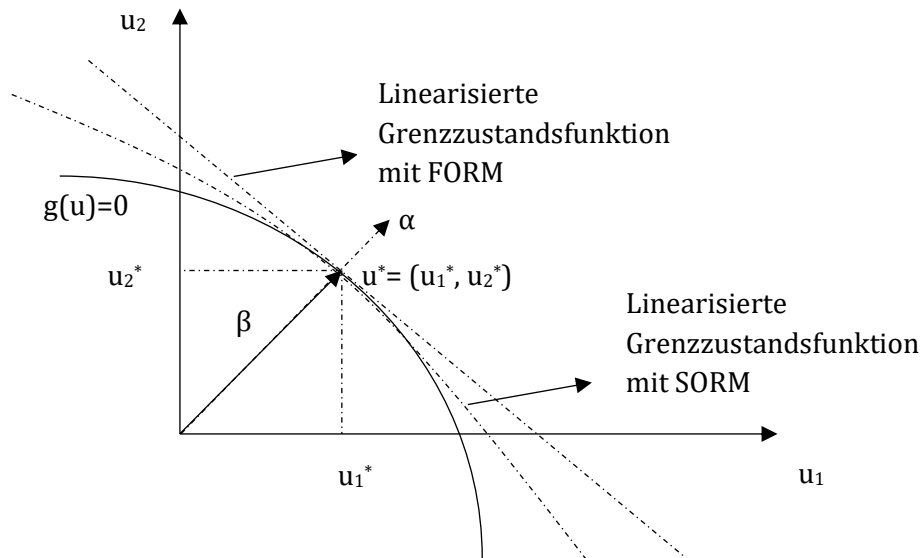


Abbildung 16: Festlegung des Bemessungspunkt und Zuverlässigkeitsindex [37]

Die Umwandlung der Zufallsvariablen bzw. Basisvariablen in standard-normalverteilte Zufallsvariable:

$$U_i = T(X_i) = (X_i - \mu_{x_i}) / \sigma_{x_i} \quad (18)$$

$$i = 1, 2$$

oder

$$X_i = T^{-1}(U_i) = \sigma_{x_i} \cdot U_i + \mu_{x_i} \quad (19)$$

$$i = 1, 2$$

Die Festlegung des Bemessungspunktes:

$$u_i^* = \beta \times \alpha_i \quad (20)$$

Die Berechnung des Zuverlässigkeitsindex:

$$\beta = \left( \sum_{i=1}^n u_i^{*2} \right)^{1/2} \quad (21)$$

## 5.2 Monte-Carlo Simulation

Die Monte-Carlo Simulation (MCS) ist eine Methode der computergestützten Analyse. Die Simulation erfolgt durch die generierten Zufallsvariablen mit vorgegebenen Verteilungen. Die MCS verlangt eine sehr hohe Versuchsanzahl. Da zuverlässigere Ergebnisse mit vermehrten Versuchen kommen [39, 40].

Die Berechnung der Versagenswahrscheinlichkeit mithilfe der MCS ist folgendermaßen in Formel (37) definiert:

$$p_f = \int I[g(x) \leq 0] f_x(x) dx \quad (22)$$

I ist hier „indicator function“. Sie kann mit der folgenden Formel (23) definiert werden

$$I[g(x) \leq 0] = \begin{cases} \text{wenn richtig} & = 1 \\ \text{wenn falsch} & \end{cases} \quad (23)$$

Die numerische Anwendung der MCS erfolgt durch die folgende Formel (24):

$$p_f = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N I[g(x_i) \leq 0] \quad (24)$$

## 6 Vergleich von EC 0 und JCSS probabilistischer Model Code

### 6.1 EN Eurocode 1990, Grundlagen der Tragwerksplanung

Dieses Kapitel bezieht sich auf EN Eurocode 1990, Grundlagen der Tragwerksplanung [13].

Die EN 1990 umfasst 2 Normen und 2 Nationale Anhänge, die in Tabelle 8 dargestellt wurden:

Tabelle 8: Die Teile der EN 1990 in Österreich

#### Die Normen

ÖNORM EN 1990:2013	Eurocode – Grundlagen der Tragwerksplanung
ÖNORM EN 1990/A1:2013	Eurocode - Grundlagen der Tragwerksplanung - Änderung 1: Anwendung bei Brücken

#### Die nationalen Anhänge

ÖNORM B 1990-1:2013	Eurocode - Grundlagen der Tragwerksplanung - Teil 1: Hochbau - Nationale Festlegungen zu ÖNORM EN 1990 Anhang A1:2003
ÖNORM B 1990-2:2016	Eurocode - Grundlagen der Tragwerksplanung - Teil 2: Brückenbau - Nationale Festlegungen zu ÖNORM EN 1990/A1 und nationale Ergänzungen

In dieser Arbeit wird nur die ÖNORM EN 1990 evaluiert und dem JCSS probabilistic Model Code (PMC) – Teil 1 gegenübergestellt.

Die ÖNORM EN 1990 besteht aus folgenden Teilen:

- ÖNORM EN 1990:2013 - Nationales Vorwort,
- EN 1990:2002+AC:2008+AC:2010 – Die im Jahr 2002 veröffentlichte europäische Norm mit Überarbeitungen im Jahr 2008 und 2010,
- Anhang A.1 (normativ) Anwendung im Hochbau,
- Anhang B (informativ) Behandlung der Zuverlässigkeit im Bauwesen,
- Anhang C (informativ) Grundlagen für die Bemessung mit Teilsicherheitsbeiwerten und die Zuverlässigkeitsanalyse,
- Anhang D (informativ) Versuchsgestützte Bemessung.

### 6.2 JCSS probabilistischer Model Code

Dieses Kapitel bezieht sich auf den PMC [41].

Der JCSS probabilistic Model Code umfasst 3 Teile, die in Tabelle 9 dargestellt wurden:

Tabelle 9: Teile des JCSS probabilistischen Model Codes

#### Probabilistic Model Code

Teil 1	Basis of Design
Teil 2	Load Models
Teil 3	Material Properties

In dieser Arbeit wird nur Teil 1 – Grundlagen der Tragwerksplanung evaluiert und der ÖNORM EN 1990 gegenübergestellt.

Teil 1 – Grundlagen der Tragwerksplanung (Basis of Design) besteht aus den folgenden Teilen:

- Teil 1 der Norm,
- Anhang A: Anforderung an Robustheit (The Robustness Requirement),
- Anhang B: Dauerhaftigkeit (Durability),
- Anhang C: Grundlagen der Zuverlässigkeitsanalyse (Reliability Analysis Principles),
- Anhang D: Interpretation der Wahrscheinlichkeiten nach dem Bayes'schen Satz (Bayesian Interpretation of Probabilities).

## 6.3 Anforderungen

Die allgemeinen Definitionen der Anforderungen in der TWP finden sich im Kapitel 4.1.

### 6.3.1 Die Anforderungen in EN 1990

#### 6.3.1.1 Die grundlegenden Anforderungen

Gemäß EN 1990 müssen die Tragwerke während der Errichtung und in der vorgesehenen Nutzungszeit (siehe Tabelle 4) die folgenden Anforderungen mit ausreichender Zuverlässigkeit und Wirtschaftlichkeit erfüllen:

- Tragfähigkeit,
- Gebrauchstauglichkeit,
- Dauerhaftigkeit,
- Feuerwiderstandsfähigkeit,
- Robustheit.

Unter Feuerwiderstandsfähigkeit versteht man, dass das Tragwerk während der geforderten Feuerwiderstandsdauer seine Tragfähigkeit bewahrt.

Die Robustheit bezieht sich hier auf Explosionen, Anprall und menschliches Versagen. In diesen Fällen dürfen keine Schadensfolgen oder Schadensketten auftauchen.

Um die angegebenen Anforderungen einzuhalten, müssen die folgenden Punkten erfüllt werden:

- Passende Baustoffwahl,
- Fachwissenschaftlicher Entwurf, fachwissenschaftliche Bemessung und konstruktive Durchbildung,
- Sorgfältige Überwachung während der Entwurfs-, Herstellungs-, Ausführungs- und Nutzungsphase.

#### 6.3.1.2 Behandlung der Zuverlässigkeit

Um das auszureichende Zuverlässigkeitsniveau zu gewährleisten, müssen EN 1990 bis EN 1999 bei der Planung und Berechnung sorgfältig angewendet werden und die Qualitätssicherung der Ausführung gewährleistet werden.



Hierbei ist die Differenzierung der Zuverlässigkeit besonders wichtig. In EN 1990 [13] gibt es dafür folgende Definition:

*„Maßnahmen zur volkswirtschaftlichen Optimierung der im Bauwesen eingesetzten Mittel unter Berücksichtigung der Schadensfolgen und Baukosten.“*

Die Optimierung ist durch eine geeignete Auswahl anhand folgender Gesichtspunkte zu erreichen:

- Konsequenzen des Versagens im Sinne von Verletzungs- und Todesrisiko oder potenziellen wirtschaftlichen Verlusten,
- Potenzielle soziale Unannehmlichkeiten wegen des Versagens,
- Wirtschaftliche Belastungen während der Verringerung des Versagensrisikos.

Anhand dieser Gesichtspunkte wird das geeignete Zuverlässigkeitsniveau bestimmt. Das Zuverlässigkeitsniveau ist für GZT und GZG zu bestimmen und mit entsprechenden Schutz-, Berechnungs-, Qualitätsmanagement-, Überwachungs- und Instandhaltungsmaßnahmen zu ergänzen.

Die Auswahl der charakteristischen Werte der Einwirkungen und der Teilsicherheitsbeiwerte sind die Berechnungsmaßnahmen.

#### **6.3.1.3 Geplante Nutzungsdauer**

Unter der geplanten Nutzungsdauer versteht man die Lebensdauer ohne wesentliche Instandsetzungen (Siehe Tabelle 4).

#### **6.3.1.4 Dauerhaftigkeitsanforderung**

In EN 1990 sind die Grundsätze für die Maßnahmen angeführt. Die baustoffspezifischen Nachweisformate bzw. Maßnahmen in EN 1992 bis EN 1999 angeführt.

Die Grundsätze beinhalten:

- Baustoff-, Bauprodukt-, Baugrundeigenschaften,
- Konstruktive Durchbildung,
- Besondere Schutzmaßnahmen (z.B. Anpralldämpfer),
- Auswahl, vorgesehene und vorhersehbare Nutzung, Nutzungsdauer und geplante Instandhaltung des Tragwerks,
- Kriterien bezüglich des Entwurfs und der Umwelt während der Nutzungsdauer des Tragwerks.

Die in Abbildung 9 dargestellten zeitabhängigen Anforderungen müssen mithilfe der Vorerfahrungen berücksichtigt werden.

#### **6.3.1.5 Qualitätsmanagement**

Dieser Teil befasst sich mit der Qualitätssicherung des Tragwerks. Das Bewahren der Tragwerksqualität ist mit den folgenden Maßnahmen möglich:

- Festlegung entsprechender Zuverlässigkeitsanforderungen,
- organisatorische Maßnahmen,
- Überwachung in der Planungsphase, in der Ausführung und während der Nutzung und Instandhaltung.

Die Anwendung der EN ISO 9001:1994 [42] ist für die Qualitätsmanagementmaßnahmen laut EN 1990 [13] gestattet.

## **6.3.2 Die Anforderungen im PMC**

### **6.3.2.1 Die grundlegenden Anforderungen**

Der Entwurf, Bau und die Instandhaltung der Tragwerke müssen geeignet für ihre Nutzungsdauer und ökonomisch günstig sein. Besonders müssen die Anforderungen das passende Zuverlässigkeitsniveau berücksichtigen. Diese Anforderungen der Tragwerke sind unten aufgelistet:

- Tragfähigkeit: Widerstand extremer und/oder häufig wiederholter Einwirkungen
- Gebrauchstauglichkeit: Aufrechthaltung der Funktionalität,
- Robustheit: Keine unproportionalen Schadensfolgen nach Brand, Explosionen, Anprall oder menschlichem Versagens.

### **6.3.2.2 Behandlung der Zuverlässigkeit**

Die Definition des passenden Zuverlässigkeitsniveaus bedeutet, dass das Zuverlässigkeitsniveau an die Verwendung des Tragwerks, die Art des Tragwerks oder das Tragwerkselement und die Bemessungssituation usw. angepasst werden sollte.

Das Zuverlässigkeitsniveau ist mit den Maßnahmen des Qualitätsmanagements (siehe 6.3.1.5) zu erhalten.

Die Auswahl des Zuverlässigkeitsniveau ist abhängig von folgenden Faktoren:

- Konsequenzen des Versagens im Sinne von Verletzungs- und Todesrisiko oder potenziellen wirtschaftlichen Verlusten,
- Potenzielle soziale Unannehmlichkeiten wegen des Versagens,
- Kosten und Aufwendungen zur Reduktion des Versagensrisikos.

Versagen stellt hier entweder die unzureichende Tragfähigkeit oder unzureichende Gebrauchstauglichkeit dar.

### **6.3.2.3 Dauerhaftigkeitsanforderungen**

Im PMC sind Maßnahmen zur Gewährleistung der Dauerhaftigkeit während der geplanten Nutzungsdauer angeführt. Anhang B mit dazugehörigen Beispielen ist dieser Anforderung gewidmet.

Die Anforderungen zur Dauerhaftigkeit können durch eines der folgenden Konzepte erreicht werden:

- Auswahl der Baustoffe, deren Eigenschaften sich bei entsprechender Instandhaltung während der Nutzungsdauer nicht verschlechtern,
- Auswahl von Querschnitten, die die Kompensation möglicher Korrosionserscheinungen während der geplanten Nutzungsdauer berücksichtigen,
- Festlegung kürzerer Nutzungsdauern für diejenigen Konstruktionselemente die während der gesamten geplanten Nutzungsdauer des Bauwerks ein- oder mehrmals erneuert werden können,
- Regelmäßige oder umgebungsbedingt festgelegte Inspektionsintervalle und angemessene Instandhaltungsmaßnahmen.

### 6.3.3 Die Anforderungen im Vergleich

Die grundsätzlichen Anforderungen der beiden Regelwerke stimmen weitgehend überein. Es ist festzuhalten, dass der PMC die Entwicklung der zuverlässigkeitsbasierten Bemessung wesentlich gefördert hat.

In beiden Regelwerken betreffen die grundlegenden Zuverlässigkeitskriterien:

- Tragfähigkeit,
- Gebrauchstauglichkeit und,
- Robustheit
- Sowie Dauerhaftigkeit.

In EN 1990 wird in diesem Zusammenhang explizit die Feuerwiderstandsfähigkeit angeführt während im PMC dieses Kriterium unter Robustheit eingeordnet ist.

In Kapitel 6.3.2.1 sind unter dem Begriff der Tragfähigkeit „die extremen und häufig wiederholten Einwirkungen“ [41] zu finden. Das bedeutet, dass die Tragfähigkeitsanforderung im PMC auch die Dauerhaftigkeit umfasst.

EN 1990 schlägt Maßnahmen für die Einhaltung der Anforderungen vor, die im PMC nicht vorhanden sind.

Nach den grundlegenden Anforderungen behandeln beide Regelwerke die Zuverlässigkeit gleichermaßen und legen großen Wert auf ihre Differenzierung.

In EN 1990 wird die Planungsgröße der Nutzungsdauer in Klassen (der Nutzungsdauer) eingeteilt. Der PMC benutzt nur den Begriff ohne genau definierte Dauer.

Die Anforderungen an die Dauerhaftigkeit werden in beiden Regelwerken behandelt. Die Herangehensweise unterscheidet sich jedoch: In EN 1990 werden allgemeine Gesichtspunkte zur Gewährleistung der Dauerhaftigkeit benannt und die Anwendung der weiteren konstruktiven Normen empfohlen. Im PMC sind mehrere mögliche Maßnahmen.

Qualitätsmanagement wird in beiden Regelwerken behandelt. EN 1990 behandelt diesen Aspekt in einem eigenen Unterkapitel, während PMC Qualitätsmanagement der Zuverlässigkeit zuordnet (6.3.2.2).

## 6.4 Maßgebende Grenzzustände

In beiden Regelwerken werden GZG und GZT als die maßgeblichen angeführt. Die ausführlichen Beschreibungen befinden sich in den Kapiteln 4.1.1.1 und 4.1.1.2.

### 6.4.1 Maßgebende Grenzzustände in EN 1990

Für EN 1990 bezieht sich der GZT auf das Versagen des Tragwerks und der GZG auf Funktionsstörungen des Tragwerks.

Die Nachweise der Grenzzustände haben nach Bemessungssituationen (6.4.1.1) zu erfolgen. Diese umfassen sowohl ständige, vorübergehende und außergewöhnliche Situationen als auch Situationen bei Erdbeben.

Es ist möglich, nur einen Grenzzustand zu berücksichtigen, wenn dieser den/die anderen umfasst. Um diese Möglichkeit zu nutzen, müssen die Parameter der betreffenden Situation ausreichend bekannt sein. Dies wird im folgenden Beispiel von H. Gulvanessian, J. -A. Calgaro und M.

Holicky [5] veranschaulicht. Die hohen Anforderungen der Eisenbahnstrecke im Sinne des GZT können auch den GZG des Gleiskörpers abdecken. Weil bei einer Entgleisung Menschenleben gefährdet sind, sind die Verformungen der Strecke ohnehin sehr streng begrenzt. Diese Begrenzung ermöglicht den Entfall des GZG.

#### **6.4.1.1 Bemessungssituationen in EN 1990**

Die Auswahl der relevanten Bemessungssituationen erfolgen nach den Anforderungen des Tragwerks während seiner Nutzungsdauer. Diese Anforderungen müssen über den gesamten Lebenszyklus des Tragwerks hinweg erfüllt werden.

Die Bemessungssituationen sind in EN 1990 [13] folgendermaßen aufgelistet:

- Ständige Situationen,
- Vorübergehende Situationen,
- Außergewöhnliche Situationen,
- Situationen bei Erdbeben.

Materialspezifische Angaben lassen sich in EN 1991 bis EN 1999 finden.

#### **6.4.1.2 Bemessung nach Grenzzustände in EN 1990**

Das vorherrschende Bemessungsverfahren in EN 1990 ist das Nachweisverfahren mit Teilsicherheitsbeiwerten. In besonderen Fällen darf nach dieser Norm (mit Zustimmung des Bauherrn und der zuständigen Behörde) eine Bemessung mit direkter Anwendung probabilistischer Verfahren erfolgen.

### **6.4.2 Maßgebende Grenzzustände im PMC**

Die Nachweise der Grenzzustände haben nach Bemessungssituationen (4.1.16.4.1.1) zu erfolgen. Diese umfassen ständige, vorübergehende und außergewöhnliche Situationen.

Es ist in manchen Fällen möglich, einen neuen Grenzzustand zwischen GZT und GZG zu definieren. Dieser Grenzzustand heißt Grenzzustand des Teilschadens (engl. „Partial Damage Limit State“ [41]). Das in JMC dafür genannte Beispiel bezieht sich auf einen erdbebeninduzierten Schaden.

#### **6.4.2.1 Bemessungssituationen im PMC**

Während des Lebenszyklus des Tragwerks können sich die Einwirkungen, Umwelteinflüsse und Tragwerksanforderungen ändern. Die TWP muss alle diese Änderungen für die Bemessungssituationen berücksichtigen.

Die Bemessungssituationen sind gemäß PMC [41] folgendermaßen aufgelistet:

- Ständige Situationen,
- Vorübergehende Situationen,
- Außergewöhnliche Situationen.

#### **6.4.2.2 Bemessung nach Grenzzustände im PMC**

Im PMC wird das voll probabilistische Bemessungsverfahren nicht nur im Hintergrund des Codes angewendet, sondern es ist das vorherrschende Bemessungsverfahren. Das heißt, dass die Variablen im PMC nur mithilfe der probabilistischen Methoden bestimmt werden. Im PMC ist die

Festlegung der Zuverlässigkeitsindizes für die Grenzzustände wesentlich. Sie ermöglichen die Kalibration zwischen PMC und EN 1990 [43].

### 6.4.3 Maßgebende Grenzzustände im Vergleich

Die Unterschiede zwischen den Regelwerken werden in diesem Teil veranschaulicht. Einerseits benutzt EN 1990 die probabilistischen Methoden im Hintergrund bzw. ist die Nachweismethode in EN 1990 semi-probabilistisch, andererseits bezieht sich PMC auf die voll-probabilistischen Methoden. Ein voll-probabilistisches Nachweisverfahren für die Tragwerksplanung zu ermöglichen, ist das Ziel von PMC und der Hauptunterschied zwischen EN 1990 und PMC.

Außerdem führt EN 1990 die Situationen bei Erdbeben unabhängig von den herkömmlichen drei Bemessungssituationen an. Diesbezüglich erregt der Grenzzustand des Teilschadens im PMC Aufmerksamkeit, weil in EN 1990 so einen Grenzzustand nicht erwähnt wird.

Im Allgemeinen kann man behaupten, dass PMC allmählich mit den Grundsätzen der Grenzzustände seinen voll-probabilistischen Ansatz demonstriert.

## 6.5 Basisvariable

Die Basisvariablen stellen die Grundlage für die Tragwerksbemessung. Sie lassen sich auch als grundlegende Variablen benennen und umfassen z.B. die klassischen Basisvariablen für Maße, Dichte und Festigkeit der Baustoffe und Belastungen [40].

Gemäß Schneider, J. [18] gibt es drei Arten der Basisvariablen: Umwelt-, Bauwerks- und Nutzungsvariablen (Tabelle 10).

Tabelle 10: Arten der Basisvariablen gemäß Schneider J. [18]

Arten der Basisvariablen	Eigenschaften	Beispiele
Umweltvariablen	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Stationäre stochastische Prozesse</li> <li>• Unkontrollierbar oder kaum kontrollierbar</li> <li>• Die Bemessungswerte beinhalten gewisse Risiken.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Temperatur, Wind, Schnee usw.</li> <li>• Feuer, Explosionen (trotzdem sind sie durch Menschen induzierten Ereignisse) usw.</li> </ul>
Bauwerksvariablen	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Geplant, also gezielt erzeugbar</li> <li>• Unscharfe Größen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bauwerkabmessungen, Baustoffeigenschaften usw.</li> </ul>
Nutzungsvariablen	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Stochastische Prozesse in der Zeit</li> <li>• Begrenzbar durch Überwachung</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Nutzlasten, Verkehrslasten, Kranlasten usw.</li> </ul>

In der TWP kommen sie sie immer zur Anwendung und umfassen:

- Einwirkungen auf Tragwerke,
- Umwelteinflüsse auf Tragwerke,
- Baustoffeigenschaften,
- Baugrundeigenschaften,
- Geometrische Daten der Tragwerkteile.

Die Darstellung der Basisvariablen ist mittels Abschätzung der Mittelwerte, Fuzzy-Nummern, charakteristischer Werte und Zufallsvariablen möglich. Diese Möglichkeiten sind in Abbildung 17 dargestellt [44]. Die charakteristische Werte „ $X_k$ “ finden in meisten Tragwerksplanungsaufgaben Anwendung. Die charakteristischen Werte werden, wie in 4.2.2.1 dargestellt, mit den Fraktilwerten errechnet. Die Zufallsvariablen werden durch die Dichtefunktionen „ $f_x(x)$ “ beschrieben.

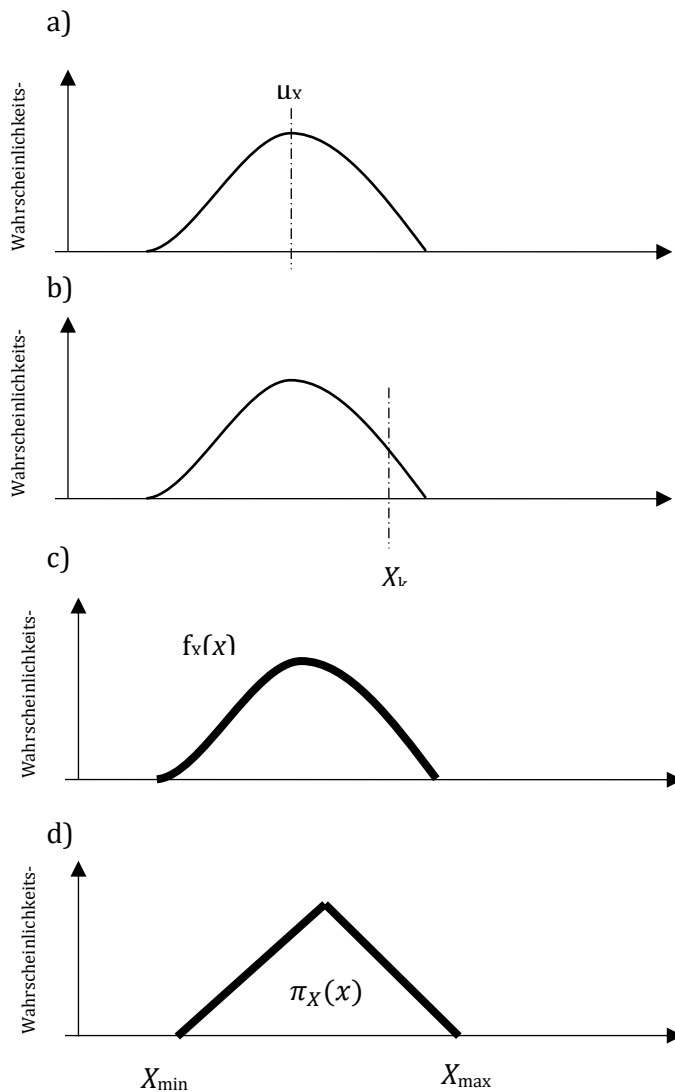


Abbildung 17: Die Darstellungsmöglichkeiten der Basisvariablen

- a) Der Mittelwert b) Der charakteristische Wert  
 c) Zufallsvariable d) Fuzzy-Nummern

## 6.5.1 Basisvariablen in EN 1990

EN 1990 unterteilt die Basisvariablen in 3 Hauptgruppen: Einwirkungen und Umwelteinflüsse, Eigenschaften der Baustoffe, Bauprodukten und Bauteilen, sowie Geometrische Angaben. Die Gruppen mit Untergruppen in EN 1990 sind in Tabelle 11 aufgelistet.

Tabelle 11: Einteilung der Basisvariablen gemäß EN 1990 [13]

Hauptgruppen der Basisvariablen	Untergruppen
Einwirkungen und Umwelteinflüsse ( $F$ )	<ul style="list-style-type: none"><li>• Ständige Einwirkungen (<math>G</math>)</li><li>• Veränderliche Einwirkungen (<math>Q</math>)</li><li>• Außergewöhnliche Einwirkungen (<math>A</math>)</li><li>• Erdbebeneinwirkungen (<math>A_E</math>)</li><li>• Geotechnische Einwirkungen</li><li>• Umgebungseinflüsse</li></ul>
Eigenschaften von Baustoffen, Bauprodukten und Bauteilen	-
Geometrische Angaben	-

### 6.5.1.1 Einwirkungen und Umwelteinflüsse

Um die Methoden des EN 1990 richtig und ausführlich zu verstehen, müssen zuerst ein paar Begriffe definiert werden. Die Bedeutungen der Begriffe im Rahmen von Einwirkungen und Umwelteinflüsse sind gemäß EN 1990 [13] dargestellt:

#### Einwirkung ( $F$ ):

a) Eine Gruppe von Kräften (Lasten), die auf ein Tragwerk wirken (direkte Einwirkung).

b) Eine Gruppe von aufgezwungenen Verformungen oder Beschleunigung, die z. B. durch Temperaturänderungen, Feuchtigkeitsänderung, ungleiche Setzung oder Erdbeben hervorgerufen werden (indirekte Einwirkung).

#### Repräsentativer Wert einer Einwirkung ( $F_{rep}$ ):

Wert, der für den Nachweis eines Grenzzustandes verwendet wird. Der repräsentative Wert kann der charakteristische Wert ( $F_k$ ) oder ein Begleitwert ( $\psi F_k$ ) sein.

#### Charakteristischer Wert einer Einwirkung ( $F_k$ ):

Wichtigster repräsentativer Wert einer Einwirkung.

#### Bemessungswert einer Einwirkung ( $F_d$ ):

Wert einer Einwirkung, der durch Multiplikation des repräsentativen Wertes mit dem Teilsicherheitsbeiwert  $\psi F$  ermittelt wird.

Die Einordnung der Einwirkungen und Umgebungseinflüsse in EN 1990 erfolgen nach den folgenden Gesichtspunkten:

- Zeitliche Veränderung,
- Ursprung (direkt oder indirekt),
- Veränderung der räumlichen Verteilung (ortsfest oder frei),
- Natur oder Bauwerksreaktion (statisch oder dynamisch) [5].

Die Einwirkungsarten nach der zeitlichen Veränderung gegliedert sind die ständigen, veränderlichen und außergewöhnlichen Einwirkungen (Tabelle 12).

*Tabelle 12: Einwirkungen nach ihrer zeitlichen Veränderung*

<b>Einwirkung</b>	<b>Definition</b>	<b>Beispiele</b>
Ständige Einwirkung	Die Einwirkungen, die während der Nutzungsdauer immer vorhanden und deren zeitliche Veränderungen vernachlässigbar klein sind.	Eigengewicht der Tragwerkteile, Ausbaulasten, innere Zwängungen z.B. wegen Schwinden, Vorspannung, Wasser- und Erddruck usw.
Veränderliche Einwirkung	Die Einwirkungen, deren zeitlichen Veränderungen nicht vernachlässigbar klein sind.	Nutz-, Schnee-, Windlasten, Temperatureinwirkungen usw.
Außergewöhnliche Einwirkung	Die Einwirkungen, die auf Tragwerk kurz aber bedeutend wirken.	Brand, Explosionen, Anpralllasten usw.

### **Festlegung der charakteristischen Werten für die Einwirkungen**

Die Festlegung der charakteristischen Werte einer Einwirkung „ $F_k$ “ erfolgt gemäß EN 1990 entweder nach EN 1991 oder aus auf Grundlage der nach EN 1991 entworfenen Projektunterlagen. In EN 1991 gibt es 3 Möglichkeiten, einen charakteristischen Wert zu bestimmen:

- Mittelwert,
- Oberer (engl. superior und Abk. sup) oder unterer Wert (engl. inferior und Abk. inf) – diese entsprechen den oberen und unteren Fraktilwerten bzw.  $F_{k,sup}$  und  $F_{k,inf}$ ,
- Nennwert – keine geeignete statistische Verteilung aufgrund fehlender Daten.

Der Mittelwert und die oberen und unteren Werte sind abhängig von der Verteilung der Einwirkung (Abbildung 18). Bei den Einwirkungen und Umwelteinflüssen stellen fehlenden Daten häufig das größte Problem dar. In vielen Fällen macht diese Situation statistische Ermittlung unmöglich und deswegen werden solche Einwirkungen als nominale Werte abhängig von den Erfahrungen in der TWP festgelegt [5].



In Formel (40) und (26) sind sich die mathematischen Ausdrücke der unteren und oberen Werte für die Einwirkungen:

$$F_{k,inf} = \mu_F - k_n \times \sigma_F \quad (25)$$

$$F_{k,sup} = \mu_F + k_n \times \sigma_F \quad (26)$$

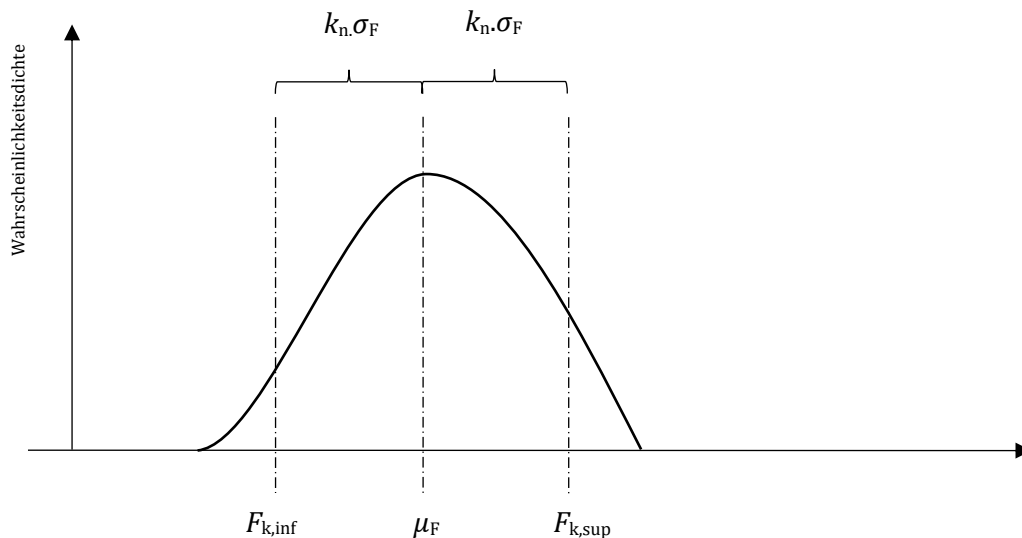


Abbildung 18: Mittelwert und obere und untere Werte der Einwirkungen

In dieser Arbeit werden beispielhaft nur die ständigen Einwirkungen behandelt, um den Unterschied zwischen beiden Normen zu zeigen.

### Die ständigen Einwirkungen

Für die ständigen Einwirkungen ist es einfacher, umfangreiche Daten zu finden. Deswegen ist es möglich, die Einwirkungen mit ihren Verteilungen zu bewerten. Es gibt zwei Varianten: Ständige Einwirkungen mit kleiner Streuung und mit großer Streuung.

Ändert sich die ständige Einwirkung nicht auffallend während der Nutzungsdauer und ist der Variationskoeffizient klein genug ( $0,05 \leq V_G \leq 0,01$ ), ist eine kleine Streuung gegeben. Im Fall der kleinen Streuung darf der Mittelwert als der charakteristische Wert angenommen werden. Die Darstellung der Wahrscheinlichkeitsdichte einer ständigen Einwirkung mit kleiner Streuung ist in Abbildung 19 dargestellt.

Ändern sich die ständigen Einwirkungen auffallend während der Nutzungsdauer und liegt der Variationskoeffizient unter 0,05, dann sind die Fraktile einer Gaußverteilung heranzuziehen. In solchen Fällen kommen der 5 % Fraktilewert für  $G_{k,inf}$  und der 95 % Fraktilewert für  $G_{k,sup}$  zur Anwendung. Die Darstellung der Wahrscheinlichkeitsdichte einer ständigen Einwirkung mit großer Streuung ist in Abbildung 19 dargestellt.

In Tabelle 13 befinden sich einige Mittelwerte und Variationskoeffizienten der Wichte von Baustoffen, die von Rackwitz, R. in [45] angeführt werden. Anhand dieser Werte können die folgenden Werte interpretiert werden. Die Wichten von Stahl und Beton weisen kleine Streuungen (Variationskoeffizienten sind kleiner als 0,05) und jene von Eichenholz hat eine große Streuung (Variationskoeffizient ist zwischen 0,05 und 0,1).

Tabelle 13: Die Mittelwerte und Variationskoeffizienten der Wichte von gewissen Baustoffen

Baustoff	Mittelwert (kN/m <sup>3</sup> )	Variationskoeffizient
Stahl	78,5	<0,01
Normalbeton	23,5-24,5	0,03-0,04
Eichenholz	7,5	~0,1

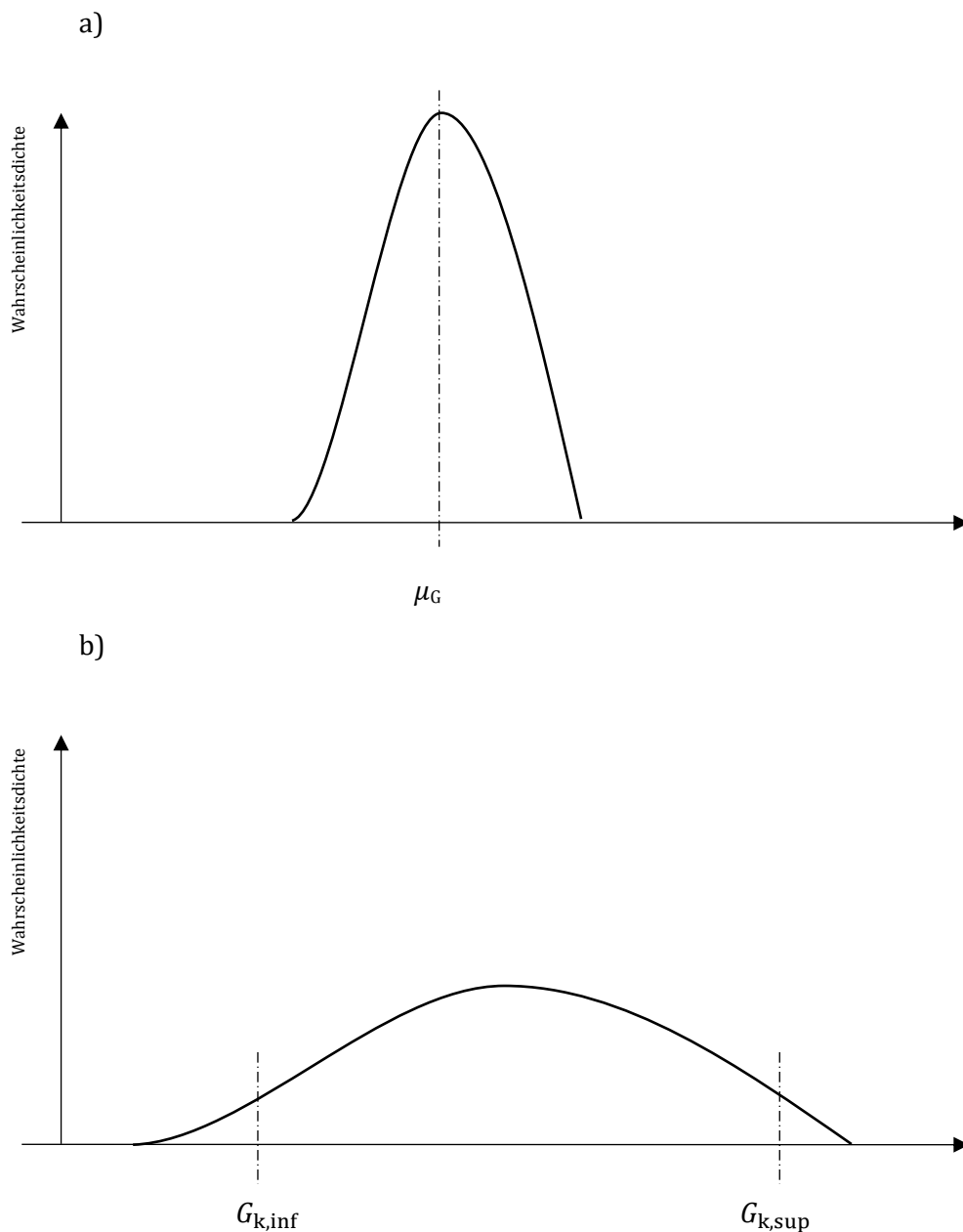


Abbildung 19: Wahrscheinlichkeitsdichten der ständigen Einwirkungen

- a) Wahrscheinlichkeitsdichte mit kleiner Streuung b) Wahrscheinlichkeitsdichte mit großer Streuung

### 6.5.1.2 Eigenschaften von Baustoffen, Bauprodukten und Bauteilen

Um die Methoden des EN 1990 richtig und ausführlich zu verstehen, müssen zuerst ein paar Begriffe definiert werden. Die Bedeutungen der Begriffe im Rahmen von Eigenschaften von Baustoffen, Bauprodukten und Bauteilen sind gemäß EN 1990 [13] dargestellt:

Charakteristischer Wert einer Baustoff- oder Produkteigenschaft  $X_k$  oder einer Bauteileigenschaft  $R_k$ :

Wert einer Baustoff-, Produkt- oder Bauteileigenschaft mit bestimmter Auftretenswahrscheinlichkeit bei unbegrenzter Probenzahl. Dieser Wert entspricht i. d. R. einer bestimmten Fraktile der statistischen Verteilung, in einigen Fällen werden Nennwerte verwendet.

Bemessungswert einer Baustoff- oder Produkteigenschaft  $X_d$  oder einer Bauteileigenschaft  $R_d$ :

Wert, der aus dem charakteristischen Wert der Baustoff- oder Produkteigenschaft  $X_k$  oder einer Bauteileigenschaft  $R_k$  durch Teilen mit dem Teilsicherheitsbeiwert  $\gamma_m$  oder  $\gamma_M$  gebildet wird, oder deren besonderen Fällen auch direkt bestimmt wird.

Nennwert einer Baustoff- oder Produkteigenschaft  $X_n$  oder einer Bauteileigenschaft  $R_n$ :

Ein üblicherweise als charakteristischer Wert benutzter Wert, der einem geeigneten Dokument z. B. einer Europäischen Norm oder Vornorm entnommen wird.

Gemäß EN 1990 gibt es 3 Möglichkeiten, einen charakteristischen Wert für die Baustoffe- und Bauprodukteigenschaften zu bestimmen:

- Mittelwert,
- Oberer oder unterer Wert bzw.  $X_{k,sup}$  und  $X_{k,inf}$  (Formel (27) und (28)),
- Nennwert.

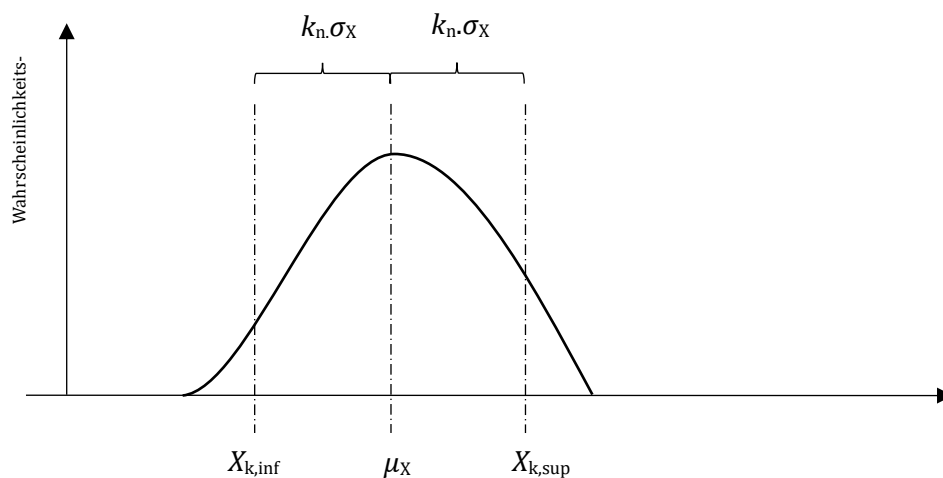


Abbildung 20: Mittelwert und obere und untere Werte der Baustoff- oder Produkteigenschaft

Im Falle unzureichender Informationen über die stochastischen Verteilungen sind die Nennwerte zu benutzen. Die oberen und unteren Werte sind hier gemäß EN 1990 [13] der 95 % und der 5 % Fraktile. Diese möglichen Werte für die Auswahl der charakteristischen Werte von Baustoff- und Bauprodukteigenschaften wurden in Abbildung 20 dargestellt.

$$X_{k,inf} = \mu_X - k_n \times \sigma_X \quad (27)$$

$$X_{k,inf} = \mu_X + k_n \times \sigma_X \quad (28)$$

### 6.5.1.3 Geometrische Angaben

Die Bedeutungen der Begriffe im Rahmen von geometrischen Angaben sind gemäß EN 1990 [13] dargestellt:

Charakteristischer Wert einer geometrischen Eigenschaft  $a_k$ :

*Der Wert entspricht üblicherweise den bei der Planung festgelegten Nennmaßen. Wo notwendig, entsprechen die geometrischen Größen festgelegten Fraktile einer statistischen Verteilung.*

Bemessungswert einer geometrischen Größe  $a_d$ :

*Im Allgemeinen der Nennwert. Wo notwendig, entsprechen die geometrischen Werte festgelegten Fraktile der statistischen Verteilung.*

Die geometrischen Variablen inkludieren z.B. die Form oder Größe der Tragwerke, Tragwerksteile und Querschnitte. Trotz deren kleiner und zu vernachlässigender Variabilität sind sie im Allgemeinen Zufallsvariablen. Deswegen dürfen hier die Nennwerte für die charakteristischen Werte der geometrischen Angaben eingesetzt werden und gemäß EN 1990 [13] sollen in der TWP die geometrischen Variablen mit ihren charakteristischen Werten verwendet werden. Das bedeutet, die Bemessungswerte entsprechen bei den geometrischen Variablen den Nennwerten (Formel (29)). Nur im Falle der Imperfektionen, die für die Stabilitätsnachweise z.B. Knicknachweise wesentlich sind, sollten direkt die Bemessungswerte aus EN 1992 bis EN 1999 herangezogen werden.

$$a_d = a_{nom} \quad (29)$$

### 6.5.2 Basisvariablen im PMC

In diesem Kapitel werden die Basisvariablen nach PMC Teil 1 und PMC Teil 2 analysiert.

PMC teilt die Basisvariablen in 3 Obergruppen: Einwirkungen und Umwelteinflüsse, Eigenschaften der Baustoffe und Baugründe, sowie geometrische Angaben. PMC verfolgt den Ansatz, die Basisvariablen als Zufallsvariable zu behandeln.

Folgende Modelle dabei verwendet:

- Einwirkungsmodelle,
- Geometrische Modelle,
- Materialmodelle,
- Mechanische Modelle.

### 6.5.2.1 Einwirkungsmodelle

Die Einordnung der Einwirkungen im PMC erfolgt nach folgenden Gesichtspunkten:

- Zeitliche Veränderung,
- Veränderung der räumlichen Verteilung (ortsfest oder frei).

Die Einwirkungsarten sind nach der zeitlichen Veränderung gegliedert in ständige, veränderliche und außergewöhnliche Einwirkungen (Tabelle 12). Um einen logischen Vergleich zu ermöglichen, werden die Einwirkungsmodelle in dieser Arbeit im Sinne dieser Gliederung untersucht.

PMC beschreibt die Einwirkungen mit der folgenden Formel:

$$F = \varphi(F_0, W) \quad (30)$$

Dabei bedeutet:

F ... Die Einwirkung (entweder eine Zufallsvariable oder ein Nennwert)

F<sub>0</sub> ... Die Basisvariable der Einwirkung (entweder eine Zufallsvariable oder ein Nennwert)

W ... Der Umwandlungsfaktor (F<sub>0</sub> in F)

φ (-) ... Die geeignete Funktion

Um das Konzept besser zu verstehen, wird das Beispiel der Schneelast aus PMC herangezogen. Die Formel für Schneelast laut PMC Teil 2[41] lautet:

$$S_r = S_g \times r \times k^{h/h_f} \quad (31)$$

Dabei bedeutet:

S<sub>r</sub> ... Schneelast am Dach

S<sub>g</sub> ... Charakteristische Schneelast auf dem Boden

r ... Umrechnungsfaktor zwischen Schneelast am Boden und Schneelast auf einem Dach

- k ... Beiwert für die Region
- h ... Geländehöhe des Tragwerks
- h<sub>f</sub> ... Referenzhöhe (=300m)

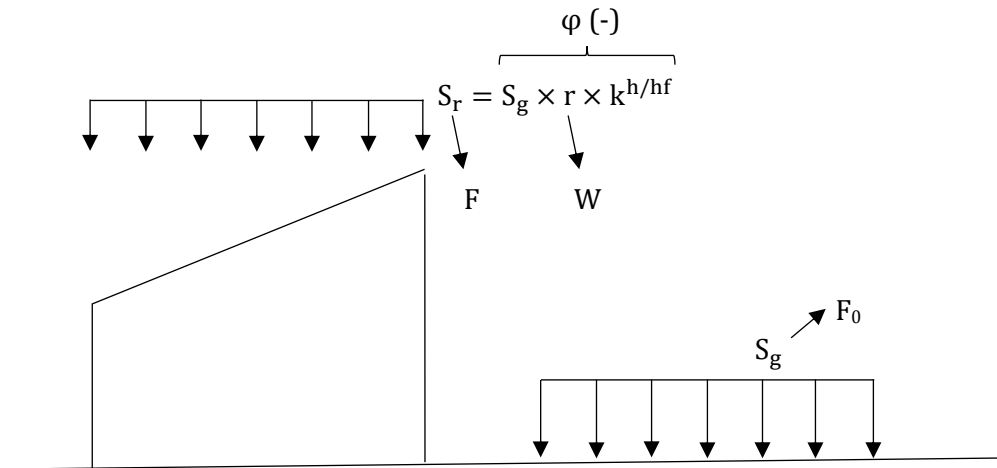


Abbildung 21: Darstellung der Einwirkungsformel mithilfe des Beispiels der Schneelast

In Abbildung 21 wird das oben erwähnte Beispiel veranschaulicht. Die charakteristische Schneelast „S<sub>r</sub>“ entspricht der Einwirkung „F“. Um „S<sub>g</sub>“ festlegen zu können, ist die Schneelast auf dem Boden „S<sub>g</sub>“ als Basisvariable der Einwirkung „F<sub>0</sub>“ zu benutzen. Der Umwandlungsbeiwert „W“ ist hier „r“, der die Schneelast auf dem Boden in die Schneelast am Dach umwandelt. Die geeignete Funktion „φ“, um die charakteristische Schneelast zu bestimmen, ist die Multiplikation aller diesen Werten und des Beiwertes für die Region „k“.

Gemäß PMC gibt es 3 Modellmöglichkeiten, eine Variable zu bestimmen:

- Zufallsvariable,
- Nennwerte,
- Zufallsfelder.

### Ständige Einwirkungen

Die ständigen Einwirkungen umfassen die Eigengewichte der Rohbau- und Ausbaulasten. Dieser Einwirkungstyp kann mit Formel (32) definiert werden:

$$G = \int_V \gamma dV \quad (32)$$

Dabei bedeutet:

- G ... Die ständige Einwirkung
- V ... Das Volumen des Tragwerksteils
- γ ... Wichte des Baustoffs

Für die homogenen Materialien darf die folgende Formel angewendet werden:

$$G = \gamma_{av}V \quad (33)$$

Dabei bedeutet:

$\gamma_{av}$  ... Durchschnittliche Wichte des Baustoffs

Die Wichte „ $\gamma$ “ und das Volumen „ $V$ “ sind hier die Zufallsvariablen. Um einen probabilistischen Ansatz zu ermöglichen, werden die Wahrscheinlichkeitsverteilungen der Zufallsvariablen benötigt. Laut PMC entsprechen die Wichte und die Abmessungen der Tragwerksteile einer Gaußverteilung, deren Eigenschaften sich in Kapitel 6.5.1.1 befinden. Z.B. finden sich der Mittelwert und Variationskoeffizient des Normalbetons gemäß PMC [41] in Tabelle 14.

Tabelle 14: Der Mittelwert und Variationskoeffizient des Normalbetons

Baustoff	Mittelwert (kN/m <sup>3</sup> )	Variationskoeffizient	Standardabweichung (kN/m <sup>3</sup> )
Normalbeton	24	0,04	0,96

Mithilfe der obenliegenden Werte wird die Verteilungsdichte der Wichte des Normalbetons in Abbildung 22 dargestellt. Für einen voll-probabilistischen Ansatz sollen statt einzelner Werte (z.B. der charakteristische Wert oder Nennwert) die Verteilungsdichten in den Berechnungen benutzt werden.

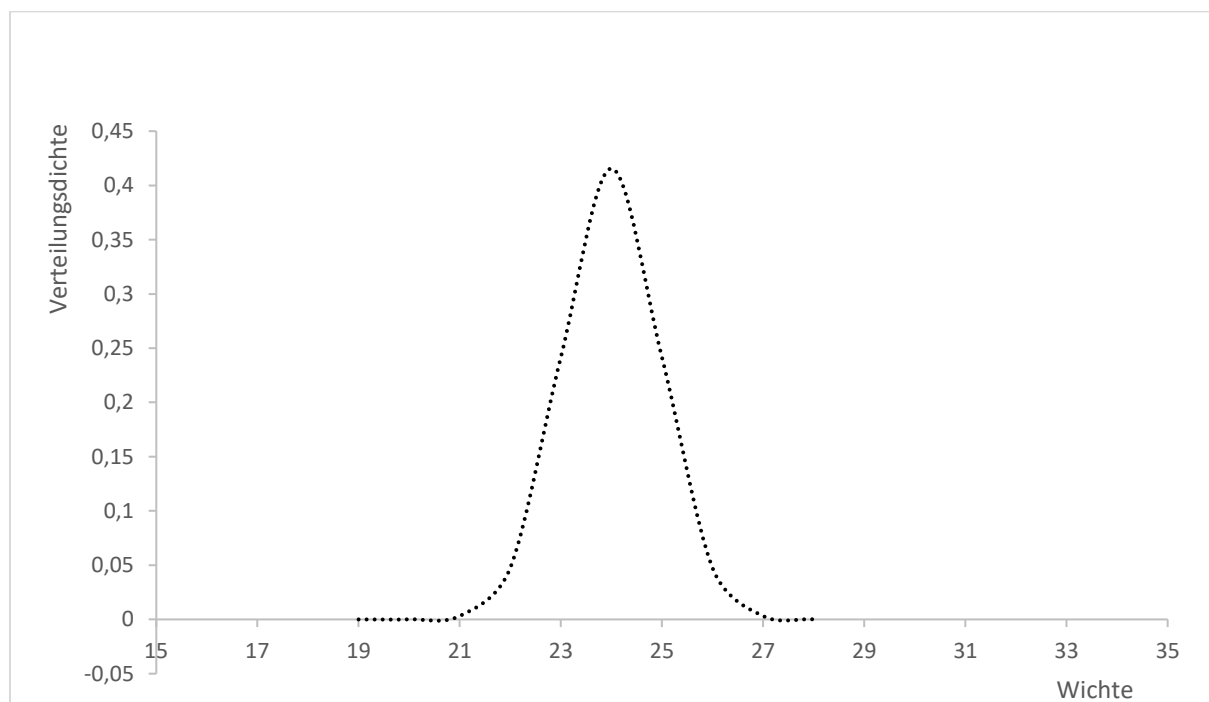


Abbildung 22: Verteilungsdichte der Wichte des Normalbetons

### 6.5.2.2 Material und geometrische Modelle

Die geometrischen Daten sind in den Planungsunterlagen angegeben. Deswegen sind sie in den meisten Fällen als Nennwerte definiert. Nur wenn geometrische Imperfektionen und Verformungen vorhanden sind und das Tragwerk empfindlich gegenüber diesen ist, müssen diese dann im Modell berücksichtigt werden.

Die Variablen für die Steifigkeit und Festigkeit haben eine feste Beziehung zu den Spannungen und Verformungen. Deswegen sind diese Variablen Elastizitätsmodul, Streckgrenze, Bruchfestigkeit usw. Diese Variablen sind im Allgemeinen Zufallsvariablen.

### 6.5.3 Basisvariablen im Vergleich

Die Basisvariablen in beiden Normen stehen in Bezug auf Wahrscheinlichkeitsdichten. Der Unterschied liegt aber darin, wie EN 1990 oder PMC den charakteristischen Wert definiert. In vorherigen Kapiteln (6.5.1 und 6.5.2) wurden sie für beide detailliert dargestellt.

Für EN 1990 gibt es die folgenden Möglichkeiten, um einen charakteristischen Wert zu bestimmen:

- Nennwerte,
- Mittelwerte,
- Fraktilwerte der Verteilungsdichte.

Für PMC gibt es die folgenden Möglichkeiten, um einen charakteristischen Wert zu bestimmen:

- Nennwerte,
- Zufallsvariablen,
- Zufallsfelder.

## 6.6 Nachweisverfahren

### 6.6.1 Nachweisverfahren in EN 1990

Das Nachweisverfahren in EN 1990 erfolgt durch Teilsicherheitsbeiwerte. Deswegen wird das Verfahren als „Nachweisverfahren mit Teilsicherheitsbeiwerte“ benannt. Das Konzept hat im Hintergrund die stochastischen Grundlagen. Trotzdem besitzt es zahlreiche Vereinfachungen, um das Konzept in der Praxis anwendbar zu machen. Die rein stochastischen bzw. voll-probabilistischen Methoden bringen bessere und zuverlässigere Ergebnisse. Aber diese Methoden sind sehr aufwendig und deswegen werden sie in der Praxis nicht bevorzugt.

Die Teilsicherheitsbeiwerte werden in zwei Seiten geteilt. Diese sind die Einwirkungsseite und Widerstandsseite. Sie werden in Abbildung 23 dargestellt [46].



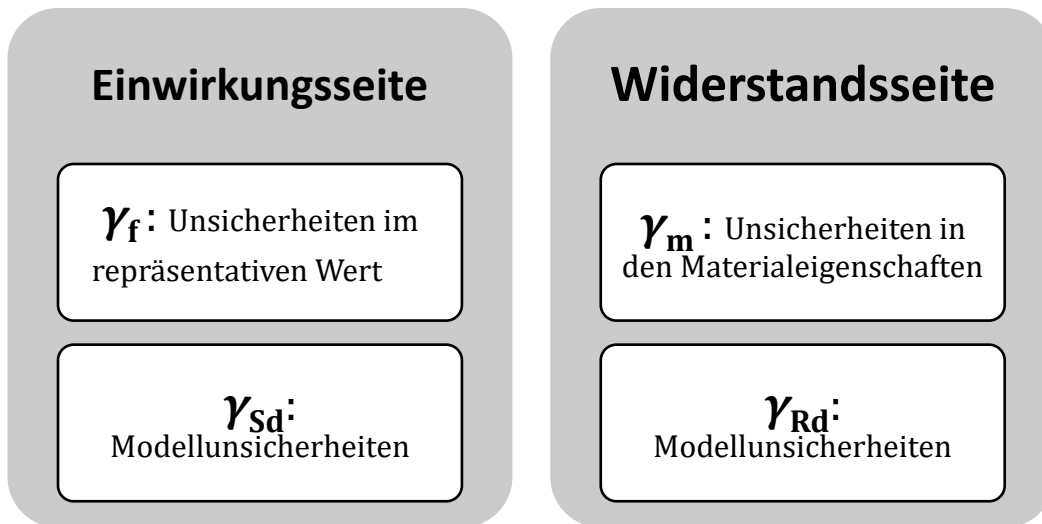


Abbildung 23: Die einzelnen Teilsicherheitsbeiwerte

### 6.6.1.1 Einwirkungsseite

Die Teilsicherheitsbeiwerte sollten von den charakteristischen Werten bis zu den Bemessungswerten der Auswirkungen von Einwirkungen angewendet [47]. Um die repräsentativen Werte zu erhalten, werden die charakteristischen Werte mit Kombinationsbeiwerten multipliziert. Dieser Prozess wurde detailliert in Kapitel 6.5.1.1 erläutert. Die erste Multiplikation für die Unsicherheiten beginnt mit  $\gamma_f$ . Mithilfe dieses Teilsicherheitsbeiwerts werden die Bemessungswerte der Einwirkungen (Formel (34)) berechnet. Das Hauptziel ist hier aber die Festlegung der Bemessungswerte für die Auswirkungen der Einwirkungen (Formel (35)). Dieser Prozess in Abbildung 24 dargestellt.

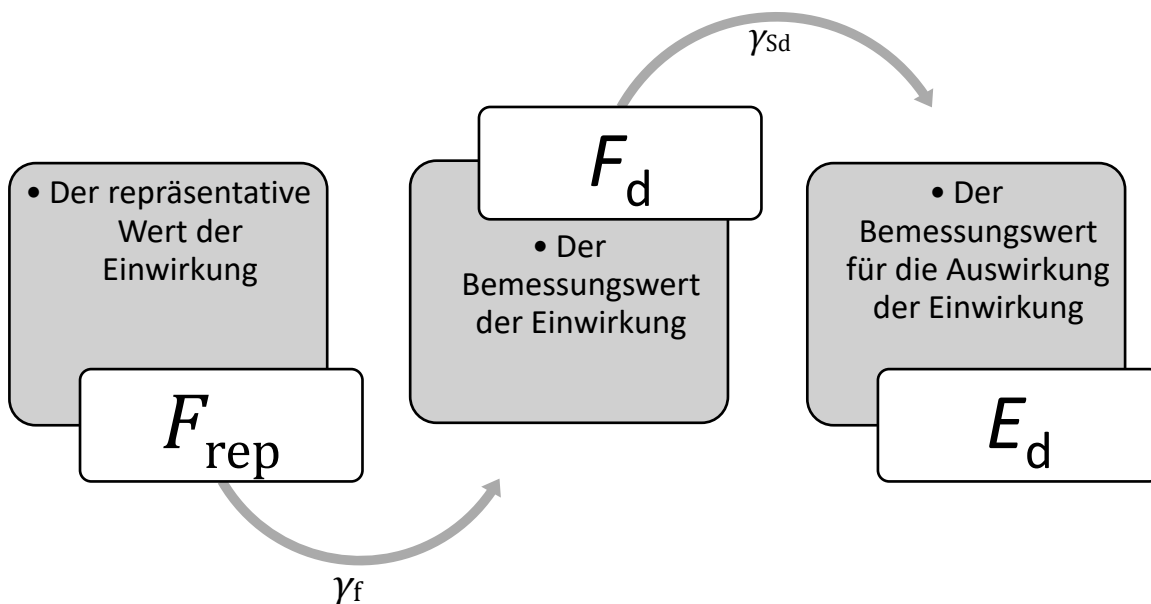


Abbildung 24: Die Festlegung des Bemessungswerts für die Auswirkung der Einwirkung

Diese Auswirkungen sind abhängig von den folgenden Punkten:

- Bemessungswerte der Einwirkungen,
- Geometrische Größen z.B. der Querschnitt des Bauteils,
- Teilsicherheitsbeiwert für die Modellunsicherheiten.

Diese Auswirkungen können sein:

- Schnittgrößen:
  - Momente (Biegemomente und Torsionsmoment),
  - Querkräfte,
  - Normalkräfte.
- Spannungen:
  - Normalspannungen,
  - Schubspannungen.
- Verformungen:
  - Durchbiegungen,
  - Verschiebungen,
  - Verdrehungen usw.

$$F_d = F_{\text{rep}} \times \gamma_f \quad (34)$$

Dabei bedeutet:

$F_d$  ... Bemessungswert der Einwirkung

$F_{\text{rep}}$  ... Der repräsentative Wert der Einwirkung

$\gamma_f$  ... Unsicherheiten im repräsentativen Wert

$$E_d = \gamma_{\text{sd}} \times E \{ \gamma_{f,i} \times F_{\text{rep},i}; a_d \} \quad (35)$$

$$i \geq 1$$

Dabei bedeutet:

$E_d$  ... Bemessungswert für die Auswirkungen der Einwirkung

$a_d$  ... Bemessungswert der geometrischen Größen

$\gamma_{\text{sd}}$  ... Modellunsicherheiten an der Einwirkungsseite

Im Regelfall darf für diese beiden Teilsicherheitsbeiwerte ein Teilsicherheitsbeiwert „ $\gamma_{F,i}$ “ (Formel (37)) für die Bemessungswerte der Auswirkungen von Einwirkungen „ $E_d$ “ benutzt werden, was der Multiplikation der Teilsicherheitsbeiwerte der Einwirkungen entspricht. Somit kann die folgende Formel zur Anwendung kommen:

$$E_d = E\{\gamma_{F,i} \times F_{rep,i}; a_d\} \quad (36)$$

$$i \geq 1$$

$$\gamma_{F,i} = \gamma_{sd} \times \gamma_{f,i} \quad (37)$$

$$i \geq 1$$

Die möglichen Teilsicherheitsbeiwerte für Einwirkungen sind:

- $\gamma_G$ : Teilsicherheitsbeiwert für die ständigen Einwirkungen
- $\gamma_Q$ : Teilsicherheitsbeiwert für die veränderlichen Einwirkungen
- $\gamma_A$ : Teilsicherheitsbeiwert für die außergewöhnlichen Einwirkungen

Die Teilsicherheitsbeiwerte werden unter günstigen und ungünstigen Auswirkungen unterschiedlich festgelegt. Die festgelegten Teilsicherheitsbeiwerte für die Einwirkungen finden sich in Tabelle 15.

Tabelle 15: Teilsicherheitsbeiwerte für die Einwirkungen

	Auswirkung			
	günstig		ungünstig	
	Bemessungssituation			
	Vorübergehend/ ständig	außergewöhnlich/Erd- beben	vorüberge- hend/ständig	außergewöhnlich/Erd- beben
$\gamma_G$	1,35	1,00	1,00	1,00
$\gamma_Q$	1,5	0,00	1,00	0,00
$\gamma_A$	-	-	-	1,00

### 6.6.1.2 Widerstandsseite

Die Teilsicherheitsbeiwerte sollten von den charakteristischen Werten bis zu den Bemessungswerten der Tragfähigkeit angewendet werden [47]. Die Festlegung der charakteristischen Werte wurde detailliert in Kapitel 6.5.1.26.5.1 erläutert. Die erste Multiplikation für die Unsicherheiten beginnt mit  $\gamma_m$ . Mithilfe dieses Teilsicherheitsbeiwerts werden die Bemessungswerte der Materialeigenschaften (Formel (38)) berechnet. Das Hauptziel ist hier aber die Festlegung der Bemessungswerte für die Auswirkungen der Einwirkungen (Formel(39)). Dieser Prozess ist in Abbildung 25 dargestellt.

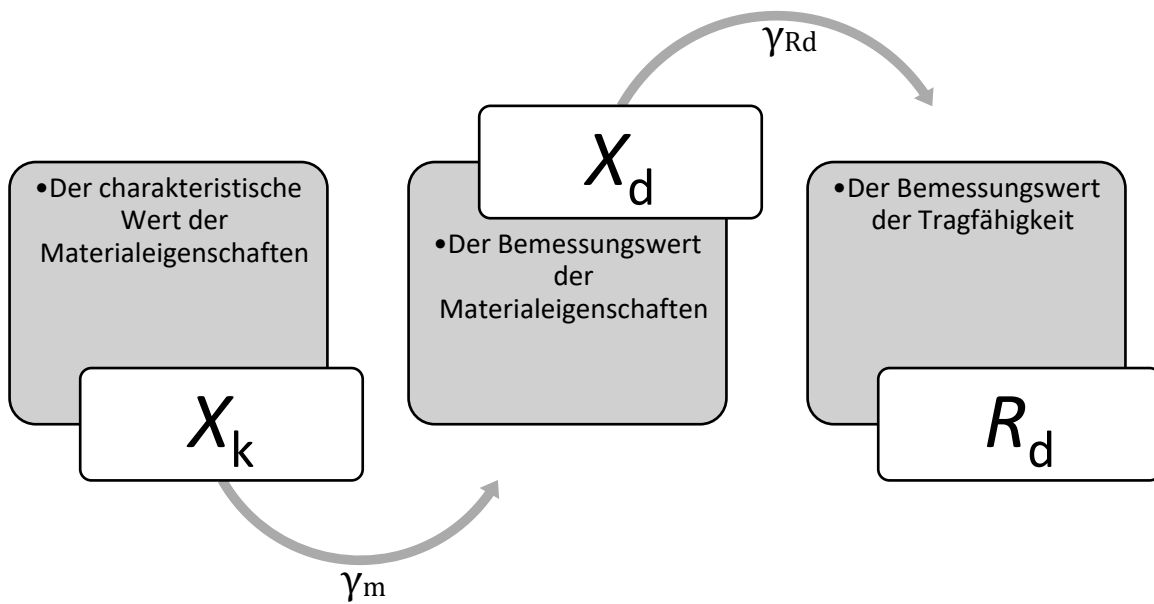


Abbildung 25: Die Festlegung des Bemessungswerts für die Materialeigenschaften

$$X_d = \eta \frac{X_k}{\gamma_m} \quad (38)$$

Dabei bedeutet:

$X_d$  ... Bemessungswert der Materialeigenschaften

$X_k$  ... Der charakteristische Wert der Materialeigenschaften

$\gamma_m$  ... Unsicherheiten im charakteristischen Wert

$\eta$  ... Umrechnungsfaktor

Mit dem Umrechnungsfaktor werden folgende Auswirkungen berücksichtigt:

- Volumen,
- Maßstab,
- Feuchtigkeit,
- Temperatur usw.

$$R_d = \frac{1}{\gamma_{Rd}} \times R \left\{ \eta_i \frac{X_{k,i}}{\gamma_{m,i}}; a_d \right\} \quad (39)$$

$$i \geq 1$$

Dabei bedeutet:

$R_d$  ... Der Bemessungswert der Tragfähigkeit

$a_d$  ... Bemessungswert der geometrischen Größen

$\gamma_{Rd}$  ... Modellunsicherheiten an der Widerstandsseite

Im Regelfall darf für diese beiden Teilsicherheitsbeiwerte ein vereinfachter Teilsicherheitsbeiwert „ $\gamma_{M,i}$ “ (Formel(41) und Tabelle 16) für die Bemessungswerte der Tragfähigkeit „ $R_d$ “ benutzt werden. Somit kann die folgende Formel zur Anwendung kommen:

$$R_d = R \left\{ \eta_i \frac{X_{k,i}}{\gamma_{M,i}}; a_d \right\} \quad (40)$$
$$i \geq 1$$

$$\gamma_{M,i} = \gamma_{Rd} \times \gamma_{m,i} \quad (41)$$
$$i \geq 1$$

Tabelle 16: Teilsicherheitsbeiwerte der Materialeigenschaften [25]

Material	$\gamma_M$
Stahlbeton	1,5
Betonstahl	1,15
Stahl	1,0 ... 1,25
Holz	1,3
Mauerwerk	1,5

### 6.6.1.3 Nachweisverfahren für den GZT

Der Abriss über den GZT findet sich in Kapitel 4.1.1.1. In diesem Teil wird der Prozess für das Nachweisverfahren der Tragfähigkeit erläutert. Im Allgemeinen ist die folgende Formel zu benutzen:

$$E_d \leq R_d \quad (42)$$

Dabei bedeutet:

$E_d$  ... Der Bemessungswert für die Auswirkungen der Einwirkungen

$R_d$  ... Der Bemessungswert der Tragfähigkeit

„ $E_d$ “ besteht i.d.R. aus vielen Einwirkungen. Aber es ist nicht möglich, dass alle diese Einwirkungen gleichzeitig und in vollem Umfang auf das Tragwerk einwirken. Die Festlegung des „ $E_d$ “ ist abhängig von den Kombinationen der unterschiedlichen Einwirkungen.

Für den GZT sind drei Kombinationen der Bemessungssituationen zu berücksichtigen:

- Ständige und vorübergehende Bemessungssituationen bzw. Grundkombination:

$$E_d = E\{\gamma_{G,j} G_{k,j}; \gamma_P P; \gamma_{Q,1} Q_{k,1}; \gamma_{Q,i} \psi_{k,i} Q_{k,i}\} \quad (43)$$

$$j \geq 1; i > 1$$

bzw.

$$E_d = \sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} G_{k,j} \oplus \gamma_P P \oplus \gamma_{Q,1} Q_{k,1} \oplus \sum_{i \geq 1} \gamma_{Q,i} \psi_{k,i} Q_{k,i} \quad (44)$$

Dabei bedeutet:

$\gamma_P$  ... Teilsicherheitsbeiwert für die Vorspannungskraft

P ... Vorspannungskraft

- Außergewöhnliche Bemessungssituationen

$$E_{d,A} = E\{G_{k,j}; P; A_d; Q_{k,1}; (\psi_{1,1} \text{ oder } \psi_{2,1}) Q_{k,1}; \psi_{2,i} Q_{k,i}\} \quad (45)$$

$$j \geq 1; i > 1$$

bzw.

$$E_{d,A} = \sum_{j \geq 1} G_{k,j} \oplus P \oplus A_d \oplus (\psi_{1,1} \text{ oder } \psi_{2,1}) Q_{k,1} \sum_{i \geq 1} \psi_{2,i} Q_{k,i} \quad (46)$$

Dabei bedeutet:

$A_d$  ... Bemessungswert für die außergewöhnlichen Einwirkungen

- Bemessungssituationen für Erdbeben.

$$E_{d,AE} = E\{G_{k,j}; P; A_{Ed}; \psi_{2,i} Q_{k,i}\} \quad (47)$$

$$j \geq 1; i > 1$$

bzw.

$$E_{d,AE} = \sum_{j \geq 1} G_{k,j} \oplus P \oplus A_{Ed} \oplus \sum_{i \geq 1} \psi_{2,i} Q_{k,i} \quad (48)$$

Dabei bedeutet:

$A_{Ed}$  ... Bemessungswert für die Einwirkung infolge von Erdbeben

Die veränderlichen Einwirkungen sind vielfältig und ihr Zusammenwirken hat eine geringe Eintrittswahrscheinlichkeit. Deswegen ist ein Nachlass bei ihren charakteristischen Werten notwendig. Das erfolgt mithilfe der Kombinationsbeiwerte. Die Kombinationsbeiwerte im Hochbau befinden sich in Tabelle 17. Um den Bemessungswert (Formel(65)) der veränderlichen Einwirkungen festzulegen, gibt es 4 mögliche repräsentative Werte (Formel(50)). Sie sind in Abbildung 26 dargestellt und folgendermaßen aufgelistet:

- $Q_k$  – Der charakteristische Wert,
- $\psi_0 Q_k$  – Der Kombinationswert: Für die Nachweise des GZG und GZT mit irreversiblen Auswirkungen,
- $\psi_1 Q_k$  – Der häufige Wert: Für die Nachweise des GZT mit außergewöhnlichen Einwirkungen und GZG mit reversiblen Einwirkungen,
- $\psi_2 Q_k$  – Der quasi-ständige Wert: Für die Nachweise des GZT mit außergewöhnlichen Einwirkungen und GZG mit reversiblen Einwirkungen sowie Langzeitwirkungen (z.B. Kriechen, Schwinden usw.). [7, 9, 45]

$$Q_d = \{Q_k; \psi_0 Q_k; \psi_1 Q_k; \psi_2 Q_k\} \quad (49)$$

$$Q_d = Q_{rep} \times \gamma_f \quad (50)$$

Tabelle 17 :Die Kombinationsbeiwerte im Hochbau gemäß EN 1991

<b>Einwirkungen (Nutzlasten im Hochbau laut EN 1991-1-1)</b>	$\psi_0$	$\psi_1$	$\psi_2$
Kategorie A: Wohngebäude	0,7	0,5	0,3
Kategorie B: Bürogebäude	0,7	0,5	0,3
Kategorie C: Versammlungsbereiche	0,7	0,7	0,6
Kategorie D: Verkaufsflächen	0,7	0,7	0,6
Kategorie E: Lagerflächen	1,0	0,9	0,8
Kategorie F: Fahrzeugverkehr im Hochbau $\leq 30$ kN	0,7	0,7	0,6
Kategorie G: Fahrzeugverkehr $30\text{kN} < \text{Fahrzeuggewicht} \leq 160\text{kN}$	0,7	0,5	0,3
Kategorie H: Dächer	0	0	0
<b>Schneelasten im Hochbau (EN 1991-1-3)</b>			
Für Orte mit einer Höhe über 1000 m über Normal-Null	0,7	0,5	0,2
Für Orte mit einer Höhe niedriger 1000 m über Normal-Null	0,5	0,5	0
Windlasten im Hochbau (EN 1991-1-4)	0,6	0,2	0
Temperaturanwendungen ohne Brand im Hochbau (EN 1991-1-5)	0,6	0,5	0

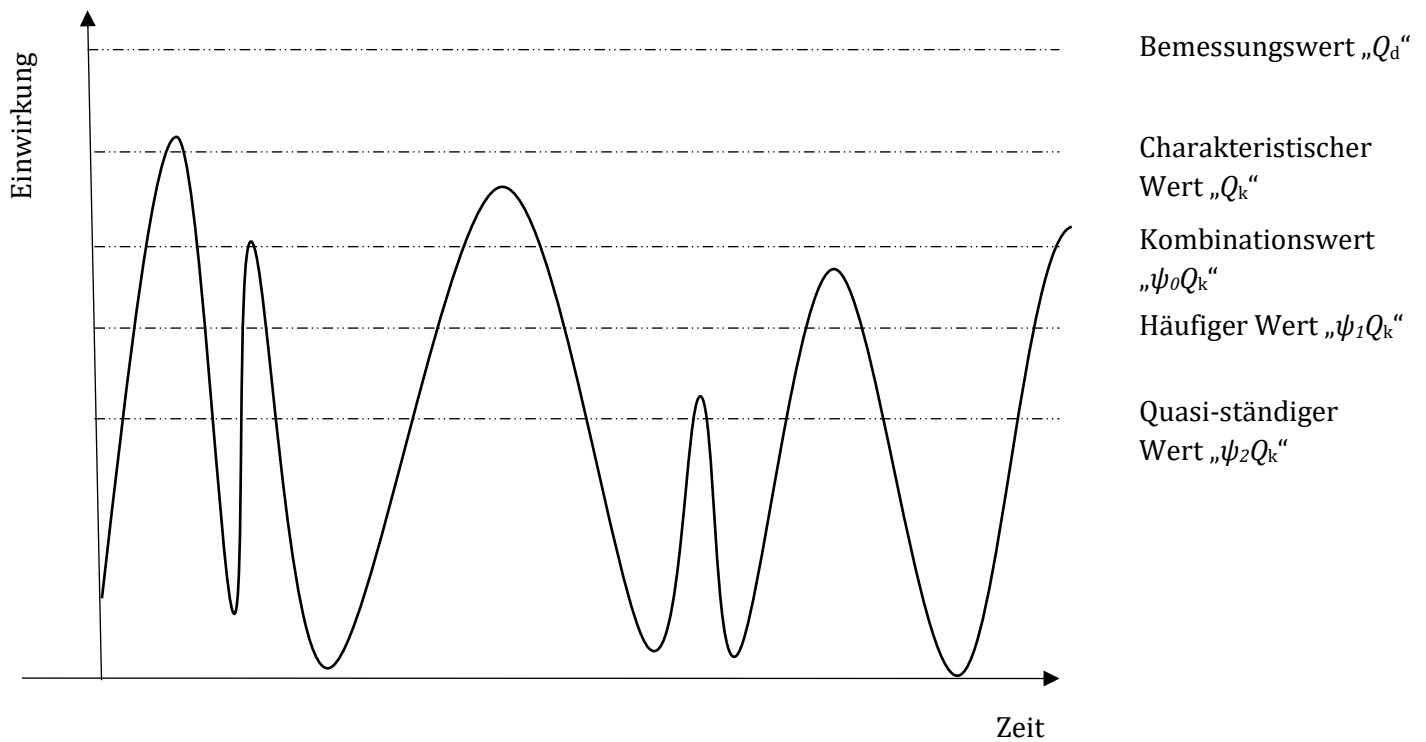


Abbildung 26: Repräsentative Werte der veränderlichen Einwirkungen

#### 6.6.1.4 Nachweisverfahren für den GZG

Der Abriss über den GZG findet sich in Kapitel 6.6.1.44.1.1.1. In diesem Teil wird der Prozess für das Nachweisverfahren der Gebrauchstauglichkeit erläutert. Im Allgemeinen ist die folgende Formel zu benutzen:



$$E_d \leq C_d \quad (51)$$

Dabei bedeutet:

$E_d$  ... Der Bemessungswert für die Auswirkungen der Einwirkungen

$C_d$  ... Der Bemessungswert der Gebrauchstauglichkeit

„ $E_d$ “ besteht i.d.R. aus vielen Einwirkungen. Aber es ist nicht möglich, dass alle diese Einwirkungen gleichzeitig und in vollem Umfang auf das Tragwerk einwirken. Die Festlegung des „ $E_d$ “ ist abhängig von den Kombinationen der unterschiedlichen Einwirkungen.

Für den GZG sind drei Kombinationen der Bemessungssituationen zu berücksichtigen:

- Die charakteristische Kombination:

$$E_d = E\{G_{k,j}; P; Q_{k,1}; \psi_{0,i} Q_{k,i}\} \quad (52)$$

$$j \geq 1; i > 1$$

bzw.

$$E_d = \sum_{j \geq 1} G_{k,j} \oplus P \oplus Q_{k,1} \oplus \sum_{i \geq 1} \psi_{0,i} Q_{k,i} \quad (53)$$

- Die häufige Kombination:

$$E_d = E\{G_{k,j}; P; \psi_{1,1} Q_{k,1}; \psi_{2,i} Q_{k,i}\} \quad (54)$$

$$j \geq 1; i > 1$$

bzw.

$$E_d = \sum_{j \geq 1} G_{k,j} \oplus P \oplus \psi_{1,1} Q_{k,1} \oplus \sum_{i \geq 1} \psi_{2,i} Q_{k,i} \quad (55)$$

- Die quasi-ständige Kombination:

$$E_d = E\{G_{k,j}; P; \psi_{2,i}Q_{k,i}\} \quad (56)$$

$$j \geq 1; i > 1$$

bzw.

$$E_d = \sum_{j \geq 1} G_{k,j} \oplus P \oplus \sum_{i \geq 1} \psi_{2,i}Q_{k,i} \quad (57)$$

### 6.6.2 Nachweisverfahren im PMC

Um das Konzept der Nachweise im PMC nachvollzuziehen, soll die Grenzzustandsfunktion (Abbildung 27) erläutert werden. Die Funktion lässt sich folgendermaßen mit den Basisvariablen beschreiben:

$$Z = g(X(t)) = R - E = \begin{cases} < 0 \text{ Versagen} \\ = 0 \text{ Grenzzustand} \\ > 0 \text{ kein Versagen} \end{cases} \quad (58)$$

$$X(t) = X_1(t) + X_2(t) + \dots + X_n(t) \quad (59)$$

Dabei bedeutet:

Z bzw.  $g(X(t))$  ... Grenzzustandsfunktion

R ... Widerstand

E ... Einwirkung

X ... Basisvariable

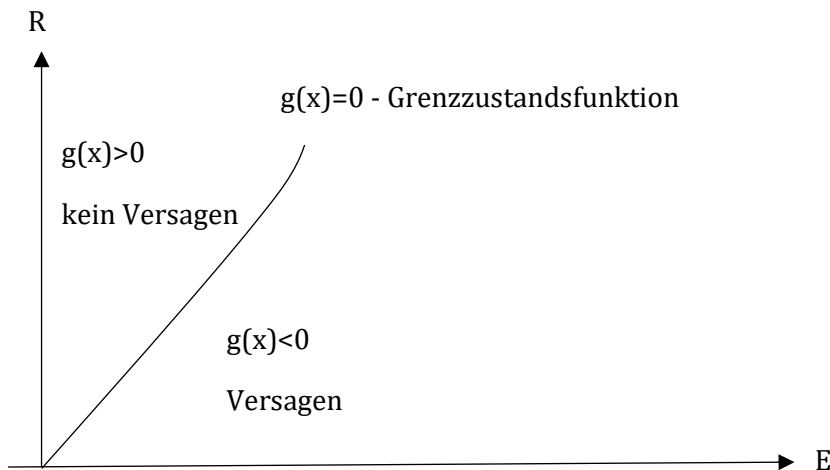


Abbildung 27: Darstellung der Grenzzustandsfunktion

Ist  $f_x(x)$  die multivariate Wahrscheinlichkeitsdichte, kann die Versagenswahrscheinlichkeit mit dem folgendem Integral beschrieben [48]:

$$p_f = \int_{g(x) \leq 0} f_x(x) dx \quad (60)$$

Dieses Integral gibt die Fläche der negativen Z in der Verteilung  $f_x(x)$  an, was in Abbildung 28 dargestellt wird.

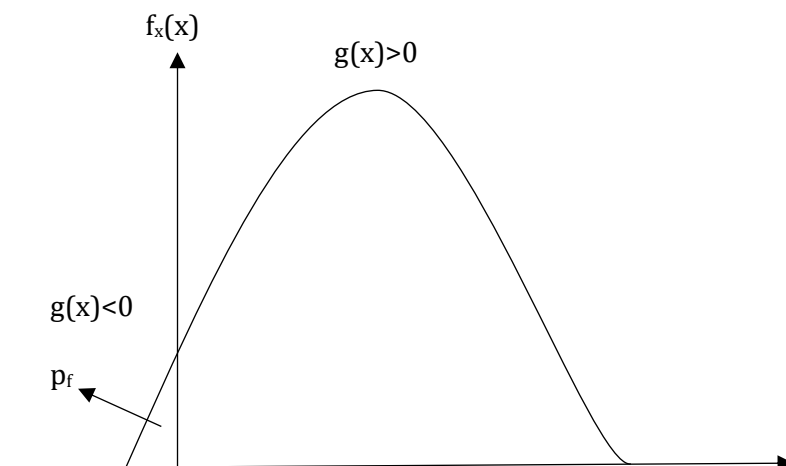


Abbildung 28: Darstellung der Fläche der Versagenswahrscheinlichkeit

Der Ansatz des Nachweisverfahrens im PMC bezieht sich auf Risikobewertung und Zuverlässigkeitsindex. Für die voll-probabilistischen Verfahren ist der Zuverlässigkeitsindex festzulegen [49]. Die Beziehung zwischen den Zuverlässigkeitsindizes und den Versagenswahrscheinlichkeiten wird folgendermaßen formuliert:

$$\beta = -\Phi^{-1}(p_f) \quad (61)$$

Dabei bedeutet:

$\beta$  ... Der Zuverlässigkeitsindex

$\Phi$  ... Die Normalverteilungsfunktion

### 6.6.2.1 Nachweisverfahren für den GZT

Im PMC legte das JCSS die Zuverlässigkeitsindizes, was in Tabelle 18 dargestellt, abhängig von der Versagenswahrscheinlichkeit „ $p_f$ “ und Schadenfolgeklasse fest.

Tabelle 18: Zuverlässigkeitsindizes für GZT gemäß PMC

Kosten für das festgelegte Sicherheitsniveau	Zuverlässigkeitsindizes		
	Niedrige Schadensfolgen	Mittlere Schadensfolgen	Hohe Schadensfolgen
Groß	$\beta=3.1$ ( $p_f \approx 10^{-3}$ )	$\beta=3.3$ ( $p_f \approx 5 \times 10^{-4}$ )	$\beta=3.7$ ( $p_f \approx 10^{-4}$ )
Normal	$\beta=3.7$ ( $p_f \approx 10^{-4}$ )	$\beta=4.2$ ( $p_f \approx 10^{-5}$ )	$\beta=4.4$ ( $p_f \approx 5 \times 10^{-5}$ )
Klein	$\beta=4.2$ ( $p_f \approx 10^{-5}$ )	$\beta=4.4$ ( $p_f \approx 5 \times 10^{-5}$ )	$\beta=4.7$ ( $p_f \approx 10^{-6}$ )

Der Nachweis gemäß PMC für GZT erfolgt durch Zuverlässigkeitsindizes. Die Formel dafür lautet folgendermaßen:

$$\beta_{\text{vorh}} \geq \beta_t \quad (62)$$

Dabei bedeutet:

$\beta_t$  ... Zielwert für die Zuverlässigkeit

Die Kombination der Einwirkungen ist mithilfe des Ferry Borges Castanheta Modells:

$$E(t) = c_1 F_1(t) + c_2 F_2(t) + \dots \quad (63)$$

### 6.6.2.2 Nachweisverfahren für den GZG

Im PMC legte das JCSS die Zuverlässigkeitsindizes abhängig von der Versagenswahrscheinlichkeit „ $p_f$ “ und Schadenfolgeklasse fest, was in Tabelle 19 dargestellt ist.

Tabelle 19: Zuverlässigkeitsindizes für GZG gemäß PMC

Kosten für das festgelegte Sicherheitsniveau	Zuverlässigkeitsindizes
Groß	$\beta=1.3(p_f \approx 10^{-1})$
Normal	$\beta=1.7(p_f \approx 5 \times 10^{-2})$
Klein	$\beta=2.3(p_f \approx 10^{-2})$

Der Nachweis gemäß PMC für den GZG erfolgt durch Zuverlässigkeitsindizes. Die Formel dafür lautet folgendermaßen:

$$\beta_{\text{vorh}} \geq \beta_t \quad (64)$$

Die Kombination der Einwirkungen ist mithilfe des Ferry Borges Castanheta Modells:

$$E(t) = c_1 F_1(t) + c_2 F_2(t) + \dots \quad (65)$$

### 6.6.3 Nachweisverfahren im Vergleich

Beim Nachweisverfahren in EN 1990 stehen die Zuverlässigkeitsmethoden im Hintergrund. Die Zuverlässigkeitsmethoden werden bei der Festlegung der Bemessungswerte für sowohl die Einwirkungsseite als auch die Widerstandsseite benutzt. Der Nachweis erfolgt durch den Vergleich der Bemessungswerte der zuvor genannten zwei Seiten. Um die Bemessungswerte festzulegen, kommen die Teilsicherheitsbeiwerte  $\gamma_f$ ,  $\gamma_m$  und  $\gamma_d$  ( $\gamma_{Rd}$  und  $\gamma_{sd}$ ) zum Einsatz. Diese Teilsicherheitsbeiwerte bringen eine Vereinfachung des Nachweisverfahrens in der Praxis. Die Zeitunabhängigkeit der Einwirkungen wird mithilfe der Kombinationsbeiwerte und Bemessungssituationen berücksichtigt.

Beim Nachweisverfahren im PMC stehen die Zuverlässigkeitsmethoden im Vordergrund. Dieses Verfahren ist zulässiger, aber komplizierter als das Verfahren in EN 1990. Mithilfe der Grenzzustandsfunktion und zahlreichen Simulationen werden die Anzahl der Versagensfälle und damit die Versagenswahrscheinlichkeit bzw. der Zuverlässigkeitsindex festgelegt. Danach werden der Zielwert der Zuverlässigkeit für die vorher festgelegte Schadensfolge und der Zuverlässigkeitsindex verglichen. Um die Kombination für die Einwirkungen zu erhalten, werden die zeitlich veränderlichen Zufallsfelder  $F(t)$  benutzt.

Letzten Endes wenden beide Nachweisverfahren die Zuverlässigkeitsmethoden an. Die erste Methode, die als semi-probabilistisches Nachweisverfahren bezeichnet wird, enthält eine Menge Vereinfachungen für die Praxis. Diese sind die Teilsicherheitsbeiwerte, Kombinationsbeiwerte und Bemessungssituationen. Im Gegensatz dazu wendet die zweite Methode die stochastischen Elemente wie Zufallsvariablen, Zufallsfelder, Wahrscheinlichkeitsberechnungen usw. an. Das bringt zuverlässigere Ergebnisse mit sich. Jedoch macht es die Berechnungen aufwendiger.

## 6.7 Zuverlässigkeitsmethoden

### 6.7.1 Zuverlässigkeitsmethoden in EN 1990

In EN 1990 kommen die Zuverlässigkeitsmethoden zum Einsatz, um die Bemessungswerte und Teilsicherheitsbeiwerte festzulegen. Die Festlegung erfolgt durch Kalibrierung der ausgesuchten Zuverlässigkeitsmethoden. Die Festlegung der Bemessungswerte ist detailliert in Kapitel 6.5.1 erläutert. Hier in diesem Kapitel wird die Kalibrierung der Teilsicherheits- und Kombinationsbeiwerte behandelt.

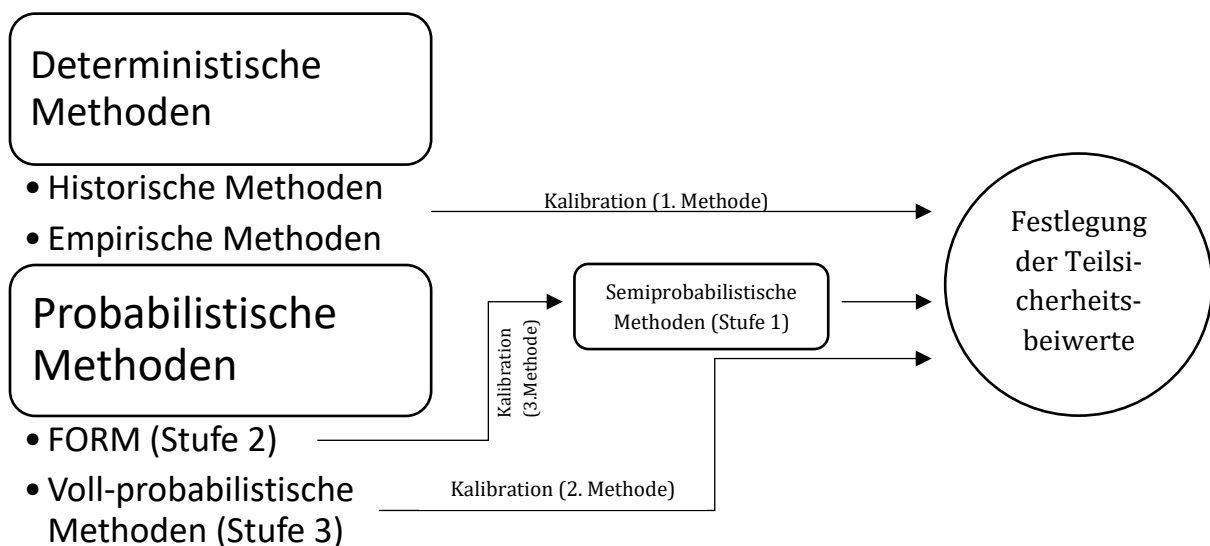


Abbildung 29: Festlegung der Teilsicherheitsbeiwerte mittels Zuverlässigkeitsmethoden gemäß EN 1990

In EN 1990 wird i.d.R. die erste Kalibrationsmethode angewendet. Bei dieser Methode stammen die Ausgangswerte aus Erfahrungen. Die anderen Methoden der Kalibration erfolgen durch stochastische Prozesse und finden seltener Anwendung in Bemessungen nach EN 1990. Diese kommen meistens für die komplizierten Aufträge zum Einsatz. Die möglichen Zuverlässigkeitsmethoden sind in Abbildung 29 dargestellt.

Die Zuverlässigkeitsmethoden werden detailliert in Kapitel 5 erläutert.

## 6.7.2 Zuverlässigkeitsmethoden im PMC

Im PMC kommen die Zuverlässigkeitsmethoden zum Einsatz, um direkt beim Nachweisverfahren angewendet zu werden. Wie vorher erläutert lautet die Formel für die Berechnung der Versagenswahrscheinlichkeit wie folgt:

$$p_f = \int_{g(x) \leq 0} f_x(x) dx \quad (66)$$

Um die Versagenswahrscheinlichkeit „ $p_f$ “ zu berechnen, gibt es laut dem PMC zwei üblichen Methoden:

- Asymptomatische Annäherungsmethode,
- Simulationsmethode.

Bei den asymptomatischen Annäherungsmethoden können die FORM und SORM angewendet werden.

Bei den Simulationsmethoden haben die Stichprobenmethoden große Bedeutung. Im PMC werden die Monte-Carlo Simulationen empfohlen. Jedoch ist die direkte Monte-Carlo Simulation bzw. Stichproben (engl. Random Sampling) wegen ihrer großen Stichprobenanzahl in der Praxis nicht empfehlenswert. Deswegen können die fortgeschrittenen Methoden der Stichprobe eingesetzt werden:

- Importance Sampling,
- Adaptive Sampling,
- Directional Sampling.

Die Zuverlässigkeitsmethoden sind detailliert in Kapitel 5 erläutert.

## 6.7.3 Zuverlässigkeitsmethoden im Vergleich

Die Zuverlässigkeitsmethoden sind für beide Normen von großer Wichtigkeit. Jedoch sind die Anwendungsbereiche unterschiedlich. In EN 1990 stehen diese Methoden im Hintergrund und sie sind die Hilfsmittel für das semi-probabilistisches Nachweisverfahren. Im PMC stehen sie hingegen im Vordergrund und der PMC benutzt sie direkt beim Nachweisverfahren.

Die Aufgaben der Zuverlässigkeitsmethoden in EN 1990 sind:

- Der stochastische Ansatz bei der Festlegung der charakteristischen Werte,
- Kalibrierung der stochastischen Ansätze, um die Teilsicherheitsbeiwerte und Kombinationsbeiwerte festzulegen.

Die Aufgabe der Zuverlässigkeitsmethoden im PMC ist:

- Berechnung der Versagenswahrscheinlichkeit bzw. Zuverlässigkeitsindex.

## 7 Vergleiche mithilfe numerischer Beispiele

In dieser Arbeit werden 2 Beispiele berücksichtigt. Diese werden numerisch sowohl nach EN als auch nach dem PMC gelöst. Um die numerischen Beispiele zu berechnen, werden 2 verschiedene Arten von Software angewandt. Die Berechnung nach EN erfolgt durch „Dlubal Rstab 8.22“ und für die Berechnungen nach dem PMC werden „Sturel Comrel 10“ benutzt.

Im ersten Beispiel wird der GZT für einen Einfeldträger aus Stahlbeton unter Gleichlast berechnet und im zweiten Teil wird der GZT für einen Kragträger aus Stahl unter Gleichlast berechnet. Die detaillierten Informationen der Beispiele sind in Kapitel 7.1 und 7.2 angeführt.

### 7.1 Einfeldträger unter Gleichlast

Das statische System wird vor allem in „Rstab“ modelliert und mithilfe des Zusatzmoduls „Beton – Stahlbetonbemessung von Stäben“ untersucht. In diesem Beispiel ist die maßgebende Kombination die ständige und vorübergehende Bemessungssituation bzw. Grundkombination für den GZT, die in Formel (58) gegeben ist. Die erforderliche Bewehrungsfläche „ $A_s$ “ nach EN 1992-1-1:2004/A1:2014 [50] wird vom Zusatzmodule abgelesen.

Im zweiten Schritt werden die Verteilungen der Zufallsvariablen und die deterministischen Werte inkl. Bewehrungsfläche in der Software „Comrel 10“ definiert. Um den Vergleich zu ermöglichen, wird die Bewehrungsfläche als ein deterministischer Wert angenommen und aus „Rstab“ übernommen. Dieser Prozess ermöglicht den Zuverlässigkeitsindex „ $\beta$ “ festzulegen. Der vorhandene Zuverlässigkeitsindex wird mit dem vom PMC festgelegten Zielwert „ $\beta_t$ “ verglichen. Schließlich werden Iterationen ausgeführt, um sich an den Zielwert anzunähern.

Der Einfeldträger und der Stahlbetonquerschnitt des Beispiels sind in Abbildung 31 und Abbildung 30 dargestellt. Die festgelegten Werte für das Beispiel 1 befinden sich in Tabelle 20.

Als Stahlbetongüte wurde C20/25 gewählt und die Bewehrungsstäbe sind aus B500B.

Tabelle 20: Die festgelegten Werte für Beispiel 1

Basisvariable	Beschreibung	Wert
q	Nutzlast	10 kN/m
l	Stützweite	8 m
h	Querschnittshöhe	0,8 m
b	Querschnittsbreite	0,4 m
$d_1$	Betondeckung	0,05 m

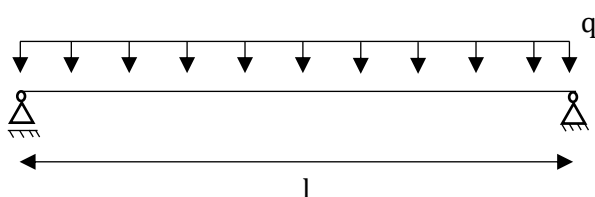


Abbildung 31: Das statische System für Beispiel 1

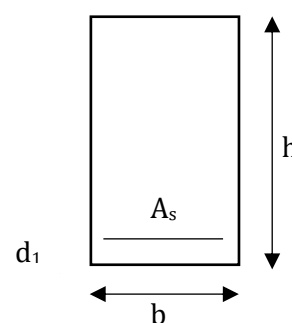


Abbildung 30: Der Querschnitt für Beispiel 1



### 7.1.1.1 Lösung nach EN 1990

Die Berechnungen nach EN 1990 zur Festlegung der erforderlichen Längsbewehrung ist unter folgenden Umständen und mit folgenden Schritten in Rstab modelliert:

- Definition des Lastfalls für das Eigengewicht des Trägers als LF 1,
- Definition des Lastfalls für die Nutzlast: Wohngebäude mit 5 m Einflussbreite (5 m x 2 kN/m<sup>2</sup>=10 kN/m),
- Generierung der Lastfallkombination von Rstab nach EN 1990 selbst,
- Modellierung des statistischen Systems,
- Berechnung nach der Grundkombination,
- Erhalten der erforderlichen Längsbewehrung im Zusatzmodule.

Das größte Biegemoment in y-Richtung „ $M_y$ “, dessen Verlauf in Abbildung 32 dargestellt ist, beträgt für die oben genannten Angaben 206,4 kNm. Unter diesem Biegemoment ist die erforderliche Längsbewehrung (Abbildung 33) 6,1 cm<sup>2</sup>. Diese Ergebnisse sind in Tabelle 21 zu finden.

Tabelle 21: Die benötigten Ergebnisse von Rstab

$M_{y,max}$	206,4 kNm
$A_{s,erf}$	6,1 cm <sup>2</sup>

Die detaillierten Informationen über die Lösungen nach EN 1990 mithilfe von Rstab finden sich als Ausdrucksprotokoll in ANHANG A: Ausdrucksprotokoll von Rstab für Beispiel 1.

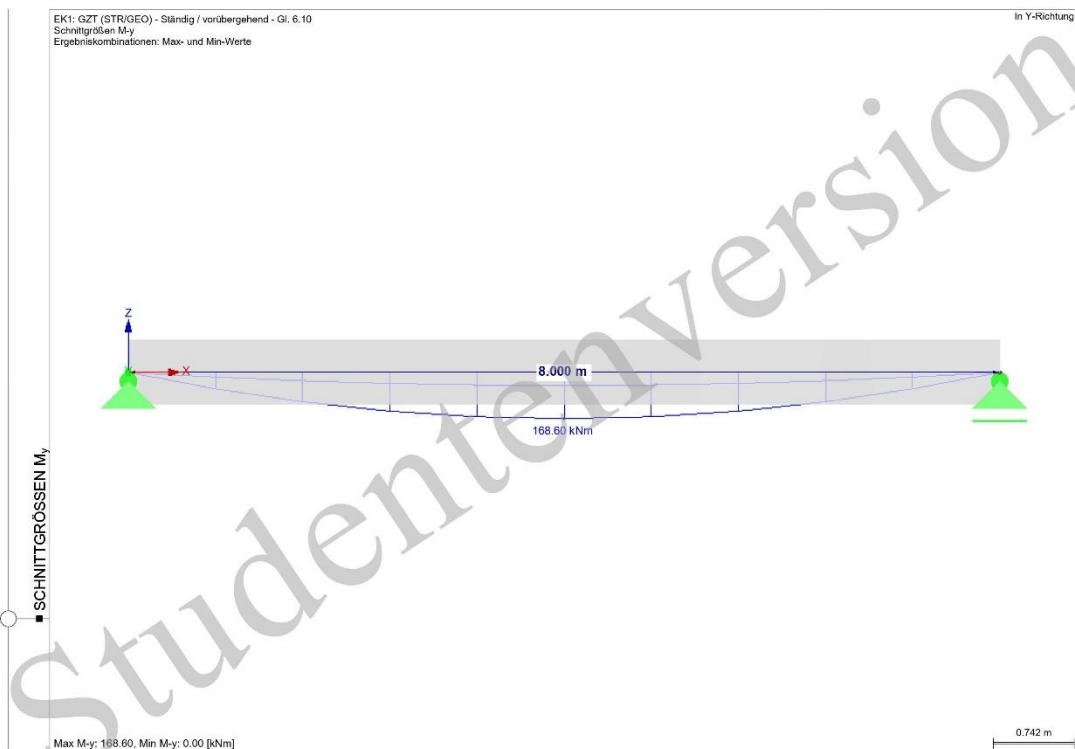


Abbildung 32: Biegemomentverlauf für Beispiel 1 von Rstab

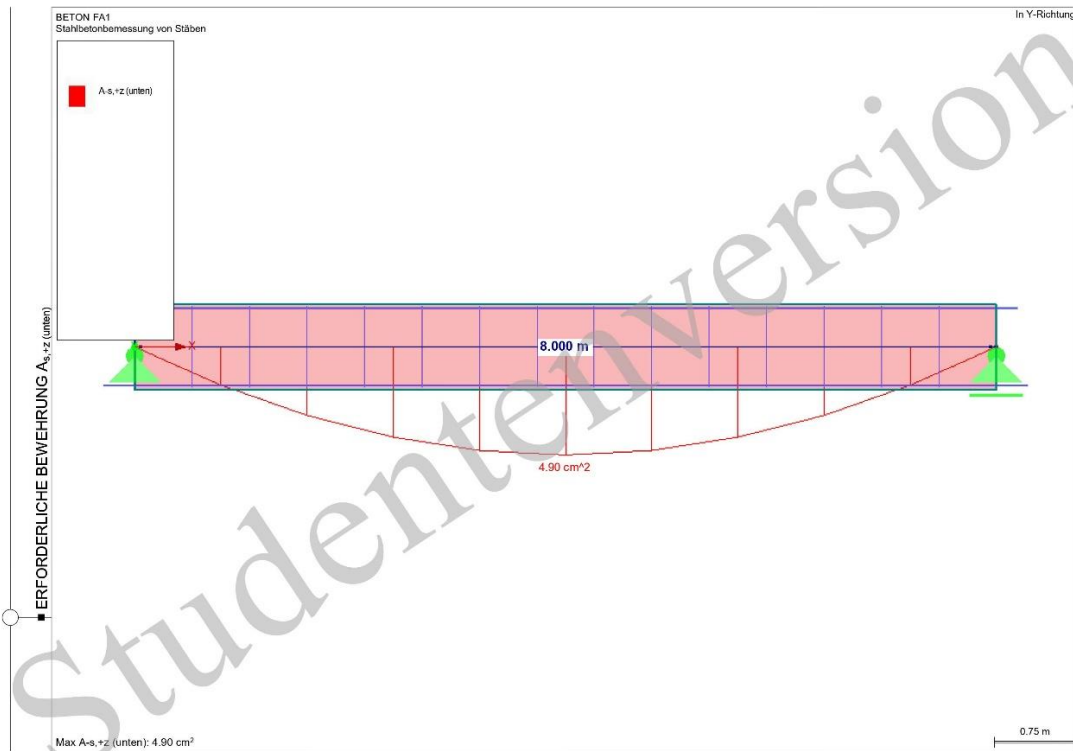


Abbildung 33: Verlauf der erforderlichen Längsbewehrung für Beispiel 1 von Rstab

### 7.1.1.2 Lösung nach dem PMC

FORM, SORM und direkte MCS (Simulationanzahl:  $10^6$ ) sind die gewählten Zuverlässigkeitsmethoden bei der Lösung nach dem PMC. Um die Berechnung auszuführen, benötigt „Comrel 10“ eine Grenzzustandsfunktion  $g(x)$ . Unter der Annahme der Block-Diagramm Methode können sie folgendermaßen formuliert werden:

$$g(x) = \theta_R A_s f_y \left( h - d_1 - \frac{0,5 A_s f_y}{b f_c} \right) - \theta_E \frac{(\gamma_c \times b \times h + q) l^2}{8} \quad (67)$$

Die oben genannte Grenzzustandsfunktion und die Basisvariablen laut Tabelle 22 sind in „Comrel 10“ definiert.

Tabelle 22: Die stochastischen Werte nach dem PMC und die deterministischen Werte der Basisvariablen für Beispiel 1

Basisvariable	Abk.	Verteilungsart	Mittelwert	Standardabw.	Einheit
Betondruckfestigkeit	$f_c$	lognormal	30	5	MPa
Streckgrenze der Stahlbewehrung	$f_y$	lognormal	560	30	MPa
Betondeckung	$d_1$	det.	5	-	cm
Wichte des Stahlbetons	$\gamma_c$	normal	25	0,75	kN/m <sup>3</sup>
Nutzlast	$q$	gamma	10	1,89	kN/m

Unsicherheiten Einwirkungsseite	$\theta_E$	lognormal	1	0,2	-
Unsicherheiten Widerstandsseite	$\theta_R$	lognormal	1,1	0,77	-
Stützweite	L	det.	8	-	m
Bewehrungsfläche	$A_s$	det.	6,1		cm <sup>2</sup>
Balkenhöhe	h	det.	0,8		m
Balkenbreite	b	det.	0,4		m

Der Zielwert wird als 4,2 für Wohngebäude bzw. mittlere Schadensfolge in Tabelle 18 festgelegt.

Die Ergebnisse der Iterationen befinden sich in Tabelle 23:

Tabelle 23: Die Ergebnisse der Versuche für die Berechnung nach dem PMC mithilfe "Comrel 10"

Versuch Nr.	Gewählte $A_s$ [cm <sup>2</sup> ]	$\beta_{\text{vorh,FORM}}$	$\beta_{\text{vorh,SORM}}$	$\beta_{\text{vorh,MCS}}$	$\beta_t$
1	6,1	2,796	2,783	2,783	4,2
2	7,0	3,351	3,338	3,345	4,2
3	8,0	3,886	3,873	3,933	4,2
4	8,7	4,221	4,208	4,29	4,2

Bei Iteration Nr. 3 konnte das erwünschte Sicherheitsniveau nach dem PMC mit der Bewehrungsfläche von 8,7 cm<sup>2</sup> erzielt werden.

## 7.2 Kragträger unter Gleichlast

Das statische System wird vor allem in „Rstab“ modelliert und mithilfe des Zusatzmoduls „Stahl EC3 – Bemessung nach Eurocode 3“ untersucht. In diesem Beispiel ist die maßgebende Kombination die ständige und vorübergehende Bemessungssituation bzw. Grundkombination für den GZT, die in Formel (58) gegeben ist. Mit der Kraglänge von 1.8 m ist die 99 % Ausnutzung gegeben.

Im zweiten Schritt werden die Verteilungen der Zufallsvariablen und die deterministischen Werten in der Software „Comrel 10“ definiert. Um den Vergleich zu ermöglichen, wird die Kraglänge als ein Vergleichswert angenommen und aus „Rstab“ übernommen. Dieser Prozess ermöglicht den Zuverlässigkeitsindex „ $\beta$ “ festzulegen. Der vorhandene Zuverlässigkeitsindex wird mit dem im PMC festgelegten Zielwert „ $\beta_t$ “ verglichen. Schließlich werden Iterationen ausgeführt, um sich an den Zielwert anzunähern.

Der Kragträger des Beispiels ist in Abbildung 34 dargestellt. Die festgelegten Werte für Beispiel 2 befinden sich in Tabelle 24.

Als Stahlgüte wurde S235 gewählt und der Querschnitt ist IPE 160.

Tabelle 24: Die festgelegten Werte für Beispiel 2

Basisvariable	Beschreibung	Wert
q	Nutzlast	10 kN/m
c	Kraglänge	1,8 m

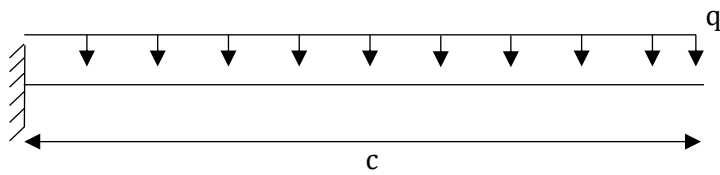


Abbildung 34: Das statistische System für Beispiel 2

### 7.2.1 Lösung nach EN 0

Das größte Biegemoment befindet sich an der Einspannstelle und wird in Abbildung 35 dargestellt.



Abbildung 35: Biegemomentverlauf für Beispiel 2 von Rstab

Unter dieser Beanspruchung wurde der Querschnitt IPE 160 S235 und die Kraglänge 1,8 m gewählt. Damit wurde der in Abbildung 36 dargestellte Ausnutzungsgrad erhalten.

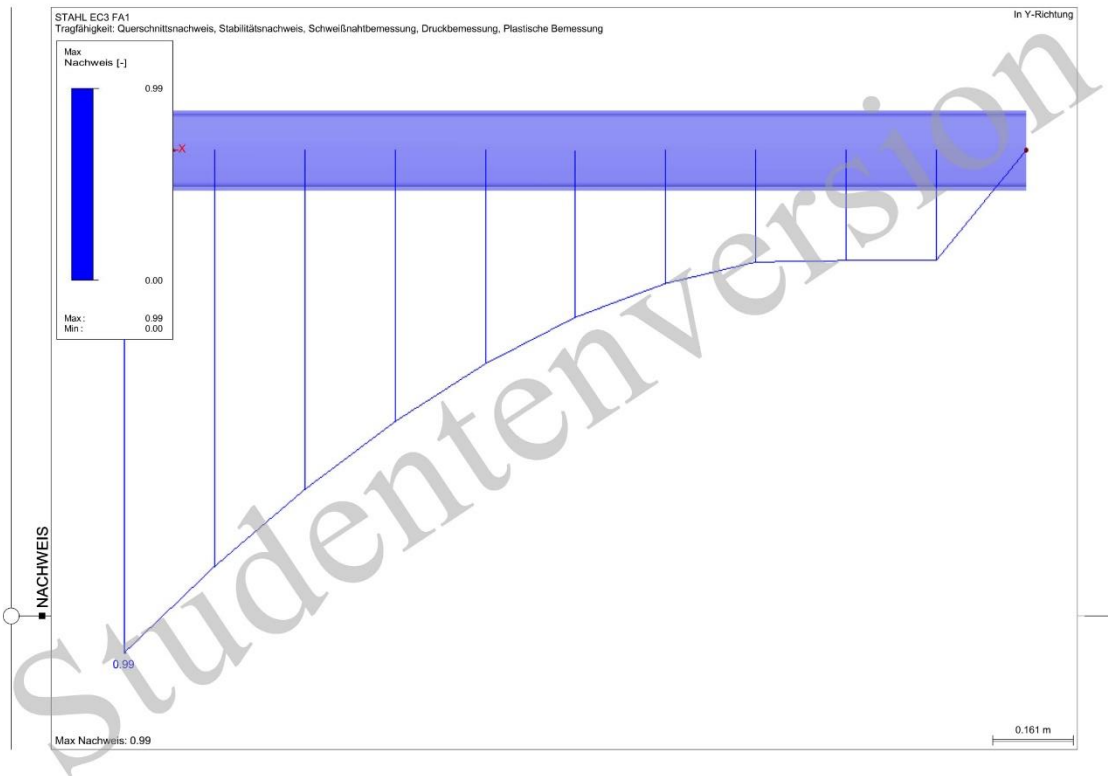


Abbildung 36: Der Ausnutzungsgrad des Kragträgers

## 7.2.2 Lösung nach dem PMC

Die Grenzzustandsfunktion kann folgendermaßen formuliert werden:

$$g(x) = \theta_R W_y f_y - \theta_E \frac{(\gamma_s \times A + q)c^2}{2} \quad (68)$$

Die oben genannte Grenzzustandsfunktion und die Basisvariablen laut Tabelle 25 sind in „Comrel 10“ definiert.

Der Zielwert wird als 4,2 für Wohngebäude bzw. mittlere Schadensfolge in Tabelle 18 festgelegt.

Tabelle 25: Die stochastischen Werte nach dem PMC und die deterministischen Werte der Basisvariablen für Beispiel 2

Basisvariable	Abk.	Verteilungsart	Mittelwert	Standardabw.	Einheit
Streckgrenze der Stahlbewehrung	$f_y$	lognormal	280	19,6	MPa
Wichte des Stahls	$\gamma_s$	normal	77	0,77	kN/m <sup>3</sup>
Nutzlast	q	gamma	10	1,89	kN/m
Unsicherheiten Einwirkungsseite	$\theta_E$	lognormal	1	0,05	-
Unsicherheiten Widerstandsseite	$\theta_R$	lognormal	1,1	0,2	-
Kraglänge	c	det.	1,8	-	m
Querschnittsfläche	A	det.	20,1	-	cm <sup>2</sup>
Widerstandsmoment	$W_y$	det.	108,7	-	cm <sup>3</sup>

Die Ergebnisse der Iterationen befinden sich in Tabelle 26:

Tabelle 26: Die Ergebnisse der Versuche für die Berechnung nach dem PMC mithilfe "Comrel 10"

Versuch Nr.	Kraglänge [m]	$\beta_{\text{vorh,FORM}}$	$\beta_{\text{vorh,SORM}}$	$\beta_{\text{vorh,MCS}}$	$\beta_t$
1	1,8	2,362	2,399	2,4	4,2
2	1,7	2,85	2,87	2,872	4,2
3	1,6	3,35	3,383	3,422	4,2
4	1,45	4,214	4,245	4,29	4,2

Bei Iteration Nr. 3 konnte das erwünschte Sicherheitsniveau nach dem PMC mit der Kraglänge von 1,45 m erzielt werden.

### 7.3 Interpretation der Ergebnisse

Die Berechnung mit „Rstab“ für beide Beispiele erfolgte durch folgende Formel nach Nachweisverfahren mit Teilsicherheitsbeiwerten:

$$M_{Rd} \leq M_{Ed} \quad (69)$$

Im zweiten Teil dieses Kapitels wurden die Berechnungen nach dem PMC mithilfe der Zuverlässigkeitsmethoden (FORM, SORM und direkte MCS) ausgeführt. Die Berechnung mit dem „Comrel 10“ basiert auf der Grenzzustandsfunktion und erfolgte durch folgende Formel:

$$\beta_{\text{vorh}} \geq \beta_t \quad (70)$$

Im ersten Beispiel wurde in „Rstab“, das seine Berechnungen nach EN 1990 und 1992 macht, 6,1 cm<sup>2</sup> als erforderliche Bewehrungsfläche berechnet. Beim ersten Versuch in „Comrel“ wurde für

die Bewehrungsfläche der gleiche Wert wie in „Rstab“ erhalten. Jedoch war der erhaltene Zuverlässigkeitsindex mit allen drei Zuverlässigkeitsmethoden sehr gering. Mit der vierten Iteration wurde das erwünschte Zuverlässigkeitsniveau erhalten und  $8,7 \text{ cm}^2$  wurde als die benötigte Bewehrungsfläche festgelegt.

Werden der Ergebnisse der zwei Regelwerke verglichen, wird direkt ersichtlich, dass die mit der vollprobabilistischen Methode erhaltene Bewehrungsfläche etwa 43 % größer ist.

Im zweiten Beispiel ist die Kraglänge der zu untersuchende Wert. Die voll probabilistische Methode liefert das gleiche Zuverlässigkeitsniveau wie die semi-probabilistische Methode, wenn die Kraglänge 1,45 m beträgt. Das bedeutet, unter den gleichen Umständen wird eine 35 cm längere Auskrantung nach EN 1990 berechnet.

Zwischen den Zuverlässigkeitsmethoden des PMC gibt es keinen großen Unterschied. MCS benötigt lediglich eine große Versuchsanzahl, um zuverlässigere Ergebnisse zu liefern.

## 8 Zusammenfassung und Schlussfolgerung

Der Vergleich zwischen EN 1990 und dem PMC wird in dieser Arbeit analytisch und numerisch durchgeführt. Die Ergebnisse aus Kapitel 6 und 7 werden in diesem Kapitel zusammenfassend bewertet.

Die Regelwerke wurden analytisch anhand fünf wesentlicher Punkte gegenübergestellt. Die analytische Gegenüberstellung wird in Tabelle 27 dargestellt.

Diese Punkte sind:

- Anforderungen,
- Bemessungssituationen,
- Basisvariablen,
- Nachweisverfahren,
- Zuverlässigkeitsmethoden.

Der Umfang von EN 1990 ist im Vergleich zum PMC breiter und inkludiert mehr Anforderungen und Bemessungssituationen für die TWP. Dies ergibt für EN 1990 in der Praxis einen großen Vorteil. Die Festlegung der Bemessungswerte von Basisvariablen ist von großer Bedeutung für diese Arbeit. Um die Basisvariablen mit probabilistischen Methoden festzulegen, sind ausführliche Daten für die Einwirkungen als auch für die Materialeigenschaften erforderlich. Diese ausführlichen Daten fehlen derzeit noch immer. Trotzdem zeigt der PMC, dass es auch mit den vorhandenen Daten möglich ist. Die probabilistischen Methoden im Bauwesen sind für die Zukunft des Bauens sehr relevant, da die Anforderungen jeden Tag herausfordernder werden. Die vollprobabilistische Festlegung der Basisvariablen ermöglicht, dass die Ergebnisse der TWP realistischer und zuverlässiger sind. Es muss auch berücksichtigt werden, dass sie in der Praxis zu erhöhtem Zeit- und Ressourcenaufwand führen.

Für die Nachweise schlägt der PMC den Vergleich der Versagenswahrscheinlichkeit bzw. den Zuverlässigkeitsindex vor, der mit den folgenden Zuverlässigkeitsmethoden berechnet werden kann:

- Näherungsverfahren:
  - FORM
  - SORM
- Simulationsmethode mit der MCS

EN 1990 benutzt die Näherungsverfahren für die Kalibrierung der Teilsicherheitsbeiwerte und Kombinationsbeiwerte. Mit der Kalibrierung entfällt der große Aufwand der probabilistischen Ansätze, da immer die gleichen Beiwerte abhängig von Belastung, Baustoff und Situation angewendet werden dürfen. Das Nachweisverfahren erfolgt durch Bemessungswerte für Schnittgrößen, Spannungen und Verformungen.

Die Regelwerke wurden numerisch mithilfe von zwei Beispielen gegenübergestellt und die Beispiele wurden mit DLUBAL Rstab für EN 1990 und mit STUREL Comrel für den PMC und mit allen drei Zuverlässigkeitsmethoden modelliert. Die Ergebnisse der Software für die Beispiele befinden sich in Tabelle 28. Die Ergebnisse wurden im Hinblick auf die Längsbewehrungsfläche und Kraglänge verglichen.



Tabelle 27: Gegenüberstellung der Regelwerke im Sinne von analytischen Betrachtungen

	EN 1990	PMC
<b>Anforderungen</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tragfähigkeit</li> <li>• Gebrauchstauglichkeit</li> <li>• Robustheit</li> <li>• Dauerhaftigkeit</li> <li>• Feuerwiderstandsfähigkeit</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tragfähigkeit (inkl. Dauerhaftigkeit)</li> <li>• Gebrauchstauglichkeit</li> <li>• Robustheit</li> </ul>
<b>Bemessungssituationen</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ständige Situationen</li> <li>• Vorübergehende Situationen</li> <li>• Außergewöhnliche Situationen</li> <li>• Situationen bei Erdbeben</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ständige Situationen</li> <li>• Vorübergehende Situationen</li> <li>• Außergewöhnliche Situationen</li> </ul>
<b>Basisvariablen</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Nennwerte</li> <li>• Mittelwerte</li> <li>• Fraktilwerte der Verteilungsdichte</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Nennwerte</li> <li>• Zufallsvariable</li> <li>• Zufallsfelder</li> </ul>
<b>Elemente der Nachweisverfahren</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Teilsicherheitsbeiwerte</li> <li>• Kombinationsbeiwerte</li> <li>• Kombinationen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Grenzzustandsfunktion</li> <li>• Versagenswahrscheinlichkeit bzw. Zuverlässigkeitsindex</li> </ul>
<b>Ziel der Zuverlässigkeitsmethoden</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kalibrierung der stochastischen Ansätze (Festlegung der Teilsicherheitsbeiwerte und Kombinationsbeiwerte)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Berechnung der Versagenswahrscheinlichkeit</li> </ul>

Tabelle 28: Die Ergebnisse der numerischen Beispiele

	EN 1990	JMC
<b>Beispiel 1 (As [cm<sup>2</sup>])</b>	6,1	8,7
<b>Beispiel 2 (c [m])</b>	1,8	1,45

In den Ergebnissen erwies sich der PMC nicht von Vorteil. Im ersten Beispiel ist die erforderliche Bewehrungsmenge nach dem PMC viel höher als der Wert laut EN 1990 und mit den vorhandenen Angaben kann keine längere Auskragung erzielt werden.

Mittels analytischer Gegenüberstellungen und numerischen Ergebnissen zeigt diese Arbeit, dass der PMC trotz seiner Zuverlässigkeit keine Materialeinsparungen ermöglicht. Der PMC ist wegen der probabilistischen Ansätze realistischer. Jedoch sind diese Ansätze viel komplizierter und aufwendiger als die semi-probabilistischen Ansätze von EN 1990.

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Organisation von CEN/TC 250 [5].....	10
Abbildung 2: Links zwischen den Eurocodes [9].....	12
Abbildung 3: Nationale Fassung eines Eurocodes.....	13
Abbildung 4: Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion der Zufallsvariable X.....	17
Abbildung 5: Verteilungsfunktion der Zufallsvariable X.....	17
Abbildung 6: Wahrscheinlichkeitsberechnung des Intervalls $x_1 < X \leq x_2$ .....	19
Abbildung 7: TWP-Phasen [22].....	20
Abbildung 8: Versagenszustände der GZT [24].....	23
Abbildung 9: Zeitabgängige Einflüsse und der Versagensarten [24].....	25
Abbildung 10: Drei-Säule der Nachhaltigkeit.....	26
Abbildung 11: Der Mechanismus der Erfahrungssammlung und Kalibration des Sicherheitsfaktors [32].....	27
Abbildung 12: Charakteristischer Wert des Widerstandes.....	30
Abbildung 13: Charakteristischer Wert der Beanspruchung.....	30
Abbildung 14: Sicherheitszonen im deterministischen Sicherheitskonzept und semi-probabilistischen Sicherheitskonzept.....	31
Abbildung 15: Gliederung der Zuverlässigkeitsmethoden.....	33
Abbildung 16: Festlegung des Bemessungspunkt und Zuverlässigkeitsindex [37].....	34
Abbildung 17: Die Darstellungsmöglichkeiten der Basisvariablen.....	43
Abbildung 18: Mittelwert und obere und untere Werte der Einwirkungen.....	46
Abbildung 19: Wahrscheinlichkeitsdichten der ständigen Einwirkungen.....	47
Abbildung 20: Mittelwert und obere und untere Werte der Baustoff- oder Produkteigenschaft..	48
Abbildung 21: Darstellung der Einwirkungsformel mithilfe des Beispiels der Schneelast.....	51
Abbildung 22: Verteilungsdichte der Wichte des Normalbetons.....	52
Abbildung 23: Die einzelnen Teilsicherheitsbeiwerte.....	54
Abbildung 24: Die Festlegung des Bemessungswerts für die Auswirkung der Einwirkung.....	54
Abbildung 25: Die Festlegung des Bemessungswerts für die Materialeigenschaften.....	57
Abbildung 26: Repräsentative Werte der veränderlichen Einwirkungen.....	61
Abbildung 27: Darstellung der Grenzzustandsfunktion.....	64
Abbildung 28: Darstellung der Fläche der Versagenswahrscheinlichkeit.....	64
Abbildung 29: Festlegung der Teilsicherheitsbeiwerte mittels Zuverlässigkeitsmethoden gemäß EN 1990.....	67
Abbildung 31: Der Querschnitt für Beispiel 1.....	69
Abbildung 30: Das statische System für Beispiel 1.....	69
Abbildung 32: Biegemomentverlauf für Beispiel 1 von Rstab.....	70
Abbildung 33: Verlauf der erforderlichen Längsbewehrung für Beispiel 1 von Rstab.....	71
Abbildung 34: Das statistische System für Beispiel 2.....	73
Abbildung 35: Biegemomentverlauf für Beispiel 2 von Rstab.....	73
Abbildung 36: Der Ausnutzungsgrad des Kragträgers.....	74

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Aufbau der Eurocodes .....	11
Tabelle 2: Struktur der konstruktiven Eurocodes [7] .....	12
Tabelle 3: WPs und TG der JCSS [15] .....	15
Tabelle 4: Klassifizierung der Nutzungsdauer gemäß EC 0 [13].....	21
Tabelle 5: Schadensfolgeklassen gemäß EC 0 [13] .....	21
Tabelle 6: Grenzzustände .....	22
Tabelle 7: Gebrauchstauglichkeitsbegrenzungen und deren Konsequenzen [7, 24, 25].....	24
Tabelle 8: Die Teile der EN 1990 in Österreich .....	36
Tabelle 9: Teile des JCSS probabilistischen Model Codes.....	36
Tabelle 10: Arten der Basisvariablen gemäß Schneider J. [18] .....	42
Tabelle 11: Einteilung der Basisvariablen gemäß EN 1990 [13] .....	44
Tabelle 12: Einwirkungen nach ihrer zeitlichen Veränderung.....	45
Tabelle 13: Die Mittelwerte und Variationskoeffizienten der Wichte von gewissen Baustoffen ..	47
Tabelle 14: Der Mittelwert und Variationskoeffizient des Normalbetons .....	52
Tabelle 15: Teilsicherheitsbeiwerte für die Einwirkungen.....	56
Tabelle 16: Teilsicherheitsbeiwerte der Materialeigenschaften [25].....	58
Tabelle 17 :Die Kombinationsbeiwerte im Hochbau gemäß EN 1991.....	61
Tabelle 18: Zuverlässigkeitsindizes für GZT gemäß PMC .....	65
Tabelle 19: Zuverlässigkeitsindizes für GZG gemäß PMC .....	66
Tabelle 20: Die festgelegten Werte für Beispiel 1 .....	69
Tabelle 21: Die benötigten Ergebnisse von Rstab .....	70
Tabelle 22: Die stochastischen Werte nach dem PMC und die deterministischen Werte der Basisvariablen für Beispiel 1 .....	71
Tabelle 23: Die Ergebnisse der Versuche für die Berechnung nach dem PMC mithilfe "Comrel 10" .....	72
Tabelle 24: Die festgelegten Werte für Beispiel 2 .....	72
Tabelle 25: Die stochastischen Werte nach dem PMC und die deterministischen Werte der Basisvariablen für Beispiel 2.....	75
Tabelle 26: Die Ergebnisse der Versuche für die Berechnung nach dem PMC mithilfe "Comrel 10" .....	75
Tabelle 27: Gegenüberstellung der Regelwerke im Sinne von analytischen Betrachtungen.....	78
Tabelle 28: Die Ergebnisse der numerischen Beispiele .....	79

## Literaturverzeichnis

1. Österreich, W., *Wertschöpfung nach Sektoren*.
2. Austrian-Standards. Eurocodes. Available from: <https://www.austrian-standards.at/infopedia-themencenter/infopedia-artikel/eurocodes/>.
3. Johnson, R.P., *Eurocodes, 1970–2010: why 40 years?* Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Structures and Buildings, 2009. **162**(6): p. 371-379.
4. Center, J.R. *Timeline*. Available from: <https://eurocodes.jrc.ec.europa.eu/showpage.php?id=12#top-page>.
5. Gulvanessian, H.A.C., J.-A.; A Holický, M.; A Gulvanessian, Haig, *Designers' Guide to Eurocode: Basis of Structural Design*. Designers' Guide to Eurocode: Basis of Structural Design.
6. Standardization, E.C.f.; Available from: <https://www.cen.eu/about/Pages/default.aspx>.
7. Kolbitsch, A., *Tragwerksentwurf Skriptum*. 2019, TU Wien.
8. Athanasopoulou, A., et al., *The implementation of the Eurocodes in the National Regulatory Framework*. 2019.
9. Gulvanessian, H., *EN 1990 Eurocode "Basis of structural design" – the innovative head Eurocode*. Steel Construction, 2009. **2**(4): p. 222-227.
10. Gulvanessian, H., *Handbook 1 Basis of Structural Design*. 2004: Watford, UK.
11. Denton, S., G. Tsionis, and B. Acun, *The evolution of Eurocodes for bridge design*. European Commission, Joint Research Centre, Institute for the Protection and Security of the Citizen. Luxembourg, 2012.
12. Kommission, E., *EUROPA 2020*. 2010.
13. Standardization, E.C.f., *EN 1990. Eurocode, Grundlagen der Tragwerksplanung, in Hintergrund des Eurocode-Programme*. 2013: Brussels.
14. Vrouwenvelder, T., *Joint Committee on Structural Safety*. Structural Safety, 1997. **19**(3).
15. JCSS. *About JCSS*. Available from: <https://www.jcss-lc.org/about-us/>.
16. Cramer, E. and U. Kamps, *Grundlagen der Wahrscheinlichkeitsrechnung und Statistik: Eine Einführung für Studierende der Informatik, der Ingenieur- und Wirtschaftswissenschaften*. 2020: Springer-Verlag.
17. Papula, L., *Mathematik für Ingenieure und Naturwissenschaftler Band 3–Vektoranalysis, Wahrscheinlichkeitsrechnung, Mathematische Statistik, Fehler- und Ausgleichsrechnung*, 6. Auflage, Vieweg+ Teubner Verlag, Wiesbaden, 2011: p. 650-729.
18. Schneider, J. and H.P. Schlatter, *Sicherheit und Zuverlässigkeit im Bauwesen: Grundwissen für Ingenieure*. 1994.
19. Ang, A.H.-S. and W.H. Tang, *Probability concepts in engineering planning and design: Emphasis on application to civil and environmental engineering*. 2007: Wiley.
20. Choi, S.-K., R. Grandhi, and R.A. Canfield, *Reliability-based structural design*. 2006: Springer Science & Business Media.
21. Naveed Anwar, F.A.N., *Structural Cross Sections*, F.A.N. Naveed Anwar, Editor. 2017, Butterworth-Heinemann. p. 1-37.
22. Sigrist, V., *Normen für den Konstruktiven Ingenieurbau*. Beton- und Stahlbetonbau, 2009. **104**(4): p. 200-206.
23. Zilch, K. and G. Zehetmaier, *Bemessung im konstruktiven Betonbau: nach DIN 1045-1 (Fassung 2008) und EN 1992-1-1 (Eurocode 2)*. 2009: Springer-Verlag.
24. Novák, B., U. Kuhlmann, and M. Euler, *Werkstoffübergreifendes Entwerfen und Konstruieren: Einwirkung, Widerstand, Tragwerk*. Vol. 1. 2012: John Wiley & Sons.
25. Fouad, N.A. and W. Zapke, *Bauwesen -Taschenbuch*. 2013: Fachbuchverl. Leipzig im Carl-Hanser Verlag.
26. Vogel, T., *Design for robustness*. Vol. 11. 2009: IABSE.
27. Weller, B., S. Jakubetz, and M.-S. Fahrion, *Denkmal und Energie*. 2012: Springer-Verlag.
28. Von Carlowitz, H.C. and J.B. von Rohr, *Sylvicultura oeconomica*. 1732.
29. Ochsendorf, J. *Sustainable engineering: The future of structural design*. in *Structures Congress 2005: Metropolis and Beyond*. 2005.

30. Pech, A., A. Kolbitsch, and F. Zach, *Tragwerke*. Vol. 2. 2018: Birkhäuser.
31. Prose, D., *Zur Zukunft der Sicherheitskonzepte im Bauwesen*. Bautechnik, 2011. **88**(4): p. 217-224.
32. Spaethe, G., *Die Sicherheit tragender Baukonstruktionen*. Vol. 2. Auflage. 1992, Wien: Springer-Verlag.
33. Schmidt, P., *Lastannahmen–Einwirkungen auf Tragwerke*.
34. Klingmüller, O., *Sicherheit und Risiko im konstruktiven Ingenieurbau*. 2013: Springer-Verlag.
35. Hurtado, J.E., *Structural reliability: statistical learning perspectives*. Vol. 17. 2013: Springer Science & Business Media.
36. Haldar, A. and S. Mahadevan, *Probability, reliability, and statistical methods in engineering design*. 2000: John Wiley.
37. Honfi, D., *Design for Serviceability-A probabilistic approach*. 2013: Lund University.
38. Huang, C., A. El Hami, and B. Radi, *Overview of structural reliability analysis methods—part I: local reliability methods*. ISTE OpenScience: London, UK, 2016.
39. Cardoso, J.B., et al., *Structural reliability analysis using Monte Carlo simulation and neural networks*. Advances in Engineering Software, 2008. **39**(6): p. 505-513.
40. Melchers, R.E. and A.T. Beck, *Structural reliability analysis and prediction*. 2018: John Wiley & Sons.
41. JCSS, J., *Probabilistic model code*. Joint Committee on Structural Safety, 2001.
42. *EN ISO 9001:2014, Qualitätsmanagementsysteme - Anforderungen*. 2014.
43. Vrouwenvelder, T., *The JCSS probabilistic model code*. Structural Safety, 1997. **19**(3): p. 245-251.
44. Lemaire, M., *Structural reliability*. 2013: John Wiley & Sons.
45. Bachmann, H., R. Rackwitz, and H. Schueller, „*Tragwerkszuverlässigkeit–Einwirkungen* “. Der Ingenieurbau (Hrsg. Mehlhorn, G.), 1997. **8**.
46. Commission, E., *B2: The role of EN 1990: The key head Eurocode*. 2008.
47. Anwar, N. and F.A. Najam, *Structural Cross Sections: Analysis and Design*. 2016: Butterworth-Heinemann.
48. Faber, M. and J.D. Sørensen, *Reliability based code calibration*. The Joint Committee on Structural Safety, Zurich, Switzerland, 2002.
49. Diamantidis, D., M. Holicky, and K. Jung, *Assessment of existing structures–On the applicability of the JCSS recommendations*. Aspects of Structural Reliability–In Honor of R. Rackwitz, MH Faber, T Vrouwenvelder, K Zilch (Eds), Herbert Utz Verlag, München, 2007.
50. Standardization, E.C.f., *EN 1992-1-2,2004. Eurocode 2: Design of Concrete Structures - Part 1-2*. Brussels, 2004.

# ANHANG A: Ausdrucksprotokoll von Rstab für Beispiel 1

## Modell-Basisangaben

Allgemein	Modellname	: Versuch1
	Projektname	: Beispiele
Projektbezeichnung	Projektbezeichnung	: Musterpositionen
	Modelltyp	: 2D-XZ (ux/uz/φy)
Positive Richtung der globalen Z-Achse	Positive Richtung der globalen Z-Achse	: Nach oben
	Klassifizierung der Lastfälle und Kombinationen	: Nach Norm: EN 1990 Nationaler Anhang: DIN - Deutschland
x Kombinationen automatisch erzeugen	x Kombinationen automatisch erzeugen	: x Lastkombinationen
	Optionen	
	- CQC-Regel anwenden	
	- CAD/BIM-Modell ermöglichen	
	Erdbeschleunigung	
	g	: 10.00 m/s <sup>2</sup>

## 1.2 Materialien

Mat. Nr.	Modul E [kN/cm <sup>2</sup> ]	Modul G [kN/cm <sup>2</sup> ]	Spez. Gewicht γ [kN/m <sup>3</sup> ]	Wärmedehn. α [1/°C]	Teilsich.-Beiwert γ <sub>M</sub> [-]	Material-Modell
3	Beton C20/25   ÖNORM B 4700:2001-06 2900.00	1208.33	25.00	1.00E-05	1.00	Isotrop linear elastisch

## 1.3 Querschnitte

Quers. Nr.	Mater. Nr.	I <sub>r</sub> [cm <sup>4</sup> ]	I <sub>y</sub> [cm <sup>4</sup> ]	I <sub>z</sub> [cm <sup>4</sup> ]	Hauptachsen α [°]	Drehung α' [°]	Gesamtabmessungen [mm]	
		A [cm <sup>2</sup> ]	A <sub>y</sub> [cm <sup>2</sup> ]	A <sub>z</sub> [cm <sup>2</sup> ]			Breite b	Höhe h
2	Rechteck 400/800 3	3200.00	1706666.75	2666.67	0.00	0.00	400.0	800.0

## 2.1 Lastfälle

Lastfall	LF-Bezeichnung	EN 1990   DIN Einwirkungskategorie	Eigengewicht - Faktor in Richtung			
			Aktiv	X	Y	Z
LF1	Ständig Nutzlasten - Kategorie A: Wohn/Aufenthaltsräume		x	0.000		-1.000
LF2			-			

## 2.6 Ergebniskombinationen

Ergebn.-kombin.	Bezeichnung	Belastung
EK1	GZT (STR/GEO) - Ständig / vorübergehend - Gl. 6.10	LK1/s oder LK2/s
EK2	GZG - Charakteristisch	LK3/s oder LK4/s
EK3	GZG - Häufig	LK5/s oder LK6/s
EK4	GZG - Quasi-ständig	LK7/s oder LK8/s

LF2

## 3.2 Stablasten

Nr.	Beziehen auf	An Stäben Nr.	Last-Art	Last-Verteilung	Last-Richtung	Bezugs-Länge	Lastparameter		
							Symbol	Wert	Einheit
1	Stäbe	1	Kraft	Konstant	Z	Wahre Länge	p	-10.000	kN/m

## 4.3 Querschnitte - Schnittgrößen

Stab Nr.	EK	Knoten Nr.	Stelle x [m]	Kräfte [kN]		Momente M <sub>y</sub> [kNm]	Zugehörige Lastfälle
				N	V <sub>z</sub>		
Querschnitt-Nr. 2: Rechteck 400/800							

#### 4.3 Querschnitte - Schnittgrößen

Ergebniskombinationen

Stab Nr.	EK	Knoten Nr.	Stelle x [m]		Kräfte [kN]		Momente M <sub>y</sub> [kNm]	Zugehörige Lastfälle
					N	V <sub>z</sub>		
1	EK1		0.000	MAX N	> 0.12	103.20	0.00	LK 2
1	EK1		4.000	MIN N	> 0.00	0.00	86.40	LK 1
1	EK1		0.000	MAX V <sub>z</sub>	0.12	> 103.20	0.00	LK 2
1	EK1		8.000	MIN V <sub>z</sub>	0.12	> -103.20	0.00	LK 2
1	EK1		4.000	MAX M <sub>y</sub>	0.00	0.00	> 206.40	LK 2
1	EK1		8.000	MIN M <sub>y</sub>	0.12	-103.20	> 0.00	LK 2

#### BETON

FA1  
Stahlbetonbemessung von Stäben

#### 1.2 Materialien

Mat.-Nr.	Materialbezeichnung		Kommentar
	Beton-Festigkeitsklasse	Betonstahl	
3	Beton C20/25	B 500 S (B)	

#### 1.3 Querschnitte

Quersch.-Nr.	Mat. Nr.	Querschnittsbezeichnung	Anmerkungen	Kommentar

Anmerkungen:

31) Die Querschnitte im Programm RSTAB und BETON sind nicht identisch.

#### BETON

FA1  
Stahlbetonbemessung von Stäben

#### 1.6 Bewehrungssatz Nr. 1

Angewendet auf Stäbe:	Alle (1)
<b>LÄNGSBEWEHRUNG</b>	
Mögliche Durchmesser:	20.0 mm
Max. Anzahl der Lagen:	1
Min. Abstand für erste Lage:	20.0 mm
Verankerungstyp:	Gerade
Stahloberfläche:	Gerippt
Bewehrungsstaffellung:	Keine
<b>BÜGELBEWEHRUNG</b>	
Mögliche Durchmesser:	10.0 mm
Anzahl der Schnitte:	2
Neigung:	90°
Verankerungstyp:	Haken
Bügelanordnung:	Gleiche Abstände
<b>BEWEHRUNGSANORDNUNG</b>	
Betondeckung nach Norm	-
Betondeckung c-oben:	30.0 mm
Betondeckung c-unten:	30.0 mm
Betondeckung c-seitig:	30.0 mm
Bewehrungsanordnung:	-z (oben) - +z (unten) (optimierte Verteilung)
Torsionsbewehrung über den Umfang verteilen:	x
Berücksichtigte Schnittgrößen:	N, V-y, V-z, M-T, M-y, M-z
<b>MINDESTBEWEHRUNG</b>	
Mindestbewehrungsfläche (min A-s, oben):	0.00 cm <sup>2</sup>
Mindestbewehrungsfläche (min A-s, unten):	0.00 cm <sup>2</sup>
Mindestlängsbewehrung nach Norm:	-
Mindestschubbewehrung nach Norm:	-



## 1.6 Bewehrungssatz Nr. 1

Längsbewehrung für Querkraftnachweis:	Ansatz der erforderlichen Längsbewehrung
SCHUBKRAFT IN DER FUGE	
Schubfuge vorhanden:	-
Nachweis des Gurtanschlusses bei gegliederten Querschnitten	-
EINSTELLUNGEN ZU EN 1992-1-1:2004/A1:2014	
Max. Bewehrungsgrad:	8.00 %
Begrenzung der Druckzone	x
Teilsicherheit Gamma-c	ST+V 1.50, AU1.20
Teilsicherheit Gamma-s	ST+V 1.15, AU1.00
Abminderungsbeiwert Alpha-cc	ST+V 1.00, AU1.00
Abminderungsbeiwert Alpha-ct	ST+V 1.00, AU1.00
Min. veränderliche Druckstrebenneigung	21.80 °
Max. veränderliche Druckstrebenneigung	45.00 °

### BETON

FA1  
Stahlbetonbemessung von  
Stäben

### 2.1 Erforderliche Bewehrung querschnittsweise

Bewehrung	Stab Nr.	Stelle x [m]	Belastung	Bewehrungsfläche	Einheit	Fehlermeldung bzw. Hinweis
Querschnitt Nr.2 - Rechteck 400/800						
$A_{s,z}$ (oben)	1	0.000	EK1	0.00	cm <sup>2</sup>	
$A_{s,z}$ (unten)	1	4.000	EK1	6.10	cm <sup>2</sup>	
$A_{s,T}$	1	0.000	EK1	0.00	cm <sup>2</sup>	
$a_{sw,V}$ , Bügel	1	0.007	EK1	1.39	cm <sup>2</sup> /m	58)
$a_{sw,T}$ , Bügel	1	0.000	EK1	0.00	cm <sup>2</sup> /m	

### BETON

FA1  
Stahlbetonbemessung von  
Stäben

### 2.3 Erforderliche Bewehrung stabweise

Bewehrung	Stab Nr.	Stelle x [m]	Belastung	Bewehrungsfläche	Einheit	Fehlermeldung bzw. Hinweis
Stab Nr. 1 - Rechteck 400/800						
$A_{s,z}$ (oben)	1	0.000	EK1	0.00	cm <sup>2</sup>	
$A_{s,z}$ (unten)	1	4.000	EK1	6.10	cm <sup>2</sup>	
$A_{s,T}$	1	0.000	EK1	0.00	cm <sup>2</sup>	
$a_{sw,V}$ , Bügel	1	0.007	EK1	1.39	cm <sup>2</sup> /m	58)
$a_{sw,T}$ , Bügel	1	0.000	EK1	0.00	cm <sup>2</sup> /m	

### BETON

FA1  
Stahlbetonbemessung von  
Stäben

### 2.4 Erforderliche Bewehrung x-stellenweise

Bewehrung	Stab Nr.	Stelle x [m]	Belastung	Bewehrungsfläche	Einheit	Fehlermeldung bzw. Hinweis
Stab Nr. 1 - Rechteck 400/800 - x: 0.000 m						
$A_{s,z}$ (oben)	1	0.000	EK1	0.00	cm <sup>2</sup>	
$A_{s,z}$ (unten)	1	0.000	EK1	0.00	cm <sup>2</sup>	
$A_{s,T}$	1	0.000	EK1	0.00	cm <sup>2</sup>	
$a_{sw,V}$ , Bügel	1	0.000	EK1	0.00	cm <sup>2</sup> /m	
$a_{sw,T}$ , Bügel	1	0.000	EK1	0.00	cm <sup>2</sup> /m	
Stab Nr. 1 - Rechteck 400/800 - x: 0.007 m						

## 2.4 Erforderliche Bewehrung x-stellenweise

Bewehrung	Stab Nr.	Stelle x [m]	Belastung	Bewehrungsfläche	Einheit	Fehlermeldung bzw. Hinweis
$A_{s,z}$ (oben)	1	0.007	EK1	0.00	cm <sup>2</sup>	58)
$A_{s,+z}$ (unten)	1	0.007	EK1	0.02	cm <sup>2</sup>	
$A_{s,T}$	1	0.007	EK1	0.00	cm <sup>2</sup>	
$a_{sw,V,Bügel}$	1	0.007	EK1	1.39	cm <sup>2</sup> /m	
$a_{sw,T,Bügel}$	1	0.007	EK1	0.00	cm <sup>2</sup> /m	
Stab Nr. 1 - Rechteck 400/800 - x: 0.800 m						
$A_{s,z}$ (oben)	1	0.800	EK1	0.00	cm <sup>2</sup>	58)
$A_{s,+z}$ (unten)	1	0.800	EK1	2.13	cm <sup>2</sup>	
$A_{s,T}$	1	0.800	EK1	0.00	cm <sup>2</sup>	
$a_{sw,V,Bügel}$	1	0.800	EK1	0.00	cm <sup>2</sup> /m	
$a_{sw,T,Bügel}$	1	0.800	EK1	0.00	cm <sup>2</sup> /m	
Stab Nr. 1 - Rechteck 400/800 - x: 1.600 m						
$A_{s,z}$ (oben)	1	1.600	EK1	0.00	cm <sup>2</sup>	58)
$A_{s,+z}$ (unten)	1	1.600	EK1	3.82	cm <sup>2</sup>	
$A_{s,T}$	1	1.600	EK1	0.00	cm <sup>2</sup>	
$a_{sw,V,Bügel}$	1	1.600	EK1	0.00	cm <sup>2</sup> /m	
$a_{sw,T,Bügel}$	1	1.600	EK1	0.00	cm <sup>2</sup> /m	
Stab Nr. 1 - Rechteck 400/800 - x: 2.400 m						
$A_{s,z}$ (oben)	1	2.400	EK1	0.00	cm <sup>2</sup>	58)
$A_{s,+z}$ (unten)	1	2.400	EK1	5.05	cm <sup>2</sup>	
$A_{s,T}$	1	2.400	EK1	0.00	cm <sup>2</sup>	
$a_{sw,V,Bügel}$	1	2.400	EK1	0.00	cm <sup>2</sup> /m	
$a_{sw,T,Bügel}$	1	2.400	EK1	0.00	cm <sup>2</sup> /m	
Stab Nr. 1 - Rechteck 400/800 - x: 3.200 m						
$A_{s,z}$ (oben)	1	3.200	EK1	0.00	cm <sup>2</sup>	58)
$A_{s,+z}$ (unten)	1	3.200	EK1	5.83	cm <sup>2</sup>	
$A_{s,T}$	1	3.200	EK1	0.00	cm <sup>2</sup>	
$a_{sw,V,Bügel}$	1	3.200	EK1	0.00	cm <sup>2</sup> /m	
$a_{sw,T,Bügel}$	1	3.200	EK1	0.00	cm <sup>2</sup> /m	
Stab Nr. 1 - Rechteck 400/800 - x: 4.000 m						
$A_{s,z}$ (oben)	1	4.000	EK1	0.00	cm <sup>2</sup>	
$A_{s,+z}$ (unten)	1	4.000	EK1	6.10	cm <sup>2</sup>	
$A_{s,T}$	1	4.000	EK1	0.00	cm <sup>2</sup>	
$a_{sw,V,Bügel}$	1	4.000	EK1	0.00	cm <sup>2</sup> /m	
$a_{sw,T,Bügel}$	1	4.000	EK1	0.00	cm <sup>2</sup> /m	
Stab Nr. 1 - Rechteck 400/800 - x: 4.800 m						
$A_{s,z}$ (oben)	1	4.800	EK1	0.00	cm <sup>2</sup>	58)
$A_{s,+z}$ (unten)	1	4.800	EK1	5.83	cm <sup>2</sup>	
$A_{s,T}$	1	4.800	EK1	0.00	cm <sup>2</sup>	
$a_{sw,V,Bügel}$	1	4.800	EK1	0.00	cm <sup>2</sup> /m	
$a_{sw,T,Bügel}$	1	4.800	EK1	0.00	cm <sup>2</sup> /m	
Stab Nr. 1 - Rechteck 400/800 - x: 5.600 m						
$A_{s,z}$ (oben)	1	5.600	EK1	0.00	cm <sup>2</sup>	58)
$A_{s,+z}$ (unten)	1	5.600	EK1	5.05	cm <sup>2</sup>	
$A_{s,T}$	1	5.600	EK1	0.00	cm <sup>2</sup>	
$a_{sw,V,Bügel}$	1	5.600	EK1	0.00	cm <sup>2</sup> /m	
$a_{sw,T,Bügel}$	1	5.600	EK1	0.00	cm <sup>2</sup> /m	
Stab Nr. 1 - Rechteck 400/800 - x: 6.400 m						
$A_{s,z}$ (oben)	1	6.400	EK1	0.00	cm <sup>2</sup>	58)
$A_{s,+z}$ (unten)	1	6.400	EK1	3.82	cm <sup>2</sup>	
$A_{s,T}$	1	6.400	EK1	0.00	cm <sup>2</sup>	
$a_{sw,V,Bügel}$	1	6.400	EK1	0.00	cm <sup>2</sup> /m	
$a_{sw,T,Bügel}$	1	6.400	EK1	0.00	cm <sup>2</sup> /m	
Stab Nr. 1 - Rechteck 400/800 - x: 7.200 m						
$A_{s,z}$ (oben)	1	7.200	EK1	0.00	cm <sup>2</sup>	58)
$A_{s,+z}$ (unten)	1	7.200	EK1	2.13	cm <sup>2</sup>	
$A_{s,T}$	1	7.200	EK1	0.00	cm <sup>2</sup>	
$a_{sw,V,Bügel}$	1	7.200	EK1	0.00	cm <sup>2</sup> /m	
$a_{sw,T,Bügel}$	1	7.200	EK1	0.00	cm <sup>2</sup> /m	
Stab Nr. 1 - Rechteck 400/800 - x: 7.993 m, links						
$A_{s,z}$ (oben)	1	7.993	EK1	0.00	cm <sup>2</sup>	
$A_{s,+z}$ (unten)	1	7.993	EK1	0.02	cm <sup>2</sup>	
$A_{s,T}$	1	7.993	EK1	0.00	cm <sup>2</sup>	

## 2.4 Erforderliche Bewehrung x-stellenweise

Bewehrung	Stab Nr.	Stelle x [m]	Belastung	Bewehrungsfläche	Einheit	Fehlermeldung bzw. Hinweis
$a_{sw,V,Bügel}$	1	7.993	EK1	1.39	cm <sup>2</sup> /m	58)
$a_{sw,T,Bügel}$	1	7.993	EK1	0.00	cm <sup>2</sup> /m	
Stab Nr. 1 - Rechteck 400/800 - x: 7.993 m, rechts						
$A_{s,-z}$ (oben)	1	7.993	EK1	0.00	cm <sup>2</sup>	58)
$A_{s,+z}$ (unten)	1	7.993	EK1	0.02	cm <sup>2</sup>	
$A_{s,T}$	1	7.993	EK1	0.00	cm <sup>2</sup>	
$a_{sw,V,Bügel}$	1	7.993	EK1	1.39	cm <sup>2</sup> /m	
$a_{sw,T,Bügel}$	1	7.993	EK1	0.00	cm <sup>2</sup> /m	
Stab Nr. 1 - Rechteck 400/800 - x: 8.000 m						
$A_{s,-z}$ (oben)	1	8.000	EK1	0.00	cm <sup>2</sup>	
$A_{s,+z}$ (unten)	1	8.000	EK1	0.00	cm <sup>2</sup>	
$A_{s,T}$	1	8.000	EK1	0.00	cm <sup>2</sup>	
$a_{sw,V,Bügel}$	1	8.000	EK1	0.00	cm <sup>2</sup> /m	
$a_{sw,T,Bügel}$	1	8.000	EK1	0.00	cm <sup>2</sup> /m	

# ANHANG B: Ausdrucksprotokolle von Comrel für Beispiel 1

## Modelldaten

### Reliability Symbolic Expressions

#### Legend

<b>FLIM(k)</b>	fixed	Limit State Function. k is user defined reference number.
<b>RFnm(k)</b>	fixed	Reference Function. nm is a type - 05, 06, 07, 08, 09, 10, 11, 12. k is user defined reference number.
<b>DEFFUNC(k) ([n1, ..., nN])</b>	fixed	User Defined Function. k is user defined reference number. n1 - nN are function argument names.
<b>DEFFUNC(k,T,D) ([n1, ..., nN])=F</b>	fixed	Function from an Add-on. k, n1 - nN as above. T - Type, D - Add-on name, F - Function name in Add-on.
<b>FUNC(k) ([n1, ..., nN])</b>	fixed	Call of User Defined Function. k is required reference number. n1 - nN are required states of arguments.
<b>n1, ..., nN</b>	user	Argument Names in definition of User Defined Function.
<b>StrureltoMatlab</b>	user	Filename of Add-on without extension with User Defined Function.
<b>Matlab</b>	user	User Defined Function as export Name in Add-on above.
<b>{ Function Comment }</b>	user	Comment used in Limit State, Reference and User Defined Functions. Can be omitted.
<b>sin(x), sqrt(x), ln(x)</b>	fixed	Predefined Functions. See manual for a reference.
<b>PI, EULER</b>	fixed	Predefined Constants. See manual for a reference.
<b>Alpha, Length, Up</b>	user	Parsed Symbolic Variables. Automatically inserted in Stochastic Model.
<b>~x, ~t1</b>	user	Internal Local Variables. Used internally for temporary calculations.
<b>123, 4.567, 1.33e-5</b>	user	Numerical Values. Only full range of decimal integer and real values can be used.
<b>"Hallo World"</b>	user	Literal Values. Any kind of text strings can be used.
<b>+, -, /, *, ^</b>	fixed	Binary operators: Addition, Subtraction, Division, Multiplication and Power.
<b>// Arbitrary comment</b>	user	Single Line Comment. Can be used for additional comments inside of Symbolic Expressions.
<b>! Other kind of comment</b>	user	Single Line Comment. Can be used for additional comments inside of Symbolic Expressions.

#### Symbolic Definition

$$\text{FLIM}(1) = \text{OR} * \text{As} * \text{fy} * (\text{h} - \text{d1} - (0.5 * \text{As} * \text{fy}) / (\text{b} * \text{fc})) - \text{OE} * (\text{q} + \text{yc} * \text{h} * \text{b}) * \text{l}^2 / 8$$

### Parsed Symbolic Expressions

#### Limit State Functions

$$\text{FLIM}(1) = \text{OR} * \text{As} * \text{fy} * (\text{h} - \text{d1} - (0.5 * \text{As} * \text{fy}) / (\text{b} * \text{fc})) - \text{OE} * (\text{q} + \text{yc} * \text{h} * \text{b}) * \text{l}^2 / 8$$

#### Variables in FLIM(1)

<b>OR</b>	<b>R</b>	Unsicherheiten Widerstandsseite
<b>As</b>	<b>P</b>	Bewehrungsfläche
<b>fy</b>	<b>R</b>	Streckgrenze der Stahlbewehrung
<b>h</b>	<b>P</b>	Balkenhöhe
<b>d1</b>	<b>P</b>	Betondeckung
<b>b</b>	<b>P</b>	Balkenbreite
<b>fc</b>	<b>R</b>	Betondruckfestigkeit
<b>OE</b>	<b>R</b>	Unsicherheiten Einwirkungsseite
<b>q</b>	<b>R</b>	Nutzlast
<b>yc</b>	<b>R</b>	Wichte des Stahlbetons
<b>l</b>	<b>P</b>	Stützweite



## Summary Symbolic Variables

OR	R	Unsicherheiten Widerstandsseite
As	P	Bewehrungsfläche
fy	R	Streckgrenze der Stahlbewehrung
h	P	Balkenhöhe
d1	P	Betondeckung
b	P	Balkenbreite
fc	R	Betondruckfestigkeit
OE	R	Unsicherheiten Einwirkungsseite
q	R	Nutzlast
yc	R	Wichte des Stahlbetons
l	P	Stützweite

## Stochastic Model

### U -> X Rosenblatt transformation

General dependent vectors are represented by a Sequence of Conditional Distributions (SCD).  
For 2 variables this reads:

$$\Phi(u_1) = F_1(x_1); \quad \Phi(u_2) = F_2(x_2 | x_1)$$

$$x_1 = F_1^{-1}(\Phi(u_1)); \quad x_2 = F_2^{-1}(\Phi(u_2) | F_1^{-1}(\Phi(u_1)))$$

Just Normal/Lognormal variables can have correlation coefficients

### Legend

	Basic random variable (time independent) - Distribution parameters can be functions of p, R and t
	Deterministic Parameter
	Moments input for distribution parameters
	Parameters input for distribution parameters
	Sensitivity for Stochastic Variable or Deterministic Parameter is active
	Distribution parameter is a real decimal constant

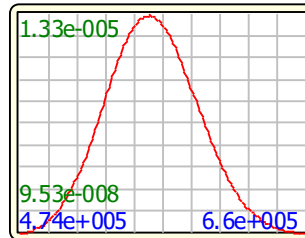
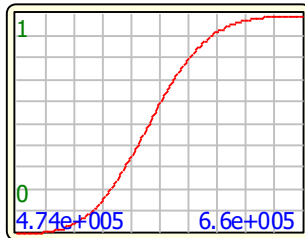
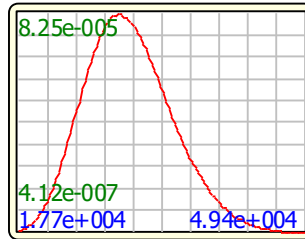
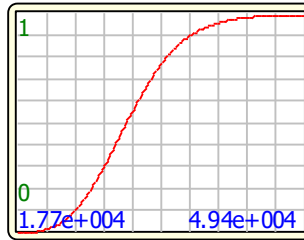


### Tabular Form

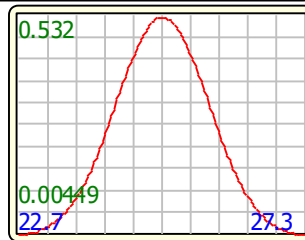
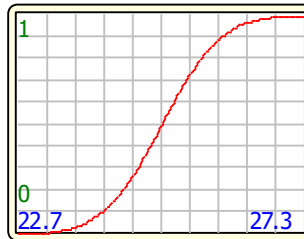
	fc	Betondruckfestigkeit	Lognormal					= 30000			= 5000
	fy	Streckgrenze der Stahlbewehrung	Lognormal					= 560000			= 30000
	yc	Wichte des Stahlbetons	Normal (Gauss)					= 25			= 0.75
	q	Nutzlast	Gamma					= 10			= 1.89
	OE	Unsicherheiten Einwirkungsseite	Lognormal					= 1			= 0.2
	OR	Unsicherheiten Widerstandsseite	Normal (Gauss)					= 1.1			= 0.077
	l	Stützweite	Constant					= 8			
	As	Bewehrungsfläche	Constant					= 0.00061			
	h	Balkenhöhe	Constant					= 0.8			
	b	Balkenbreite	Constant					= 0.4			
	d1	Betondeckung	Constant					= 0.05			

## Graphical Form

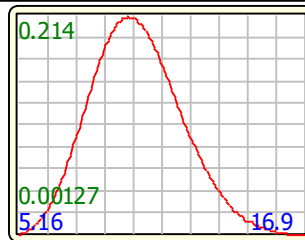
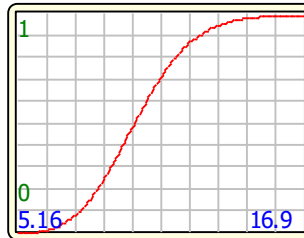
fc - { Betondruckfestigkeit }		
Lognormal Distribution		
Moments	mean = 30000	std.dev. = 5000
Values	30000	5000
Parameters	xi = 29591.8	delta = 0.165526



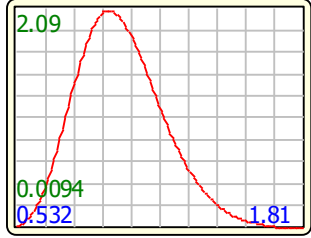
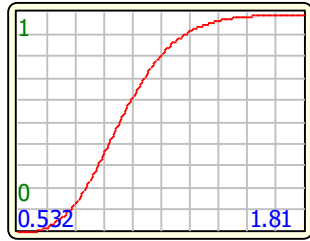
yc - { Wichte des Stahlbetons }		
Normal (Gauss) Distribution		
Moments	mean = 25	std.dev. = 0.75
Values	25	0.75
Parameters	m = 25	sigma = 0.75



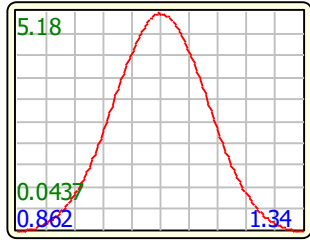
q - { Nutzlast }		
Gamma Distribution		
Moments	mean = 10	std.dev. = 1.89
Values	10	1.89
Parameters	k = 27.9947	lambda = 2.79947



OE - { Unsicherheiten Einwirkungsseite }		
Lognormal Distribution		
Moments	mean = 1	std.dev. = 0.2
Values	1	0.2
Parameters	xi = 0.980581	delta = 0.198042



OR - { Unsicherheiten Widerstandsseite }		
Normal (Gauss) Distribution		
Moments	mean = 1.1	std.dev. = 0.077
Values	1.1	0.077
Parameters	m = 1.1	sigma = 0.077



I - { Stützweite }	
Deterministic Parameter	
8	

As - { Bewehrungsfläche }	
Deterministic Parameter	
0.00061	

h - { Balkenhöhe }	
Deterministic Parameter	
0.8	

b - { Balkenbreite }	
Deterministic Parameter	
0.4	
d1 - { Betondeckung }	
Deterministic Parameter	
0.05	

## 1.Versuch

### Form/Sorm

#### Computation Options

 Amount of Results to File *.R??	NPRI	<input checked="" type="checkbox"/> Large
 Amount of Monitoring Information	IMON	<input checked="" type="checkbox"/> Small
 Method of Probability Integration	IMET	<input checked="" type="checkbox"/> Second Order Reliability Method
 Optimizer for $\beta$ -point Search	IOPT	<input checked="" type="checkbox"/> RFLS
 Number of Samples	NSIMUL	<input checked="" type="checkbox"/> 0
 Computation of Sensitivities	IALFA	<input checked="" type="checkbox"/> Both
 X-space Gradient Numerical Scheme	IGRF	<input checked="" type="checkbox"/> Forward Differences
 Maximum Number of Iterations in Algorithm #1	MAX1	<input checked="" type="checkbox"/> 50
 Maximum Number of Iterations in Algorithm #2	MAX2	<input checked="" type="checkbox"/> 50
 Convergence Criterion for $\beta$ -point Search	EPSCON	<input checked="" type="checkbox"/> 0.001
 Armijo Line-search Stop Criterion	SMU	<input checked="" type="checkbox"/> 0.1
 Initial Values for Random Number Generator	SIMSTA	<input checked="" type="checkbox"/> Set 1
 Stationarity	ITV	<input checked="" type="checkbox"/> No
 Threshold Probability of the Intermediate Failure Domains	PTRESH	<input type="checkbox"/> 0.1
 Initial Scaling Factor of the Proposal Distribution	SDMULT	<input type="checkbox"/> 0.6
 Number of Seed Values for SDMULT to Modify	ADPT_NCS	<input type="checkbox"/> 15
 Export Samples from Monte Carlo or Subset Simulation	IXLS	<input type="checkbox"/> No Samples



## Numerical Results

```
*****
----- Comrel-TI (Version 10) -----
---- (c) Copyright: RCP GmbH (1989-2020) ----
*****
```

```
-----
Job name ..... :                               Versuch1
Failure criterion no. :      1
Comment : No commen
Transformation type  : Rosenblatt
Optimization algorithm: RFLS
-----
```


















```
FORM-beta=  2.796; SORM-beta=  2.783; beta(Sampling)=  --   (IER=  0)
FORM-Pf=  2.58E-03; SORM-Pf=  2.69E-03; Pf(Sampling)=  --
```

```
----- Statistics after COMREL-TI -----
State Function calls      =  70
State Funct. gradient evaluations =  5
Total computation time (CPU-secs.)=  0.02
The error indicator (IER) was =  0
*****
```

Reliability analysis is finished

### MCS

### Computation Options

	Amount of Results to File *.R??	NPRI	✓ Large
	Amount of Monitoring Information	IMON	✓ Small
	Method of Probability Integration	IMET	✓ Crude Monte Carlo Sampling
	Optimizer for $\beta$ -point Search	IOPT	🚫
	Number of Samples	NSIMUL	✓ 1000000
	Computation of Sensitivities	IALFA	✓ Both
	X-space Gradient Numerical Scheme	IGRF	✓ Forward Differences
	Maximum Number of Iterations in Algorithm #1	MAX1	✓ 50
	Maximum Number of Iterations in Algorithm #2	MAX2	✓ 50
	Convergence Criterion for $\beta$ -point Search	EPSCON	✓ 0.001
	Armijo Line-search Stop Criterion	SMU	✓ 0.1
	Initial Values for Random Number Generator	SIMSTA	✓ Set 1
	Stationarity	ITV	✓ No
	Threshold Probability of the Intermediate Failure Domains	PTRESH	🚫 0.1
	Initial Scaling Factor of the Proposal Distribution	SDMULT	🚫 0.6
	Number of Seed Values for SDMULT to Modify	ADPT_NCS	🚫 15
	Export Samples from Monte Carlo or Subset Simulation	IXLS	✓ No Samples

# Numerical Results

```
*****
----- Comrel-TI (Version 10) -----
---- (c) Copyright: RCP GmbH (1989-2020) ----
*****
```

```
-----
Job name ..... :                               Versuch1
Failure criterion no. :      1
Comment : No commen
Transformation type : Rosenblatt
Optimization algorithm: -----

--- Crude Monte Carlo sampling with 1000000 samples; Seed=Set No. 1 ---
Simul.No. 100000, successf.= 100000 E(P_f)= 2.52E-03, C.o.V.(%)= 6.29
Simul.No. 200000, successf.= 200000 E(P_f)= 2.60E-03, C.o.V.(%)= 4.38
Simul.No. 300000, successf.= 300000 E(P_f)= 2.64E-03, C.o.V.(%)= 3.55
Simul.No. 400000, successf.= 400000 E(P_f)= 2.61E-03, C.o.V.(%)= 3.09
Simul.No. 500000, successf.= 500000 E(P_f)= 2.66E-03, C.o.V.(%)= 2.74
Simul.No. 600000, successf.= 600000 E(P_f)= 2.69E-03, C.o.V.(%)= 2.49
Simul.No. 700000, successf.= 700000 E(P_f)= 2.66E-03, C.o.V.(%)= 2.32
Simul.No. 800000, successf.= 800000 E(P_f)= 2.65E-03, C.o.V.(%)= 2.17
Simul.No. 900000, successf.= 899999 E(P_f)= 2.67E-03, C.o.V.(%)= 2.04
Simul.No.1000000, successf.= 999999 E(P_f)= 2.70E-03, C.o.V.(%)= 1.92

beta(Simulation)= 2.783; Pf(Simulation)= 2.70E-03 (IER= 0)

----- Statistics after COMREL-TI -----
State Function calls = 999999
State Funct. gradient evaluations = 0
Total computation time (CPU-secs.)= 18.02
The error indicator (IER) was = 0
*****
```

Reliability analysis is finished










## 2.Versuch

### Form/Sorm

#### Tabular Form


















 $f_c$	Betondruckfestigkeit	Lognormal			$\bar{x}$  = 30000	$\sigma$  = 5000
 $f_y$	Streckgrenze der Stahlbewehrung	Lognormal			$\bar{x}$  = 560000	$\sigma$  = 30000
 $\gamma_c$	Wichte des Stahlbetons	Normal (Gauss)			$\bar{x}$  = 25	$\sigma$  = 0.75
 $q$	Nutzlast	Gamma			$\bar{x}$  = 10	$\sigma$  = 1.89
 $OE$	Unsicherheiten Einwirkungsseite	Lognormal			$\bar{x}$  = 1	$\sigma$  = 0.2
 $OR$	Unsicherheiten Widerstandsseite	Normal (Gauss)			$\bar{x}$  = 1.1	$\sigma$  = 0.077
 $l$	Stützweite	Constant			$C$  = 8	
 $A_s$	Bewehrungsfläche	Constant			$C$  = 0.0007	
 $h$	Balkenhöhe	Constant			$C$  = 0.8	
 $b$	Balkenbreite	Constant			$C$  = 0.4	
 $d_1$	Betondeckung	Constant			$C$  = 0.05	

## Computation Options

 Amount of Results to File *.R??	NPRI	✓ Large
 Amount of Monitoring Information	IMON	✓ Small
 Method of Probability Integration	IMET	✓ Second Order Reliability Method
 Optimizer for $\beta$ -point Search	IOPT	✓ RFLS
 Number of Samples	NSIMUL	✓ 0
 Computation of Sensitivities	IALFA	✓ Both
 X-space Gradient Numerical Scheme	IGRF	✓ Forward Differences
 Maximum Number of Iterations in Algorithm #1	MAX1	✓ 50
 Maximum Number of Iterations in Algorithm #2	MAX2	✓ 50
 Convergence Criterion for $\beta$ -point Search	EPSCON	✓ 0.001
 Armijo Line-search Stop Criterion	SMU	✓ 0.1
 Initial Values for Random Number Generator	SIMSTA	✓ Set 1
 Stationarity	ITV	✓ No
 Threshold Probability of the Intermediate Failure Domains	PTRESH	🟡 0.1
 Initial Scaling Factor of the Proposal Distribution	SDMULT	🟡 0.6
 Number of Seed Values for SDMULT to Modify	ADPT_NCS	🟡 15
 Export Samples from Monte Carlo or Subset Simulation	IXLS	🟡 No Samples

MCS

## Computation Options

 Amount of Results to File *.R??	NPRI	✓ Large
 Amount of Monitoring Information	IMON	✓ Small
 Method of Probability Integration	IMET	✓ Crude Monte Carlo Sampling
 Optimizer for $\beta$ -point Search	IOPT	🟡
 Number of Samples	NSIMUL	✓ 1000000
 Computation of Sensitivities	IALFA	✓ Both
 X-space Gradient Numerical Scheme	IGRF	✓ Forward Differences
 Maximum Number of Iterations in Algorithm #1	MAX1	✓ 50
 Maximum Number of Iterations in Algorithm #2	MAX2	✓ 50
 Convergence Criterion for $\beta$ -point Search	EPSCON	✓ 0.001
 Armijo Line-search Stop Criterion	SMU	✓ 0.1
 Initial Values for Random Number Generator	SIMSTA	✓ Set 1
 Stationarity	ITV	✓ No
 Threshold Probability of the Intermediate Failure Domains	PTRESH	🟡 0.1
 Initial Scaling Factor of the Proposal Distribution	SDMULT	🟡 0.6
 Number of Seed Values for SDMULT to Modify	ADPT_NCS	🟡 15
 Export Samples from Monte Carlo or Subset Simulation	IXLS	✓ No Samples

# Numerical Results

```
*****
----- Comrel-TI (Version 10) -----
---- (c) Copyright: RCP GmbH (1989-2020) ----
*****
```

```
-----
Job name ..... :                               Versuch1
Failure criterion no. :      1
Comment : No commen
Transformation type : Rosenblatt
Optimization algorithm: -----

--- Crude Monte Carlo sampling with 1000000 samples; Seed=Set No. 1 ---
Simul.No. 100000, successf.= 100000 E(P_f)= 3.90E-04, C.o.V.(%)= 16.01
Simul.No. 200000, successf.= 200000 E(P_f)= 4.30E-04, C.o.V.(%)= 10.78
Simul.No. 300000, successf.= 300000 E(P_f)= 3.97E-04, C.o.V.(%)= 9.17
Simul.No. 400000, successf.= 400000 E(P_f)= 3.85E-04, C.o.V.(%)= 8.06
Simul.No. 500000, successf.= 500000 E(P_f)= 3.98E-04, C.o.V.(%)= 7.09
Simul.No. 600000, successf.= 600000 E(P_f)= 4.17E-04, C.o.V.(%)= 6.32
Simul.No. 700000, successf.= 700000 E(P_f)= 4.03E-04, C.o.V.(%)= 5.95
Simul.No. 800000, successf.= 800000 E(P_f)= 3.86E-04, C.o.V.(%)= 5.69
Simul.No. 900000, successf.= 899999 E(P_f)= 4.02E-04, C.o.V.(%)= 5.25
Simul.No.1000000, successf.= 999999 E(P_f)= 4.12E-04, C.o.V.(%)= 4.93

beta(Simulation)= 3.345; Pf(Simulation)= 4.12E-04 (IER= 0)

----- Statistics after COMREL-TI -----
State Function calls = 999999
State Funct. gradient evaluations = 0
Total computation time (CPU-secs.)= 17.80
The error indicator (IER) was = 0
*****
```

Reliability analysis is finished












## 3.Versuch

### Form/Sorm

#### Tabular Form

<b>R</b> <sub>fc</sub>	Betondruckfestigkeit	Lognormal	<b>M</b>	✓	$\bar{x}$ <b>C</b> = 30000	$\sigma$ <b>C</b> = 5000
<b>R</b> <sub>fy</sub>	Streckgrenze der Stahlbewehrung	Lognormal	<b>M</b>	✓	$\bar{x}$ <b>C</b> = 560000	$\sigma$ <b>C</b> = 30000
<b>R</b> <sub>yc</sub>	Wichte des Stahlbetons	Normal (Gauss)	<b>M</b>	✓	$\bar{x}$ <b>C</b> = 25	$\sigma$ <b>C</b> = 0.75
<b>R</b> <sub>q</sub>	Nutzlast	Gamma	<b>M</b>	✓	$\bar{x}$ <b>C</b> = 10	$\sigma$ <b>C</b> = 1.89
<b>R</b> <sub>OE</sub>	Unsicherheiten Einwirkungsseite	Lognormal	<b>M</b>	✓	$\bar{x}$ <b>C</b> = 1	$\sigma$ <b>C</b> = 0.2
<b>R</b> <sub>OR</sub>	Unsicherheiten Widerstandsseite	Normal (Gauss)	<b>M</b>	✓	$\bar{x}$ <b>C</b> = 1.1	$\sigma$ <b>C</b> = 0.077
<b>P</b> <sub>l</sub>	Stützweite	Constant	<b>P</b>	✓	<b>C</b> <b>C</b> = 8	
<b>P</b> <sub>As</sub>	Bewehrungsfläche	Constant	<b>P</b>	✓	<b>C</b> <b>C</b> = 0.0008	
<b>P</b> <sub>h</sub>	Balkenhöhe	Constant	<b>P</b>	✓	<b>C</b> <b>C</b> = 0.8	
<b>P</b> <sub>b</sub>	Balkenbreite	Constant	<b>P</b>	✓	<b>C</b> <b>C</b> = 0.4	
<b>P</b> <sub>d1</sub>	Betondeckung	Constant	<b>P</b>	✓	<b>C</b> <b>C</b> = 0.05	

## Computation Options

 Amount of Results to File *.R??	NPRI	✓ Large
 Amount of Monitoring Information	IMON	✓ Small
 Method of Probability Integration	IMET	✓ Second Order Reliability Method
 Optimizer for $\beta$ -point Search	IOPT	✓ RFLS
 Number of Samples	NSIMUL	✓ 0
 Computation of Sensitivities	IALFA	✓ Both
 X-space Gradient Numerical Scheme	IGRF	✓ Forward Differences
 Maximum Number of Iterations in Algorithm #1	MAX1	✓ 50
 Maximum Number of Iterations in Algorithm #2	MAX2	✓ 50
 Convergence Criterion for $\beta$ -point Search	EPSCON	✓ 0.001
 Armijo Line-search Stop Criterion	SMU	✓ 0.1
 Initial Values for Random Number Generator	SIMSTA	✓ Set 1
 Stationarity	ITV	✓ No
 Threshold Probability of the Intermediate Failure Domains	PTRESH	🟡 0.1
 Initial Scaling Factor of the Proposal Distribution	SDMULT	🟡 0.6
 Number of Seed Values for SDMULT to Modify	ADPT_NCS	🟡 15
 Export Samples from Monte Carlo or Subset Simulation	IXLS	🟡 No Samples

## Numerical Results

```

*****
----- Comrel-TI (Version 10) -----
---- (c) Copyright: RCP GmbH (1989-2020) ----
*****
  
```

```

-----
Job name ..... :                               Versuch1
Failure criterion no. :      1
Comment : No commen
Transformation type : Rosenblatt
Optimization algorithm: RFLS
-----
  
```

```

FORM-beta=  3.886; SORM-beta=  3.873; beta(Sampling)=  --   (IER=  0)
FORM-Pf=  5.09E-05; SORM-Pf=  5.38E-05; Pf(Sampling)=  --
  
```

```

----- Statistics after COMREL-TI -----
State Function calls      =      69
State Funct. gradient evaluations =      5
Total computation time (CPU-secs.)=  0.00
The error indicator (IER) was =  0
*****
  
```

Reliability analysis is finished

### Computation Options

Amount of Results to File *.R??	NPRI	✓ Large
Amount of Monitoring Information	IMON	✓ Small
Method of Probability Integration	IMET	✓ Crude Monte Carlo Sampling
Optimizer for $\beta$ -point Search	IOPT	🚫
Number of Samples	NSIMUL	✓ 1000000
Computation of Sensitivities	IALFA	✓ Both
X-space Gradient Numerical Scheme	IGRF	✓ Forward Differences
Maximum Number of Iterations in Algorithm #1	MAX1	✓ 50
Maximum Number of Iterations in Algorithm #2	MAX2	✓ 50
Convergence Criterion for $\beta$ -point Search	EPSCON	✓ 0.001
Armijo Line-search Stop Criterion	SMU	✓ 0.1
Initial Values for Random Number Generator	SIMSTA	✓ Set 1
Stationarity	ITV	✓ No
Threshold Probability of the Intermediate Failure Domains	PTRESH	🚫 0.1
Initial Scaling Factor of the Proposal Distribution	SDMULT	🚫 0.6
Number of Seed Values for SDMULT to Modify	ADPT_NCS	🚫 15
Export Samples from Monte Carlo or Subset Simulation	IXLS	✓ No Samples

### Numerical Results

```
*****
----- Comrel-TI (Version 10) -----
---- (c) Copyright: RCP GmbH (1989-2020) ----
*****
```

```
-----
Job name ..... :                               Versuch1
Failure criterion no. :      1
Comment : No comment
Transformation type : Rosenblatt
Optimization algorithm: -----

--- Crude Monte Carlo sampling with 1000000 samples; Seed=Set No. 1 ---
Simul.No. 100000, successf.= 100000 E(P_f)= 3.00E-05, C.o.V.(%)= 57.73
Simul.No. 200000, successf.= 200000 E(P_f)= 3.00E-05, C.o.V.(%)= 40.82
Simul.No. 300000, successf.= 300000 E(P_f)= 2.67E-05, C.o.V.(%)= 35.35
Simul.No. 400000, successf.= 400000 E(P_f)= 3.50E-05, C.o.V.(%)= 26.73
Simul.No. 500000, successf.= 500000 E(P_f)= 3.00E-05, C.o.V.(%)= 25.82
Simul.No. 600000, successf.= 600000 E(P_f)= 4.17E-05, C.o.V.(%)= 20.00
Simul.No. 700000, successf.= 700000 E(P_f)= 4.29E-05, C.o.V.(%)= 18.26
Simul.No. 800000, successf.= 800000 E(P_f)= 4.12E-05, C.o.V.(%)= 17.41
Simul.No. 900000, successf.= 899999 E(P_f)= 4.11E-05, C.o.V.(%)= 16.44
Simul.No.1000000, successf.= 999999 E(P_f)= 4.20E-05, C.o.V.(%)= 15.43

beta(Simulation)= 3.933; Pf(Simulation)= 4.20E-05 (IER= 0)

----- Statistics after COMREL-TI -----
State Function calls = 999999
State Funct. gradient evaluations = 0
Total computation time (CPU-secs.)= 17.98
The error indicator (IER) was = 0
*****
```

Reliability analysis is finished

## 4.Versuch

### Form/Sorm

#### Tabular Form

<b>R</b> $f_c$	Betondruckfestigkeit	Lognormal	<b>M</b> ✓	$\bar{x}_C = 30000$	$\sigma_C = 5000$
<b>R</b> $f_y$	Streckgrenze der Stahlbewehrung	Lognormal	<b>M</b> ✓	$\bar{x}_C = 560000$	$\sigma_C = 30000$
<b>R</b> $\gamma_c$	Wichte des Stahlbetons	Normal (Gauss)	<b>M</b> ✓	$\bar{x}_C = 25$	$\sigma_C = 0.75$
<b>R</b> $q$	Nutzlast	Gamma	<b>M</b> ✓	$\bar{x}_C = 10$	$\sigma_C = 1.89$
<b>R</b> OE	Unsicherheiten Einwirkungsseite	Lognormal	<b>M</b> ✓	$\bar{x}_C = 1$	$\sigma_C = 0.2$
<b>R</b> OR	Unsicherheiten Widerstandsseite	Normal (Gauss)	<b>M</b> ✓	$\bar{x}_C = 1.1$	$\sigma_C = 0.077$
<b>P</b> $l$	Stützweite	Constant	<b>P</b> ✓	$C_C = 8$	
<b>P</b> $A_s$	Bewehrungsfläche	Constant	<b>P</b> ✓	$C_C = 0.00087$	
<b>P</b> $h$	Balkenhöhe	Constant	<b>P</b> ✓	$C_C = 0.8$	
<b>P</b> $b$	Balkenbreite	Constant	<b>P</b> ✓	$C_C = 0.4$	
<b>P</b> $d_1$	Betondeckung	Constant	<b>P</b> ✓	$C_C = 0.05$	

#### Computation Options

 Amount of Results to File *.R??	NPRI	✓ Large
 Amount of Monitoring Information	IMON	✓ Small
 Method of Probability Integration	IMET	✓ Second Order Reliability Method
 Optimizer for $\beta$ -point Search	IOPT	✓ RFLS
 Number of Samples	NSIMUL	✓ 0
 Computation of Sensitivities	IALFA	✓ Both
 X-space Gradient Numerical Scheme	IGRF	✓ Forward Differences
 Maximum Number of Iterations in Algorithm #1	MAX1	✓ 50
 Maximum Number of Iterations in Algorithm #2	MAX2	✓ 50
 Convergence Criterion for $\beta$ -point Search	EPSCON	✓ 0.001
 Armijo Line-search Stop Criterion	SMU	✓ 0.1
 Initial Values for Random Number Generator	SIMSTA	✓ Set 1
 Stationarity	ITV	✓ No
 Threshold Probability of the Intermediate Failure Domains	PTRESH	0.1
 Initial Scaling Factor of the Proposal Distribution	SDMULT	0.6
 Number of Seed Values for SDMULT to Modify	ADPT_NCS	15
 Export Samples from Monte Carlo or Subset Simulation	IXLS	No Samples

## Numerical Results

```
*****
----- Comrel-TI (Version 10) -----
---- (c) Copyright: RCP GmbH (1989-2020) ----
*****
```

```
-----
Job name ..... :                               Versuch1
Failure criterion no. :      1
Comment : No commen
Transformation type  : Rosenblatt
Optimization algorithm: RFLS
-----
```






















```
FORM-beta= 4.221; SORM-beta= 4.208; beta(Sampling)=  -- (IER= 0)
FORM-Pf= 1.21E-05; SORM-Pf= 1.29E-05; Pf(Sampling)=  --
```

```
----- Statistics after COMREL-TI -----
State Function calls      = 76
State Funct. gradient evaluations = 6
Total computation time (CPU-secs.)= 0.02
The error indicator (IER) was = 0
*****
```

Reliability analysis is finished

### MCS

### Computation Options

 Amount of Results to File *.R??	NPRI	✓ Large
 Amount of Monitoring Information	IMON	✓ Small
 Method of Probability Integration	IMET	✓ Crude Monte Carlo Sampling
 Optimizer for $\beta$ -point Search	IOPT	
 Number of Samples	NSIMUL	✓ 1000000
 Computation of Sensitivities	IALFA	✓ Both
 X-space Gradient Numerical Scheme	IGRF	✓ Forward Differences
 Maximum Number of Iterations in Algorithm #1	MAX1	✓ 50
 Maximum Number of Iterations in Algorithm #2	MAX2	✓ 50
 Convergence Criterion for $\beta$ -point Search	EPSCON	✓ 0.001
 Armijo Line-search Stop Criterion	SMU	✓ 0.1
 Initial Values for Random Number Generator	SIMSTA	✓ Set 1
 Stationarity	ITV	✓ No
 Threshold Probability of the Intermediate Failure Domains	PTRESH	 0.1
 Initial Scaling Factor of the Proposal Distribution	SDMULT	 0.6
 Number of Seed Values for SDMULT to Modify	ADPT_NCS	 15
 Export Samples from Monte Carlo or Subset Simulation	IXLS	✓ No Samples



# Numerical Results

```
*****
----- Comrel-TI (Version 10) -----
---- (c) Copyright: RCP GmbH (1989-2020) ----
*****
```

```
-----
Job name ..... :                               Versuch1
Failure criterion no. :      1
Comment : No commen
Transformation type   : Rosenblatt
Optimization algorithm: -----
-----
--- Crude Monte Carlo sampling with 1000000 samples; Seed=Set No. 1 ---
Simul.No. 100000, successf.= 100000 E(P_f)= 0.0      , C.o.V.(%)= 0.00
Simul.No. 200000, successf.= 200000 E(P_f)= 5.00E-06, C.o.V.(%)= 100.00
Simul.No. 300000, successf.= 300000 E(P_f)= 3.33E-06, C.o.V.(%)= 100.00
Simul.No. 400000, successf.= 400000 E(P_f)= 5.00E-06, C.o.V.(%)= 70.71
Simul.No. 500000, successf.= 500000 E(P_f)= 6.00E-06, C.o.V.(%)= 57.73
Simul.No. 600000, successf.= 600000 E(P_f)= 1.17E-05, C.o.V.(%)= 37.80
Simul.No. 700000, successf.= 700000 E(P_f)= 1.00E-05, C.o.V.(%)= 37.80
Simul.No. 800000, successf.= 800000 E(P_f)= 1.00E-05, C.o.V.(%)= 35.36
Simul.No. 900000, successf.= 899999 E(P_f)= 8.89E-06, C.o.V.(%)= 35.36
Simul.No.1000000, successf.= 999999 E(P_f)= 9.00E-06, C.o.V.(%)= 33.33

beta(Simulation)= 4.289; Pf(Simulation)= 9.00E-06 (IER= 0)

----- Statistics after COMREL-TI -----
State Function calls      = 999999
State Funct. gradient evaluations = 0
Total computation time (CPU-secs.)= 17.61
The error indicator (IER) was = 0
*****
```

Reliability analysis is finished

# ANHANG C: Ausdrucksprotokoll von Rstab für Beispiel 2

## Modell-Basisangaben

Allgemein	Modellname	: Versuch2
	Projektname	: Beispiele
Projektbezeichnung	Modelltyp	: 2D-XZ (ux/uz/φy)
	Positive Richtung der globalen Z-Achse	: Nach oben
Klassifizierung der Lastfälle und Kombinationen	Klassifizierung der Lastfälle und Kombinationen	: Nach Norm: EN 1990
	x Kombinationen automatisch erzeugen	: x Ergebniskombinationen
Optionen	- CQC-Regel anwenden	
	- CAD/BIM-Modell ermöglichen	
Erdbeschleunigung	g	: 10.00 m/s <sup>2</sup>

## 1.2 Materialien

Mat. Nr.	Modul E [kN/cm <sup>2</sup> ]	Modul G [kN/cm <sup>2</sup> ]	Spez. Gewicht γ [kN/m <sup>3</sup> ]	Wärmedehnz. α [1/°C]	Teilsich.-Beiwert γ <sub>M</sub> [-]	Material-Modell
1	Baustahl S 235   EN 1993-1-1:2005-05 21000.00	8076.92	78.50	1.20E-05	1.00	Isotrop linear elastisch

## 1.3 Querschnitte

Quers. Nr.	Mater. Nr.	I <sub>r</sub> [cm <sup>4</sup> ]	I <sub>y</sub> [cm <sup>4</sup> ]	I <sub>z</sub> [cm <sup>4</sup> ]	Hauptachsen α [°]	Drehung α' [°]	Gesamtabmessungen [mm]	
		A [cm <sup>2</sup> ]	A <sub>y</sub> [cm <sup>2</sup> ]	A <sub>z</sub> [cm <sup>2</sup> ]			Breite b	Höhe h
1	IPE 160 1	20.09	869.30	7.33	0.00	0.00	82.0	160.0

## 2.1 Lastfälle

Lastfall	LF-Bezeichnung	EN 1990   ÖNORM Einwirkungskategorie	Eigengewicht - Faktor in Richtung			
			Aktiv	X	Y	Z
LF1		Ständig	x	0.000		-1.000
LF2		Nutzlasten - Kategorie A: Wohn/Aufenthaltsräume	-			

## 2.6 Ergebniskombinationen

Ergebniskombin.	Bezeichnung	Belastung
EK1	1.00*LF1/s	LF1/s
EK2	1.00*LF2	LF2
EK3		1.35*EK1/s + 1.5*EK2/s
EK4		EK1/s + EK2/s
EK5		EK1/s + 0.5*EK2/s
EK6		EK1/s + 0.3*EK2
EK7	GZT (STR/GEO) - Ständig / vorübergehend - Gl. 6.10	EK3/s
EK8	GZG - Charakteristisch	EK4/s
EK9	GZG - Häufig	EK5/s
EK10	GZG - Quasi-ständig	EK6/s

### 3.2 Stablasten

LF2

Nr.	Beziehen auf	An Stäben Nr.	Last-Art	Last-Verteilung	Last-Richtung	Bezugs-Länge	Lastparameter		
							Symbol	Wert	Einheit
1	Stäbe	1	Kraft	Konstant	Z	Wahre Länge	p	-10.000	kN/m

### 4.3 Querschnitte - Schnittgrößen

Ergebniskombinationen

Stab Nr.	EK	Knoten Nr.	Stelle x [m]	Kräfte [kN]			Momente $M_y$ [kNm]	Zugehörige Lastfälle
				N	$V_z$			
Querschnitt-Nr. 1: IPE 160								
1	EK3		0.000	MAX N	> 0.00	0.38	-0.34	LF 1
1	EK3		0.000	MIN N	> 0.00	0.38	-0.34	LF 1
1	EK3		0.000	MAX $V_z$	0.00	> 27.38	-24.64	LF 1,2
1	EK3		1.800	MIN $V_z$	0.00	> 0.00	0.00	LF 1
1	EK4		1.800	MAX $M_y$	0.00	0.00	> 0.00	LF 1
1	EK3		0.000	MIN $M_y$	0.00	27.38	> -24.64	LF 1,2

### STAHL EC3

FA1

Bemessung nach Eurocode 3

#### 1.1 Basisangaben

Zu bemessende Stäbe:	1
Zu bemessende Stabsätze:	
Nationaler Anhang:	CEN
Tragfähigkeitsnachweise	
Zu bemessende Ergebniskombinationen:	EK7 GZT (STR/GEO) - Ständig / vorübergehend - Gl. 6.10

#### 1.2 Materialien

Material-Nr.	Material Bezeichnung	E-Modul $E$ [kN/cm <sup>2</sup> ]	Schubmodul $G$ [kN/cm <sup>2</sup> ]	Querdehnzahl $\nu$ [-]	Streckgrenze		Max. Bauteildicke $t$ [mm]
					$f_{yk}$ [kN/cm <sup>2</sup> ]		
1	Baustahl S 235   EN 1993-1-1:2005-05	21000.00	8076.92	0.300	23.50		40.0
					21.50		80.0
					21.50		100.0
					19.50		150.0
					18.50		200.0
					17.50		250.0
					16.50		400.0

#### 1.3 Querschnitte

Quer. Nr.	Material-Nr.	Querschnitt Bezeichnung	Querschnitts-typ	Maximale Ausnutzung	Kommentar
1	1	IPE 160	I-Profil gewalzt	0.99	

#### 2.4 Nachweise stabweise

Stab Nr.	Stelle x [m]	LF/LK/EK	Nachweis	Gleichung Nr.	Bezeichnung
1	Querschnitt Nr. 1 - IPE 160				
	1.080	EK7	0.00	≤ 1	CS100) Keine bzw. sehr kleine Schnittgrößen
	0.000	EK7	0.96	≤ 1	CS112) Querschnittsnachweis - Biegung um y-Achse nach 6.2.5 - Klasse 3
	0.000	EK7	0.29	≤ 1	CS122) Querschnittsnachweis - Querkraft in Achse z nach 6.2.6(4) - Klasse 3 oder 4
	0.000	EK7	0.00	≤ 1	CS126) Querschnittsnachweis - Schubbeulen nach 6.2.6(6)
	0.000	EK7	0.96	≤ 1	CS142) Querschnittsnachweis - Biegung und Querkraft nach 6.2.9.2 und 6.2.10 - Klasse 3
	0.000	EK7	0.99	≤ 1	ST331) Stabilitätsnachweis - Biegedrillknicken nach 6.3.2.1 und 6.3.2.3 - I-Profil

# ANHANG D: Ausdrucksprotokolle von Comrel für Beispiel 2

## Modelldaten

### Reliability Symbolic Expressions

#### Legend

<b>FLIM(k)</b>	fixed	Limit State Function. k is user defined reference number.
<b>RFnm(k)</b>	fixed	Reference Function. nm is a type - 05, 06, 07, 08, 09, 10, 11, 12. k is user defined reference number.
<b>DEFFUNC(k) ([n1, ..., nN])</b>	fixed	User Defined Function. k is user defined reference number. n1 - nN are function argument names.
<b>DEFFUNC(k,T,D) ([n1, ..., nN])=F</b>	fixed	Function from an Add-on. k, n1 - nN as above. T - Type, D - Add-on name, F - Function name in Add-on.
<b>FUNC(k) ([n1, ..., nN])</b>	fixed	Call of User Defined Function. k is required reference number. n1 - nN are required states of arguments.
<b>n1, ..., nN</b>	user	Argument Names in definition of User Defined Function.
<b>StrureltoMatlab</b>	user	Filename of Add-on without extension with User Defined Function.
<b>Matlab</b>	user	User Defined Function as export Name in Add-on above.
<b>{ Function Comment }</b>	user	Comment used in Limit State, Reference and User Defined Functions. Can be omitted.
<b>sin(x), sqrt(x), ln(x)</b>	fixed	Predefined Functions. See manual for a reference.
<b>PI, EULER</b>	fixed	Predefined Constants. See manual for a reference.
<b>Alpha, Length, Up</b>	user	Parsed Symbolic Variables. Automatically inserted in Stochastic Model.
<b>~x, ~t1</b>	user	Internal Local Variables. Used internally for temporary calculations.
<b>123, 4.567, 1.33e-5</b>	user	Numerical Values. Only full range of decimal integer and real values can be used.
<b>"Hallo World"</b>	user	Literal Values. Any kind of text strings can be used.
<b>+, -, /, *, ^</b>	fixed	Binary operators: Addition, Subtraction, Division, Multiplication and Power.
<b>// Arbitrary comment</b>	user	Single Line Comment. Can be used for additional comments inside of Symbolic Expressions.
<b>! Other kind of comment</b>	user	Single Line Comment. Can be used for additional comments inside of Symbolic Expressions.

#### Symbolic Definition

$$FLIM(1) = OR \cdot fy \cdot Wy - (OE \cdot (ys \cdot A + q) \cdot c^2) / 2$$

### Parsed Symbolic Expressions

#### Limit State Functions

$$FLIM(1) = OR \cdot fy \cdot Wy - (OE \cdot (ys \cdot A + q) \cdot c^2) / 2$$

#### Variables in FLIM(1)

<b>OR</b>	R	Unsicherheiten Widerstandsseite
<b>fy</b>	R	Streckgrenze des Stahls
<b>Wy</b>	P	Widerstandsmoment des Querschnittes
<b>OE</b>	R	Unsicherheiten Einwirkungsseite
<b>ys</b>	R	Wichte des Stahls
<b>A</b>	P	Querschnittsfläche
<b>q</b>	R	Nutzlast
<b>c</b>	P	Kraglänge

#### Summary Symbolic Variables

<b>OR</b>	R	Unsicherheiten Widerstandsseite
<b>fy</b>	R	Streckgrenze des Stahls
<b>Wy</b>	P	Widerstandsmoment des Querschnittes
<b>OE</b>	R	Unsicherheiten Einwirkungsseite

<b>ys</b>	<b>R</b>	Wichte des Stahsl
<b>A</b>	<b>P</b>	Querschnittsfläche
<b>q</b>	<b>R</b>	Nutzlast
<b>c</b>	<b>P</b>	Kraglänge

## Stochastic Model

### U -> X Rosenblatt transformation

General dependent vectors are represented by a Sequence of Conditional Distributions (SCD).  
 For 2 variables this reads:

$$\Phi(u_1) = F_1(x_1); \quad \Phi(u_2) = F_2(x_2 | x_1)$$

$$x_1 = F_1^{-1}(\Phi(u_1)); \quad x_2 = F_2^{-1}(\Phi(u_2) | F_1^{-1}(\Phi(u_1)))$$

Just Normal/Lognormal variables can have correlation coefficients

### Legend

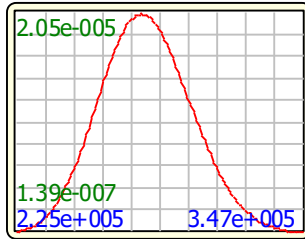
<b>R</b>	Basic random variable (time independent) - Distribution parameters can be functions of p, R and t
<b>P</b>	Deterministic Parameter
<b>M</b>	Moments input for distribution parameters
<b>P</b>	Parameters input for distribution parameters
✓	Sensitivity for Stochastic Variable or Deterministic Parameter is active
<b>C</b>	Distribution parameter is a real decimal constant

### Tabular Form

<b>R</b> <b>fy</b>	Streckgrenze des Stahls	Lognormal	<b>M</b> ✓	$\bar{x} \text{ C} = 280000$	$\sigma \text{ C} = 19600$
<b>R</b> <b>ys</b>	Wichte des Stahsl	Normal (Gauss)	<b>M</b> ✓	$\bar{x} \text{ C} = 77$	$\sigma \text{ C} = 0.77$
<b>R</b> <b>q</b>	Nutzlast	Gamma	<b>M</b> ✓	$\bar{x} \text{ C} = 10$	$\sigma \text{ C} = 1.89$
<b>R</b> <b>OR</b>	Unsicherheiten Widerstandsseite	Lognormal	<b>M</b> ✓	$\bar{x} \text{ C} = 1$	$\sigma \text{ C} = 0.05$
<b>R</b> <b>OE</b>	Unsicherheiten Einwirkungsseite	Normal (Gauss)	<b>M</b> ✓	$\bar{x} \text{ C} = 1$	$\sigma \text{ C} = 0.2$
<b>P</b> <b>Wy</b>	Widerstandsmoment des Querschnittes	Constant	<b>P</b> ✓	$\text{C C} = 0.0001087$	
<b>P</b> <b>A</b>	Querschnittsfläche	Constant	<b>P</b> ✓	$\text{C C} = 0.002001$	
<b>P</b> <b>c</b>	Kraglänge	Constant	<b>P</b> ✓	$\text{C C} = 1.8$	

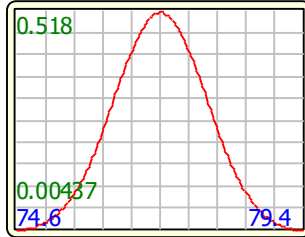
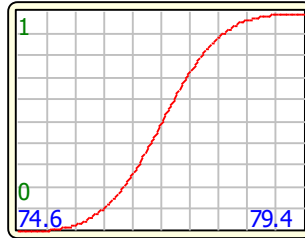
### Graphical Form

fy - { Streckgrenze des Stahls }		
Lognormal Distribution		
Moments	mean = 280000	std.dev. = 19600
Values	280000	19600
Parameters	xi = 279317	delta = 0.0699145



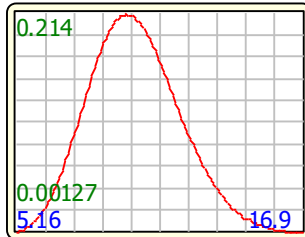
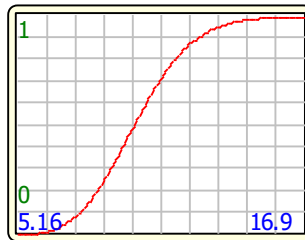
ys - { Wichte des Stahl }

Normal (Gauss) Distribution		
Moments	mean = 77	std.dev. = 0.77
Values	77	0.77
Parameters	m = 77	sigma = 0.77



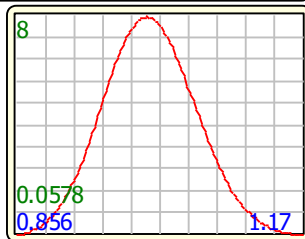
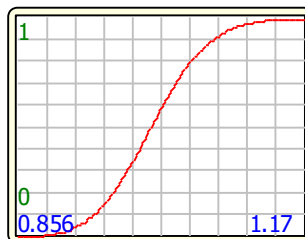
q - { Nutzlast }

Gamma Distribution		
Moments	mean = 10	std.dev. = 1.89
Values	10	1.89
Parameters	k = 27.9947	lambda = 2.79947

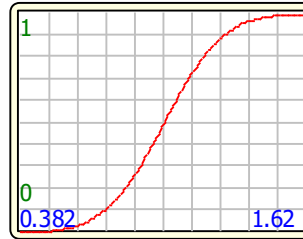


OR - { Unsicherheiten Widerstandsseite }

Lognormal Distribution		
Moments	mean = 1	std.dev. = 0.05
Values	1	0.05
Parameters	xi = 0.998752	delta = 0.0499688



OE - { Unsicherheiten Einwirkungsseite }		
Normal (Gauss) Distribution		
Moments	mean = 1	std.dev. = 0.2
Values	1	0.2
Parameters	m = 1	sigma = 0.2



Wy - { Widerstandsmoment des Querschnittes }	
Deterministic Parameter	
0.0001087	

c - { Kraglänge }	
Deterministic Parameter	
1.8	

## 1.Versuch

### Form/Sorm

#### Computation Options

 Amount of Results to File *.R??	NPRI	<input checked="" type="checkbox"/> Large
 Amount of Monitoring Information	IMON	<input checked="" type="checkbox"/> Small
 Method of Probability Integration	IMET	<input checked="" type="checkbox"/> Second Order Reliability Method
 Optimizer for $\beta$ -point Search	IOPT	<input checked="" type="checkbox"/> RFLS
 Number of Samples	NSIMUL	<input checked="" type="checkbox"/> 0
 Computation of Sensitivities	IALFA	<input checked="" type="checkbox"/> Both
 X-space Gradient Numerical Scheme	IGRF	<input checked="" type="checkbox"/> Forward Differences
 Maximum Number of Iterations in Algorithm #1	MAX1	<input checked="" type="checkbox"/> 50
 Maximum Number of Iterations in Algorithm #2	MAX2	<input checked="" type="checkbox"/> 50
 Convergence Criterion for $\beta$ -point Search	EPSCON	<input checked="" type="checkbox"/> 0.001
 Armijo Line-search Stop Criterion	SMU	<input checked="" type="checkbox"/> 0.1
 Initial Values for Random Number Generator	SIMSTA	<input checked="" type="checkbox"/> Set 1
 Stationarity	ITV	<input checked="" type="checkbox"/> No
 Threshold Probability of the Intermediate Failure Domains	PTRESH	<input type="checkbox"/> 0.1
 Initial Scaling Factor of the Proposal Distribution	SDMULT	<input type="checkbox"/> 0.6
 Number of Seed Values for SDMULT to Modify	ADPT_NCS	<input type="checkbox"/> 15
 Export Samples from Monte Carlo or Subset Simulation	IXLS	<input type="checkbox"/> No Samples

## Numerical Results

```
*****
----- Comrel-TI (Version 10) -----
---- (c) Copyright: RCP GmbH (1989-2020) ----
*****
```

```
-----
Job name ..... : Versuch3
Failure criterion no. : 1
Comment : No commen
Transformation type : Rosenblatt
Optimization algorithm: RFLS
-----
```


















```
FORM-beta= 2.362; SORM-beta= 2.399; beta(Sampling)= -- (IER= 0)
FORM-Pf= 9.08E-03; SORM-Pf= 8.23E-03; Pf(Sampling)= --
```

```
----- Statistics after COMREL-TI -----
State Function calls = 55
State Funct. gradient evaluations = 5
Total computation time (CPU-secs.)= 0.02
The error indicator (IER) was = 0
*****
```

Reliability analysis is finished

### MCS

### Computation Options

 Amount of Results to File *.R??	NPRI	✓ Large
 Amount of Monitoring Information	IMON	✓ Small
 Method of Probability Integration	IMET	✓ Crude Monte Carlo Sampling
 Optimizer for $\beta$ -point Search	IOPT	🚫
 Number of Samples	NSIMUL	✓ 1000000
 Computation of Sensitivities	IALFA	✓ Both
 X-space Gradient Numerical Scheme	IGRF	✓ Forward Differences
 Maximum Number of Iterations in Algorithm #1	MAX1	✓ 50
 Maximum Number of Iterations in Algorithm #2	MAX2	✓ 50
 Convergence Criterion for $\beta$ -point Search	EPSCON	✓ 0.001
 Armijo Line-search Stop Criterion	SMU	✓ 0.1
 Initial Values for Random Number Generator	SIMSTA	✓ Set 1
 Stationarity	ITV	✓ No
 Threshold Probability of the Intermediate Failure Domains	PTRESH	🚫 0.1
 Initial Scaling Factor of the Proposal Distribution	SDMULT	🚫 0.6
 Number of Seed Values for SDMULT to Modify	ADPT_NCS	🚫 15
 Export Samples from Monte Carlo or Subset Simulation	IXLS	✓ No Samples



# Numerical Results

```
*****
----- Comrel-TI (Version 10) -----
---- (c) Copyright: RCP GmbH (1989-2020) ----
*****
```

```
-----
Job name ..... : Versuch3
Failure criterion no. : 1
Comment : No commen
Transformation type : Rosenblatt
Optimization algorithm: -----
-----
--- Crude Monte Carlo sampling with 1000000 samples; Seed=Set No. 1 ---
Simul.No. 100000, successf.= 100000 E(P_f)= 8.16E-03, C.o.V.(%)= 3.49
Simul.No. 200000, successf.= 200000 E(P_f)= 8.17E-03, C.o.V.(%)= 2.46
Simul.No. 300000, successf.= 300000 E(P_f)= 8.25E-03, C.o.V.(%)= 2.00
Simul.No. 400000, successf.= 400000 E(P_f)= 8.16E-03, C.o.V.(%)= 1.74
Simul.No. 500000, successf.= 500000 E(P_f)= 8.20E-03, C.o.V.(%)= 1.55
Simul.No. 600000, successf.= 600000 E(P_f)= 8.26E-03, C.o.V.(%)= 1.42
Simul.No. 700000, successf.= 700000 E(P_f)= 8.20E-03, C.o.V.(%)= 1.31
Simul.No. 800000, successf.= 800000 E(P_f)= 8.19E-03, C.o.V.(%)= 1.23
Simul.No. 900000, successf.= 900000 E(P_f)= 8.18E-03, C.o.V.(%)= 1.16
Simul.No.1000000, successf.=1000000 E(P_f)= 8.20E-03, C.o.V.(%)= 1.10

beta(Simulation)= 2.400; Pf(Simulation)= 8.20E-03 (IER= 0)

----- Statistics after COMREL-TI -----
State Function calls = 1000000
State Funct. gradient evaluations = 0
Total computation time (CPU-secs.)= 16.55
The error indicator (IER) was = 0
*****
```

Reliability analysis is finished












## 2.Versuch

### Form/Sorm

#### Tabular Form

<b>R</b> $f_y$	Streckgrenze des Stahls	Lognormal	<b>M</b>	✓	$\bar{x}$ $C$ = 280000	$\sigma$ $C$ = 19600
<b>R</b> $y_s$	Wichte des Stahsl	Normal (Gauss)	<b>M</b>	✓	$\bar{x}$ $C$ = 77	$\sigma$ $C$ = 0.77
<b>R</b> $q$	Nutzlast	Gamma	<b>M</b>	✓	$\bar{x}$ $C$ = 10	$\sigma$ $C$ = 1.89
<b>R</b> $OR$	Unsicherheiten Widerstandsseite	Lognormal	<b>M</b>	✓	$\bar{x}$ $C$ = 1	$\sigma$ $C$ = 0.05
<b>R</b> $OE$	Unsicherheiten Einwirkungsseite	Normal (Gauss)	<b>M</b>	✓	$\bar{x}$ $C$ = 1	$\sigma$ $C$ = 0.2
<b>P</b> $W_y$	Widerstandsmoment des Querschnittes	Constant	<b>P</b>	✓	$C$ $C$ = 0.0001087	
<b>P</b> $A$	Querschnittsfläche	Constant	<b>P</b>	✓	$C$ $C$ = 0.002001	
<b>P</b> $c$	Kraglänge	Constant	<b>P</b>	✓	$C$ $C$ = 1.7	

## Computation Options

 Amount of Results to File *.R??	NPRI	✓ Large
 Amount of Monitoring Information	IMON	✓ Small
 Method of Probability Integration	IMET	✓ Second Order Reliability Method
 Optimizer for $\beta$ -point Search	IOPT	✓ RFLS
 Number of Samples	NSIMUL	✓ 0
 Computation of Sensitivities	IALFA	✓ Both
 X-space Gradient Numerical Scheme	IGRF	✓ Forward Differences
 Maximum Number of Iterations in Algorithm #1	MAX1	✓ 50
 Maximum Number of Iterations in Algorithm #2	MAX2	✓ 50
 Convergence Criterion for $\beta$ -point Search	EPSCON	✓ 0.001
 Armijo Line-search Stop Criterion	SMU	✓ 0.1
 Initial Values for Random Number Generator	SIMSTA	✓ Set 1
 Stationarity	ITV	✓ No
 Threshold Probability of the Intermediate Failure Domains	PTRESH	🟡 0.1
 Initial Scaling Factor of the Proposal Distribution	SDMULT	🟡 0.6
 Number of Seed Values for SDMULT to Modify	ADPT_NCS	🟡 15
 Export Samples from Monte Carlo or Subset Simulation	IXLS	🟡 No Samples

## Numerical Results

```
*****
----- Comrel-TI (Version 10) -----
---- (c) Copyright: RCP GmbH (1989-2020) ----
*****
```






















```
-----
Job name ..... : Versuch3
Failure criterion no. : 1
Comment : No commen
Transformation type : Rosenblatt
Optimization algorithm: RFLS
-----
```

```
FORM-beta= 2.835; SORM-beta= 2.870; beta(Sampling)= -- (IER= 0)
FORM-Pf= 2.29E-03; SORM-Pf= 2.05E-03; Pf(Sampling)= --
```

```
----- Statistics after COMREL-TI -----
State Function calls = 61
State Funct. gradient evaluations = 6
Total computation time (CPU-secs.)= 0.02
The error indicator (IER) was = 0
*****
```

Reliability analysis is finished

### Computation Options

 Amount of Results to File *.R??	NPRI	✓ Large
 Amount of Monitoring Information	IMON	✓ Small
 Method of Probability Integration	IMET	✓ Crude Monte Carlo Sampling
 Optimizer for $\beta$ -point Search	IOPT	
 Number of Samples	NSIMUL	✓ 1000000
 Computation of Sensitivities	IALFA	✓ Both
 X-space Gradient Numerical Scheme	IGRF	✓ Forward Differences
 Maximum Number of Iterations in Algorithm #1	MAX1	✓ 50
 Maximum Number of Iterations in Algorithm #2	MAX2	✓ 50
 Convergence Criterion for $\beta$ -point Search	EPSCON	✓ 0.001
 Armijo Line-search Stop Criterion	SMU	✓ 0.1
 Initial Values for Random Number Generator	SIMSTA	✓ Set 1
 Stationarity	ITV	✓ No
 Threshold Probability of the Intermediate Failure Domains	PTRESH	 0.1
 Initial Scaling Factor of the Proposal Distribution	SDMULT	 0.6
 Number of Seed Values for SDMULT to Modify	ADPT_NCS	 15
 Export Samples from Monte Carlo or Subset Simulation	IXLS	✓ No Samples

### Numerical Results

```
*****
----- Comrel-TI (Version 10) -----
---- (c) Copyright: RCP GmbH (1989-2020) ----
*****
```

```
-----
Job name ..... : Versuch3
Failure criterion no. : 1
Comment : No commen
Transformation type : Rosenblatt
Optimization algorithm: -----

--- Crude Monte Carlo sampling with 1000000 samples; Seed=Set No. 1 ---
Simul.No. 100000, successf.= 100000 E(P_f) = 2.02E-03, C.o.V.(%) = 7.03
Simul.No. 200000, successf.= 200000 E(P_f) = 1.98E-03, C.o.V.(%) = 5.02
Simul.No. 300000, successf.= 300000 E(P_f) = 1.97E-03, C.o.V.(%) = 4.11
Simul.No. 400000, successf.= 400000 E(P_f) = 1.98E-03, C.o.V.(%) = 3.55
Simul.No. 500000, successf.= 500000 E(P_f) = 2.03E-03, C.o.V.(%) = 3.13
Simul.No. 600000, successf.= 600000 E(P_f) = 2.07E-03, C.o.V.(%) = 2.83
Simul.No. 700000, successf.= 700000 E(P_f) = 2.06E-03, C.o.V.(%) = 2.63
Simul.No. 800000, successf.= 800000 E(P_f) = 2.03E-03, C.o.V.(%) = 2.48
Simul.No. 900000, successf.= 900000 E(P_f) = 2.03E-03, C.o.V.(%) = 2.34
Simul.No.1000000, successf.=1000000 E(P_f) = 2.04E-03, C.o.V.(%) = 2.21

beta(Simulation)= 2.872; Pf(Simulation)= 2.04E-03 (IER= 0)

----- Statistics after COMREL-TI -----
State Function calls = 1000000
State Funct. gradient evaluations = 0
Total computation time (CPU-secs.)= 16.61
The error indicator (IER) was = 0
*****
```

Reliability analysis is finished


















### 3.Versuch

### Form/Sorm

#### Tabular Form

<b>R</b> $f_y$	Streckgrenze des Stahls	Lognormal	<b>M</b> ✓	$\bar{x}$ $C$ = 280000	$\sigma$ $C$ = 19600
<b>R</b> $y_s$	Wichte des Stahls	Normal (Gauss)	<b>M</b> ✓	$\bar{x}$ $C$ = 77	$\sigma$ $C$ = 0.77
<b>R</b> $q$	Nutzlast	Gamma	<b>M</b> ✓	$\bar{x}$ $C$ = 10	$\sigma$ $C$ = 1.89
<b>R</b> OR	Unsicherheiten Widerstandsseite	Lognormal	<b>M</b> ✓	$\bar{x}$ $C$ = 1	$\sigma$ $C$ = 0.05
<b>R</b> OE	Unsicherheiten Einwirkungsseite	Normal (Gauss)	<b>M</b> ✓	$\bar{x}$ $C$ = 1	$\sigma$ $C$ = 0.2
<b>P</b> $W_y$	Widerstandsmoment des Querschnittes	Constant	<b>P</b> ✓	$C$ $C$ = 0.0001087	
<b>P</b> A	Querschnittsfläche	Constant	<b>P</b> ✓	$C$ $C$ = 0.002001	
<b>P</b> c	Kraglänge	Constant	<b>P</b> ✓	$C$ $C$ = 1.6	

#### Computation Options

 Amount of Results to File *.R??	NPRI	✓ Large
 Amount of Monitoring Information	IMON	✓ Small
 Method of Probability Integration	IMET	✓ Second Order Reliability Method
 Optimizer for $\beta$ -point Search	IOPT	✓ RFLS
 Number of Samples	NSIMUL	✓ 0
 Computation of Sensitivities	IALFA	✓ Both
 X-space Gradient Numerical Scheme	IGRF	✓ Forward Differences
 Maximum Number of Iterations in Algorithm #1	MAX1	✓ 50
 Maximum Number of Iterations in Algorithm #2	MAX2	✓ 50
 Convergence Criterion for $\beta$ -point Search	EPSCON	✓ 0.001
 Armijo Line-search Stop Criterion	SMU	✓ 0.1
 Initial Values for Random Number Generator	SIMSTA	✓ Set 1
 Stationarity	ITV	✓ No
 Threshold Probability of the Intermediate Failure Domains	PTRESH	0.1
 Initial Scaling Factor of the Proposal Distribution	SDMULT	0.6
 Number of Seed Values for SDMULT to Modify	ADPT_NCS	15
 Export Samples from Monte Carlo or Subset Simulation	IXLS	No Samples

#### Numerical Results

```
*****
----- Comrel-TI (Version 10) -----
---- (c) Copyright: RCP GmbH (1989-2020) ----
*****
```

```
-----
Job name ..... : Versuch3
Failure criterion no. : 1
Comment : No commen
Transformation type : Rosenblatt
Optimization algorithm: RFLS
```

```

-----
FORM-beta= 3.350; SORM-beta= 3.383; beta(Sampling)= -- (IER= 0)
FORM-Pf= 4.05E-04; SORM-Pf= 3.58E-04; Pf(Sampling)= --

```

```






















----- Statistics after COMREL-TI -----
State Function calls = 61
State Funct. gradient evaluations = 6
Total computation time (CPU-secs.)= 0.02
The error indicator (IER) was = 0
*****

```

Reliability analysis is finished

## MCS

### Computation Options

 Amount of Results to File *.R??	NPRI	✓ Large
 Amount of Monitoring Information	IMON	✓ Small
 Method of Probability Integration	IMET	✓ Crude Monte Carlo Sampling
 Optimizer for $\beta$ -point Search	IOPT	
 Number of Samples	NSIMUL	✓ 1000000
 Computation of Sensitivities	IALFA	✓ Both
 X-space Gradient Numerical Scheme	IGRF	✓ Forward Differences
 Maximum Number of Iterations in Algorithm #1	MAX1	✓ 50
 Maximum Number of Iterations in Algorithm #2	MAX2	✓ 50
 Convergence Criterion for $\beta$ -point Search	EPSCON	✓ 0.001
 Armijo Line-search Stop Criterion	SMU	✓ 0.1
 Initial Values for Random Number Generator	SIMSTA	✓ Set 1
 Stationarity	ITV	✓ No
 Threshold Probability of the Intermediate Failure Domains	PTRESH	 0.1
 Initial Scaling Factor of the Proposal Distribution	SDMULT	 0.6
 Number of Seed Values for SDMULT to Modify	ADPT_NCS	 15
 Export Samples from Monte Carlo or Subset Simulation	IXLS	✓ No Samples

# Numerical Results

```
*****
----- Comrel-TI (Version 10) -----
---- (c) Copyright: RCP GmbH (1989-2020) ----
*****
```

```
-----
Job name ..... : Versuch3
Failure criterion no. : 1
Comment : No commen
Transformation type : Rosenblatt
Optimization algorithm: -----
-----
--- Crude Monte Carlo sampling with 1000000 samples; Seed=Set No. 1 ---
Simul.No. 100000, successf.= 100000 E(P_f)= 3.70E-04, C.o.V.(%)= 16.44
Simul.No. 200000, successf.= 200000 E(P_f)= 3.30E-04, C.o.V.(%)= 12.31
Simul.No. 300000, successf.= 300000 E(P_f)= 3.37E-04, C.o.V.(%)= 9.95
Simul.No. 400000, successf.= 400000 E(P_f)= 3.10E-04, C.o.V.(%)= 8.98
Simul.No. 500000, successf.= 500000 E(P_f)= 3.04E-04, C.o.V.(%)= 8.11
Simul.No. 600000, successf.= 600000 E(P_f)= 3.23E-04, C.o.V.(%)= 7.18
Simul.No. 700000, successf.= 700000 E(P_f)= 3.07E-04, C.o.V.(%)= 6.82
Simul.No. 800000, successf.= 800000 E(P_f)= 3.14E-04, C.o.V.(%)= 6.31
Simul.No. 900000, successf.= 900000 E(P_f)= 3.08E-04, C.o.V.(%)= 6.01
Simul.No.1000000, successf.=1000000 E(P_f)= 3.11E-04, C.o.V.(%)= 5.67

beta(Simulation)= 3.422; Pf(Simulation)= 3.11E-04 (IER= 0)

----- Statistics after COMREL-TI -----
State Function calls = 1000000
State Funct. gradient evaluations = 0
Total computation time (CPU-secs.)= 16.55
The error indicator (IER) was = 0
*****
```

Reliability analysis is finished










## 4.Versuch

### Form/Sorm

#### Tabular Form

<b>R</b> <sub>fy</sub>	Streckgrenze des Stahls	Lognormal	<b>M</b>	✓	$\bar{x}_C = 280000$	$\sigma_C = 19600$
<b>R</b> <sub>ys</sub>	Wichte des Stahl	Normal (Gauss)	<b>M</b>	✓	$\bar{x}_C = 77$	$\sigma_C = 0.77$
<b>R</b> <sub>q</sub>	Nutzlast	Gamma	<b>M</b>	✓	$\bar{x}_C = 10$	$\sigma_C = 1.89$
<b>R</b> <sub>OR</sub>	Unsicherheiten Widerstandsseite	Lognormal	<b>M</b>	✓	$\bar{x}_C = 1$	$\sigma_C = 0.05$
<b>R</b> <sub>OE</sub>	Unsicherheiten EINwirlungsseite	Normal (Gauss)	<b>M</b>	✓	$\bar{x}_C = 1$	$\sigma_C = 0.2$
<b>P</b> <sub>Wy</sub>	Widerstandsmoment des Querschnittes	Constant	<b>P</b>	✓	$C_C = 0.0001087$	
<b>P</b> <sub>A</sub>	Querschnittsfläche	Constant	<b>P</b>	✓	$C_C = 0.002001$	
<b>P</b> <sub>c</sub>	Kraglänge	Constant	<b>P</b>	✓	$C_C = 1.45$	

## Computation Options

 Amount of Results to File *.R??	NPRI	✓ Large
 Amount of Monitoring Information	IMON	✓ Small
 Method of Probability Integration	IMET	✓ Second Order Reliability Method
 Optimizer for $\beta$ -point Search	IOPT	✓ RFLS
 Number of Samples	NSIMUL	✓ 0
 Computation of Sensitivities	IALFA	✓ Both
 X-space Gradient Numerical Scheme	IGRF	✓ Forward Differences
 Maximum Number of Iterations in Algorithm #1	MAX1	✓ 50
 Maximum Number of Iterations in Algorithm #2	MAX2	✓ 50
 Convergence Criterion for $\beta$ -point Search	EPSCON	✓ 0.001
 Armijo Line-search Stop Criterion	SMU	✓ 0.1
 Initial Values for Random Number Generator	SIMSTA	✓ Set 1
 Stationarity	ITV	✓ No
 Threshold Probability of the Intermediate Failure Domains	PTRESH	🟡 0.1
 Initial Scaling Factor of the Proposal Distribution	SDMULT	🟡 0.6
 Number of Seed Values for SDMULT to Modify	ADPT_NCS	🟡 15
 Export Samples from Monte Carlo or Subset Simulation	IXLS	🟡 No Samples

## Numerical Results

```

*****
----- Comrel-TI (Version 10) -----
---- (c) Copyright: RCP GmbH (1989-2020) ----
*****
  
```

```

-----
Job name ..... : Versuch3
Failure criterion no. : 1
Comment : No commen
Transformation type : Rosenblatt
Optimization algorithm: RFLS
-----
  
```

```


















FORM-beta= 4.214; SORM-beta= 4.245; beta(Sampling)= -- (IER= 0)
FORM-Pf= 1.26E-05; SORM-Pf= 1.09E-05; Pf(Sampling)= --
  
```

```

----- Statistics after COMREL-TI -----
State Function calls = 67
State Funct. gradient evaluations = 7
Total computation time (CPU-secs.)= 0.02
The error indicator (IER) was = 0
*****
  
```

Reliability analysis is finished

### Computation Options

 Amount of Results to File *.R??	NPRI	✓ Large
 Amount of Monitoring Information	IMON	✓ Small
 Method of Probability Integration	IMET	✓ Crude Monte Carlo Sampling
 Optimizer for $\beta$ -point Search	IOPT	🟡
 Number of Samples	NSIMUL	✓ 1000000
 Computation of Sensitivities	IALFA	✓ Both
 X-space Gradient Numerical Scheme	IGRF	✓ Forward Differences
 Maximum Number of Iterations in Algorithm #1	MAX1	✓ 50
 Maximum Number of Iterations in Algorithm #2	MAX2	✓ 50
 Convergence Criterion for $\beta$ -point Search	EPSCON	✓ 0.001
 Armijo Line-search Stop Criterion	SMU	✓ 0.1
 Initial Values for Random Number Generator	SIMSTA	✓ Set 1
 Stationarity	ITV	✓ No
 Threshold Probability of the Intermediate Failure Domains	PTRESH	🟡 0.1
 Initial Scaling Factor of the Proposal Distribution	SDMULT	🟡 0.6
 Number of Seed Values for SDMULT to Modify	ADPT_NCS	🟡 15
 Export Samples from Monte Carlo or Subset Simulation	IXLS	✓ No Samples

### Numerical Results

```
*****
----- Comrel-TI (Version 10) -----
---- (c) Copyright: RCP GmbH (1989-2020) ----
*****
```

```
-----
Job name ..... : Versuch3
Failure criterion no. : 1
Comment : No commen
Transformation type : Rosenblatt
Optimization algorithm: -----

--- Crude Monte Carlo sampling with 1000000 samples; Seed=Set No. 1 ---
Simul.No. 100000, successf.= 100000 E(P_f)= 0.0 , C.o.V.(%)= 0.00
Simul.No. 200000, successf.= 200000 E(P_f)= 1.00E-05, C.o.V.(%)= 70.71
Simul.No. 300000, successf.= 300000 E(P_f)= 1.33E-05, C.o.V.(%)= 50.00
Simul.No. 400000, successf.= 400000 E(P_f)= 1.00E-05, C.o.V.(%)= 50.00
Simul.No. 500000, successf.= 500000 E(P_f)= 8.00E-06, C.o.V.(%)= 50.00
Simul.No. 600000, successf.= 600000 E(P_f)= 1.00E-05, C.o.V.(%)= 40.82
Simul.No. 700000, successf.= 700000 E(P_f)= 1.14E-05, C.o.V.(%)= 35.36
Simul.No. 800000, successf.= 800000 E(P_f)= 1.00E-05, C.o.V.(%)= 35.36
Simul.No. 900000, successf.= 900000 E(P_f)= 1.00E-05, C.o.V.(%)= 33.33
Simul.No.1000000, successf.=1000000 E(P_f)= 9.00E-06, C.o.V.(%)= 33.33

beta(Simulation)= 4.289; Pf(Simulation)= 9.00E-06 (IER= 0)

----- Statistics after COMREL-TI -----
State Function calls = 1000000
State Funct. gradient evaluations = 0
Total computation time (CPU-secs.)= 16.58
The error indicator (IER) was = 0
*****
```

Reliability analysis is finished